ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1952

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

2

КОММУНИЗМ—ЭТО ЕСТЬ СОВЕТСКАЯ ВЛАСТЬ
ПЛЮС ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ВСЕЙ СТРАНЫ (Ленин)

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В 1880 Г.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

2
1952
ФЕВРАЛЬ

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

СОДЕРЖАНИЕ

Б. С. Успенский — Гидроэлектрические станции большой мощности 3
Г. Е. Поспелов—О предельной компенсации параметров электропередачи 12
Д. С. Лившиц — Магистральные системы распределения энергии в промышленных сетях низкого напряжения 17
Г. И. Атабеков — Графоаналитический метод исследования работы дистанционных реле 23
Б. И. Розенберг — Компенсация уравнительных токов в замкнутых контурах высоковольтных сетей 33
В. В. Енько — Работа синхронной неявнополюсной машины при постоянных значениях напряжения и возбуждения 40
М. И. Алябьев — Опытное определение коммутационной реакции в электромашинных усилителях с поперечным полем и в машинах постоянного тока 48
Г. Г. Марквардт и **П. Н. Шляхто** — О наивыгоднейшей характеристике тягового двигателя 52
М. В. Воропанов — Новый метод регулирования степени развития электрической дуги высокой интенсивности 56
Э. Г. Удерман — Применение годографа затухания к исследованию линеаризованных регулируемых систем 59
В. Н. Мильштейн и **А. Д. Рабинович** — Исследование процессов в электрических цепях с изменяющимися параметрами 68

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Л. А. Гончарский — Метод получения развертывающего напряжения для электронных осциллографов 71

ДИСКУССИИ 75

Правила устройства электротехнических установок **В. К. Балуев.** Тарифные мероприятия в борьбе за повышение $\cos\varphi$ **С. Е. Кузин.** О несимметричных режимах работы генераторов **И. А. Сыромятников, Л. Г. Мамиконянц. Э. Г. Файнштейн.** К статье Г. И. Штурмана „Разомкнутые беличьи клетки в короткозамкнутых асинхронных двигателях" **А. Д. Имас, Л. И. Штурман.**

ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА 83

О руководстве к лаборатории электромагнитного поля. Аналитическое выражение характеристики холостого хода электрических машин.

ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ 84

Подвижная электрическая станция. Применение автоматического повторного включения в электрических сетях нефтяных промыслов. Использование тепла пусковых сопротивлений. Электрифицированный инструмент. Проект электропередачи 400 *кв* в Рурскую область.

ХРОНИКА 89

Академик Г. М. Кржижановский. Научно-техническая конференция на Сталинградгидрострое. Конференция по троллейбусному транспорту. А. С. Румянцев, П. Л. Калантаров.

БИБЛИОГРАФИЯ

Г. П. Хализев — Книга М. Г. Чиликина „Общий курс электропривода" 94
В. К Балуев и Г. К. Цверава — О журнале „Рабочий энергетик" (№№ 1 — 9, 1951) 95
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике 96

Номограммы для определения коэффициентов аналитического выражения кривых намагничивания ($B = A$ arctg KH) *(на третьей полосе обложке)*

◇ ◇ ◇

ВОЛОГОДСКАЯ
областная библиотека

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

Гидроэлектрические станции большой мощности

Доцент Б. С. УСПЕНСКИЙ

Гидроэнергопроект

В настоящем номере публикуется окончание статьи Б. С. Успенского. Если в первой части статьи (Электричество, № 1, 1952) рассматривались главным образом гидротехнические вопросы, то во второй части рассматриваются некоторые вопросы гидротурбинного оборудования и гидрогенераторов, главная схема электрических соединений гэс и схема собственного расхода, вопросы управления, автоматизации и телемеханизации гэс, компоновка здания гэс и размещение оборудования, архитектурное оформление гэс.

Гидроагрегаты. На гидроэлектростанциях, построенных на равнинных реках, как правило, применяются гидротурбины с двойным регулированием, т. е поворотно-лопастные. Это объясняется значительными колебаниями напора в течение года и суток.

Предельная величина диаметра рабочего колеса современной поворотно-лопастной турбины равна 9 ... 9,3 *м*. Агрегат с таким колесом при напорах 20 ... 25 *м* развивает мощность 100 ... 120 тыс. *квт*. На гидроэлектростанции мощностью 1,5 ... 2 млн. *квт* придется установить 15 ... 20 агрегатов. Многоагрегатность — характерная особенность гидроэлектростанций большой мощности на равнинных реках.

Основная задача, возникающая при проектировании гидромеханической и электрической части этих гэс, сводится к тому, чтобы в максимальной степени облегчить и упростить эксплуатацию столь большого числа мощных гидроагрегатов. Она решается двумя путями: 1) путем упрощения других гидромеханических и электротехнических элементов гэс и 2) путем максимальной автоматизации.

Автоматизация гэс и отказ от постоянно дежурящего у машин персонала потребовали пересмотра конструкции агрегата, его отдельных узлов и вспомогательных устройств в направлении повышения надежности их работы. Этот пересмотр привел прежде всего к упрощению конструкции гидроагрегата и уменьшению его габаритов по высоте.

Надежность работы вращающихся машин в значительной мере зависит от смазки их подшипников. В ряде конструкций современных гидроагрегатов (рис. 9) число подшипников сведено к двум, из которых один — генераторный и второй — турбинный. Подпятник нашей отечественной конструкции с самоустанавливающимися сегментами по надежности работы стоит намного выше подпятников, выпускаемых фирмами капиталистических стран. Автоматизация смазки в нем достигается не какими-либо дополнительными устройствами, а является органическим свойством его конструкции. Подпятник и генераторный подшипник размещены в общей ванне с постоянным объемом масла, в которую встроены водяные маслоохладители и которая расположена на специальном стуле крышки турбины. Масляная система смазки турбинного подшипника заменена водяной с применением древопластики.

При такой конструкции гидроагрегата в целом, его подпятника и подшипников устраняется крестовина для промежуточного подшипника, ликвидируется сложная система принудительно-циркуляционной смазки, которая была слабым местом в конструкции гидроагрегата, подготовка пуска агрегата в части смазки значительно упрощается и сводится к открытию задвижки, преграждающей доступ воды в маслоохладители подпятника и в подшипник турбины.

Система технического водоснабжения также упрощена. В ней вместо специальных насосных установок используется действующий напор гэс.

В настоящее время имеются все возможности для того, чтобы сделать работу гидроагрегата в части вспомогательных устройств практически не зависимой от бесперебойного электроснабжения системы собственного расхода. В аварийных случаях гидроагрегат должен развертываться и принимать нагрузку при отсутствии напряжения переменного тока в системе собственного расхода. Этому условию должна отвечать и система возбуждения гидрогенератора.

Надежность работы гидрогенераторов значительно повышена благодаря применению стержневой обмотки, исключающей витковые замыкания. Получающий широкое применение метод самосинхронизации гидрогенераторов также способствует повышению надежности их работы и удобству эксплуатации. В связи с этим современные гидрогенераторы, как правило, снабжаются демпферными обмотками.

Генераторы мощных гидроэлектростанций работают на линии электропередачи большой протяженности. Поэтому к их параметрам и системе возбуждения по условиям устойчивости параллельной работы предъявляются повышенные требования. Синхронная реактивность по продольной оси генератора должна находиться в пределах 0,5...0,7, постоянная инерции — 10...16 *сек*, а коэффициент мощности — 0,8...0,85.

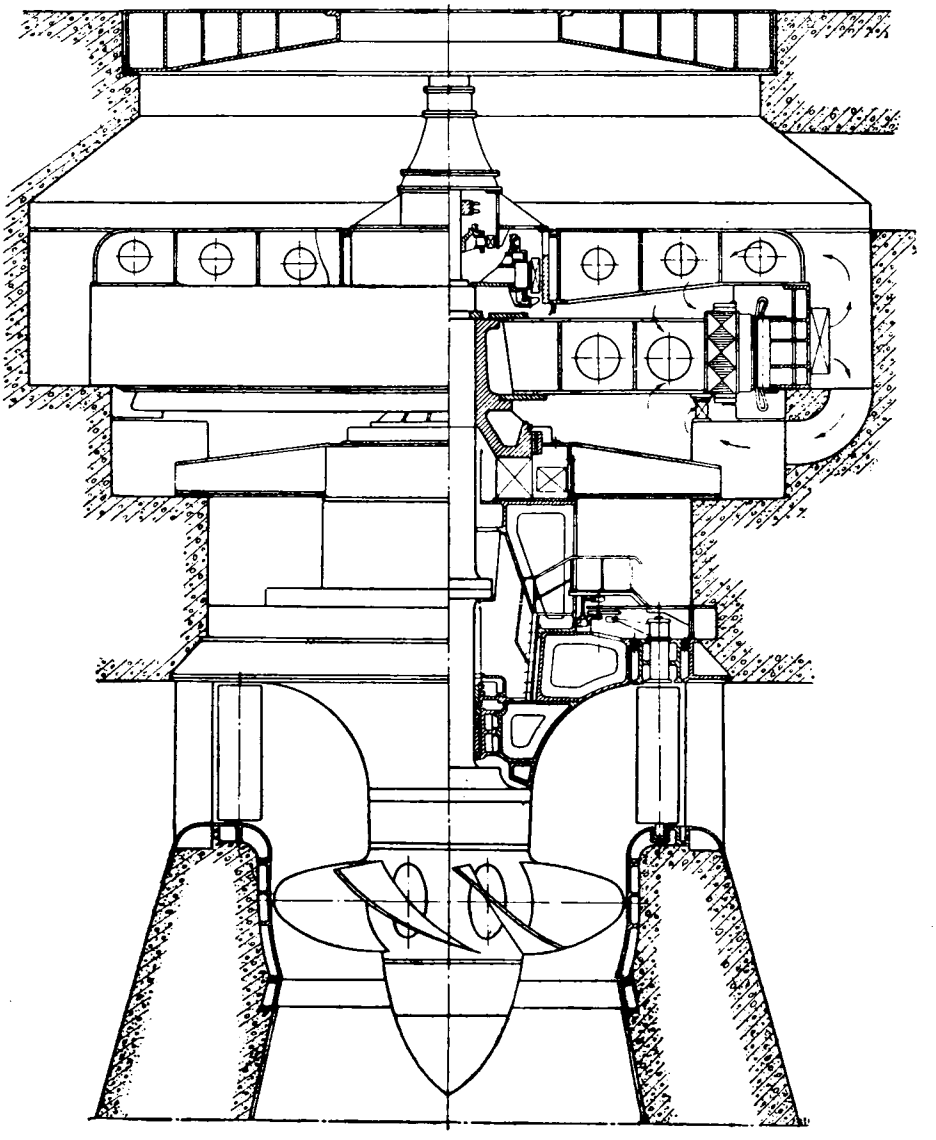


Рис. 9. Разрез по гидроагрегату.

Отмечается тенденция к увеличению полной мощности гидрогенераторов, что позволяет в отдельные периоды года увеличивать их активную мощность на 10...15%. Такая возможность связана с тем, что развиваемая гидротурбинами мощность довольно продолжительное время в течение года выше номинальной, так как их расчетный напор ниже нормального на 20...30%. Повышенное использование гидроагрегатов целесообразно в период паводка, когда сбрасываются излишки воды, а также для сохранения номинальной мощности станции во время выхода из работы одной из машин.

Возбудитель и подвозбудитель размещаются на общем валу с главным гидрогенератором. Этим обеспечивается повышенная надежность в работе и самозапуск гидроагрегата. Что же касается быстродействия возбуждения, то в настоящее время проводятся исследования с целью доведения скорости возбуждения до 300...600% в секунду и повышения потолка возбуждения до 300...400%.

На гидроэлектростанциях большой мощности обычно отсутствуют распределительные устройства генераторного напряжения. Поэтому к напряжению гидрогенераторов не предъявляется особо жестких требований. Для облегчения токопроводов, соединяющих генераторы с повышающими трансформаторами, его желательно сделать наиболее высоким. Но вместе с этим оно должно быть оптимальным в отношении стоимости гидрогенератора. При современном соотношении стоимости меди и миканитовой изоляции для гидрогенераторов мощностью 100 ... 140 тыс. *кв* оптимальное напряжение находится между 10,5 и 13,8 *кв*.

Для уменьшения высоты гидроагрегата может быть применен телескопический принцип размещения отдельных деталей и узлов, например возбудителя, подвозбудителя, золотника маслоприемной головки системы поворота лопастей рабочего колеса турбины и др.

Система автоматизации гидроагрегата поддерживает в рабочем состоянии все вспомогательные устройства, к числу которых в первую очередь относится маслонапорная установка для

управления направляющим аппаратом и лопастями рабочего колеса. Благодаря этому гидроагрегат находится в постоянной готовности, позволяющей развернуть его и набрать нагрузку за 1,5 ... 3 *мин*. Большая мобильность — одно из основных преимуществ гидроагрегата по сравнению с паровым и одна из причин стремления разместить аварийный резерв мощности энергосистемы на гидроэлектростанциях.

Краны и затворы гидроэлектростанции. Грузоподъемность крана, обслуживающего гидроагрегаты, определяется весом наиболее тяжелой детали. Такой деталью является ротор генератора, вес которого достигает 500...1 000 *т*.

Сосредоточивать в одном кране грузоподъемность такой величины нецелесообразно. Краны большой грузоподъемности маломаневренны, тихоходны, имеют большой собственный вес, достигающий удвоенного веса поднимаемого груза, и требуют утяжеления подкрановых путей и конструкций. Ввиду этого, как правило, применяют два крана, грузоподъемность каждого из которых равна половине веса ротора генератора. Для подъема последнего их спаривают, связывая крюки обоих кранов общей траверсой, и подвешивают ротор к ее середине с помощью специальных захватных приспособлений. Электродвигатели одноименного назначения того и другого крана имеют синхронизирующую связь (электрический вал). Управление кранами осуществляется из одной кабины любого крана.

Разукрупнение кранов значительно облегчает и ускоряет монтаж агрегата.

При расположении агрегатов в отдельных ячейках или в случае пониженного машинного зала, как правило, применяются портальные краны, находящиеся вне машинного зала, на открытом воздухе. Если водосливная плотина вплотную примыкает к зданию гэс, то стремятся сделать таким образом, чтобы одни и те же портальные краны обслуживали и агрегаты, и затворы, или, по крайней мере, устроить для них один общий путь. Внешний вид портальных кранов должен иметь соответствующее архитектурное оформление.

Для очистки решеток применяются особые машины в виде портальных кранов с грейферами, длина челюсти которых равна 8...15 *м*.

Для предотвращения забивки шугой и донным льдом решеток турбин применяется электрический обогрев последних. Потребляемая для этой цели мощность достигает значительной величины — порядка 20...50 *квт* на 1 *пог. м* длины решеток по фронту гэс.

В последнее время в качестве привода к затворам гэс получили довольно широкое распространение гидравлические подъемники, в которых используется масло под давлением 60...70 *ат*. Гидравлические подъемники привлекают простотой своего устройства и малыми габаритами по сравнению с тяжелыми лебедками.

Главная схема электрических соединений. Крупные гидроэлектростанции отдают свою электроэнергию в основном при двух повышенных напряжениях: 400 и 220 *кв* или 220 и 110 *кв*.

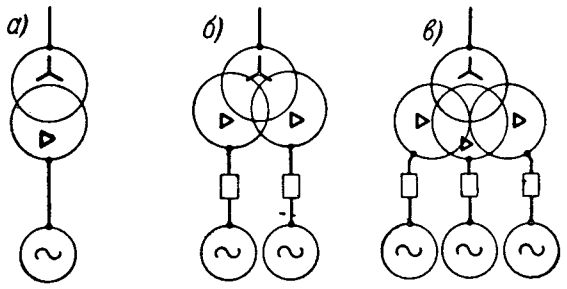


Рис. 10.

Вместе с напряжениями 400 и 220 *кв* применяется также и третье напряжение 110 *кв* для питания потребителей, расположенных в районе, прилегающем к гидроэлектростанции.

Мощные гидроэлектростанции обычно удалены от потребителей, вследствие чего возможность питания последних на генераторном напряжении исключена. Большая мощность агрегатов, достигающая 100 тыс. *квт* и более, предъявляет к схеме электрических соединений гэс требование повышенной надежности. Ввиду этих обстоятельств на гидростанциях большой мощности применяется схема блока генератор-трансформатор. Целесообразность такого соединения вытекает также из высокой эксплуатационной надежности соединяемых последовательно гидрогенератора и трансформатора. Отказ от переключения генераторов к различным трансформаторам обосновывается тем, что при большой мощности генераторов устройство, позволяющее производить это переключение, получается весьма громоздким, снижающим надежность эксплуатации.

Схема блока генератор-трансформатор имеет несколько разновидностей: 1) схема одиночного блока, при которой один генератор соединен с одним трансформатором (рис. 10,*а*); 2) схема укрупненного блока, при которой два, три и более генераторов присоединены к одному трансформатору (рис. 10,*б* и 10,*в*); 3) схема объединенного блока, при которой два одиночных блока объединены на повышенном напряжении (рис. 11).

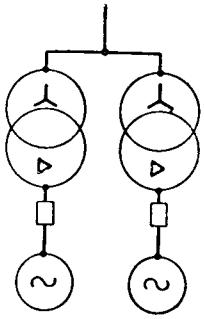
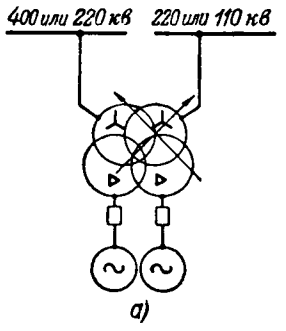


Рис. 11.

При схеме укрупненного блока целесообразно применять трансформаторы с расщепленными обмотками на генераторном напряжении. Это позволяет уменьшить величину токов короткого замыкания до приемлемых значений и повысить надежность работы генераторов.

Соединение генераторов с трансформаторами в конструктивном отношении должно быть вы-



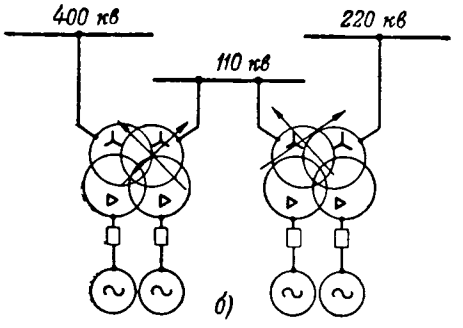


Рис. 12.

полнено весьма надежно с тем, чтобы исключить возможность междуфазных коротких замыканий. Применение для этой цели кабеля по ряду причин невозможно. Поэтому каждая фаза соединения осуществляется двумя голыми шинами корытного профиля, вместе образующими квадрат. Конструктивно это соединение выполняется так, что в нем фазы разделены между собой. При выполнении токопроводов встречаются трудности в отношении локализации вредных влияний нескомпенсированного магнитного потока. Эти вредные влияния связаны с протеканием по шинам тока величиной 5 000 ... 6 000 *а*.

Мощность блока определяется, с одной стороны, мощностью энергосистемы, с которой связана гэс, а с другой, — предельной мощностью трансформатора. Современная техника трансформаторостроения позволяет построить достаточно механически прочный, жесткий и вместе с тем транспортабельный трансформатор мощностью 100 ... 120 тыс. *ква* в единице. Предельная мощность трансформатора мало зависит от того, будет он трехфазным или однофазным. В случае применения в схеме (рис. 11) трехфазных трансформаторов мощность блока может достигнуть 220 ... 240 тыс. *ква*. В случае же применения в схеме (рис. 10,*в*) однофазных трансформаторов она может составить 300 ... 360 тыс. *ква*.

Таким образом, при наличии возможности в энергосистеме отдельные элементы электрической части поддаются укрупнению в большей мере, чем гидротурбины. Укрупнение элементов электрической части дает существенные преимущества. Оно удешевляет стоимость распределительных устройств, хотя бы только за счет уменьшения числа выключателей. При большом числе агрегатов и значительной длине здания гэс оно облегчает конструктивное выполнение соединения

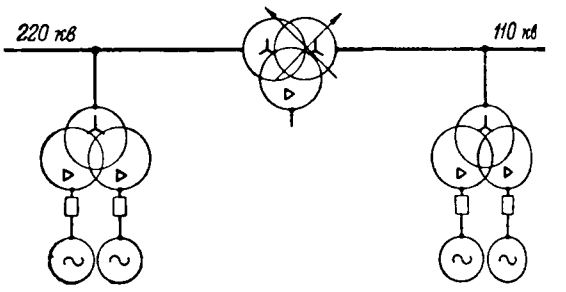


Рис. 13.

повышающих трансформаторов, устанавливаемы на здании гэс, с распределительными устр ствами повышенного напряжения.

Соединение распределительных устройств п вышенного напряжения между собой наибол экономично выполняется с помощью трехобм точных трансформаторов. На обмотке одного напряжений этих трансформаторов предусмат вается регулирование реактивной, а в отдельн случаях и активной мощности. Присоединен трехобмоточных трансформаторов показано рис. 12.

Конструктивное выполнение выводов тра форматора при двух повышенных напряжени сопряжено с большими трудностями. В неко рых случаях приходится прибегать к применен трансформатора связи (рис. 13). Применен кабеля 110 *кв* могло бы уменьшить эти труд сти. Однако такое решение неприемлемо по ус виям надежности эксплуатации.

Принципы построения схем электрических с единений повышенного напряжения в значите ной степени зависят от числа отходящих лини а также мощности и ответственности как отде ных блоков, так и всего коммутационного уз

От мощных гидроэлектростанций обычно отх дит небольшое число линий напряжени 400 *кв* — одна, большей частью две и редко три линии. Число линий напряжением 200 *кв* д стигает 6 ... 8 и напряжением 110 *кв* может бы более 8.

На напряжении 400 *кв* число элементов, уч ствующих в схеме электрических соединени достигает предельно 6 ... 7, т. е. 2 ... 4 трансфо матора и 2 ... 3 линии электропередачи. Исхо из приведенных соображений схему электри ских соединений на этом напряжении целесоо разно строить по принципам многократного пр соединения элементов и повышенного исполь вания выключателей. Последнее связано с бол шой стоимостью выключателей. Примерная сх ма, построенная по этим принципам, изображе на рис. 14.

В отличие от тепловых электростанций г в основном работает по пиковому и полупик вому графику. Это приводит к периодически отключениям повышающих трансформаторов делает их оперативными элементами схемы. Э особенность гэс и требование автоматизации и т лемеханизации энергосистем также учтены схеме, приведенной на рис. 14.

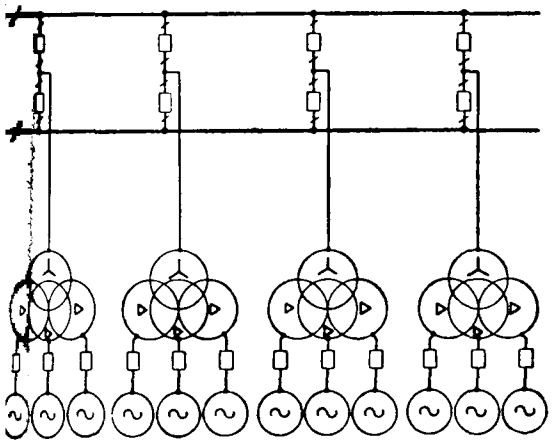


Рис. 14.

На стороне 220 *кв* схему электрических соединений целесообразно строить также по принципу многократного присоединения. При этом по условиям ограничения токов короткого замыкания сборные шины секционируются.

Схему электрических соединений распределительного устройства 110 *кв* целесообразно строить по принципу двойного присоединения питающих элементов и по принципу одиночного присоединения для всех остальных элементов.

Схема собственного расхода гэс. Надежность питания потребителей собственного расхода является основным требованием при построении этой схемы. При автоматизации и современной конструкции гидроагрегатов и их вспомогательных устройств допустимы лишь кратковременные перерывы в электроснабжении потребителей, не причиняющие ущерба бесперебойной работе станции в целом. Схема также должна обеспечить возможность самозапуска агрегатов при аварийном отсутствии напряжения в системе собственного расхода.

В основу построения схемы целесообразно положить принцип поагрегатного питания потребителей с одновременным резервированием его от общестанционного распределительного устройства собственного расхода (рис. 15). Каждый трансформатор собственного расхода присоединяется к цепи своего генератора непосредственно, без выключателя. Это позволяет избежать установки выключателя чрезвычайно большой мощности. Такое присоединение допустимо, так как трансформатор имеет весьма высокую надежность в эксплуатации.

Резервный трансформатор собственного расхода необходим для поддержания в рабочем состоянии вспомогательных устройств агрегата во время его остановки.

Общестанционное распределительное устройство собственного расхода питается от особых понижающих трансформаторов, присоединенных к напряжению 110 *кв*. Для него принимается напряжение 6 или 10 *кв*. Применение трансформаторов с сухой стеклянной изоляцией позволяет осуществить в системе собственного расхода схему глубокого ввода высокого напряжения.

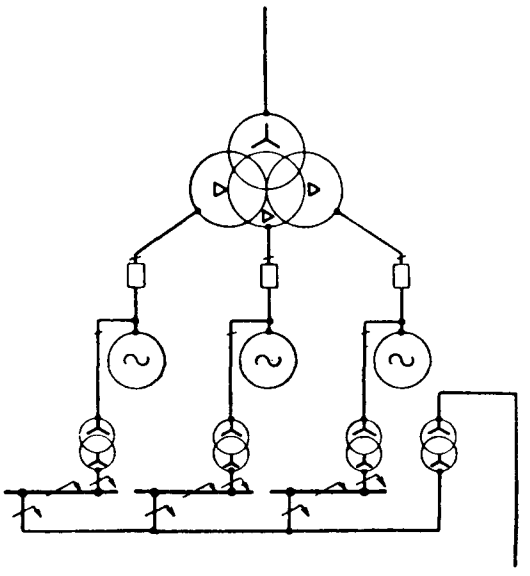


Рис. 15.

Трансформаторы общестанционного собственного расхода напряжением 110/6 или 10 *кв* применяются исключительно на гидроэлектростанциях большой мощности. На менее мощных гэс питание потребителей общестанционного собственного расхода осуществляется посредством ответвлений от цепей повышающих трансформаторов.

Напряжение электродвигателей мощностью свыше 75 *квт* при их небольшом числе и концентрированном расположении относительно агрегата целесообразно принять равным 380 *в*. При большой длине водосливного фронта гэс и большой мощности, потребляемой портальными кранами, особенно при их спаренной работе, возникает необходимость в повышенном напряжении для питания крановых электродвигателей.

Ввиду высокой надежности работы возбудителя, сидящего на одном валу с главным агрегатом, и благоприятных условий для производства профилактических осмотров и ремонтов [1] от установки резервного возбудителя можно отказаться. Такое решение является общепринятым для гидроэлектростанций.

Управление, автоматизация и телемеханизация гидроэлектростанции. Современный гидроагрегат строится полностью автоматизированным, что позволяет не иметь при нем дежурного персонала. В машинном зале мощной гэс может находиться лишь персонал, производящий инспекторский осмотр гидромеханического оборудования.

Агрегат пускается или останавливается от одного импульса. Операция пуска заканчивается включением генератора в электрическую систему. В настоящее время, как упоминалось выше, включение генераторов осуществляется по способу самосинхронизации, что упрощает и ускоряет процесс ввода в работу агрегата. Глубокое теоретическое и широкое экспериментальное обосно-

[1] При работе гэс по полупиковому и пиковому графику имеется возможность останавливать агрегат на несколько часов в течение суток.

вание этот метод впервые получил у нас в Советском Союзе.

Регулирование мощности и напряжения на гидроэлектростанции осуществляется автоматически, но с возможностью перехода на ручное. Регулирование мощности и частоты в энергосистемах, обычно возлагаемое на гидроэлектростанции, также автоматизируется.

Широкое применение находит автоматизация вспомогательных устройств, обеспечивающих подачу гидроагрегатам технической воды и воздуха, откачку дренажных вод и т. п.

Гидротурбины снабжены автоматическим регулированием к. п. д. по напору, что позволяет им в условиях изменяющихся горизонтов воды работать с оптимальным к. п. д., соответствующим действующему в данный момент напору.

Не автоматизируются операции, выполняемые инспекторским персоналом во время осмотра машин или связанные с переходом агрегата из ремонтного состояния в рабочее.

На гидроэлектростанции имеются местные, индивидуальные посты управления и общестанционный пост управления. Первые расположены непосредственно у агрегатов [2], на них сосредоточивается поэлементное управление отдельными узлами агрегата, ручная синхронизация, релейная защита гидрогенераторов и панели автоматики. С этих постов производятся испытания, наладка и опробование всех устройств гидроагрегата. На индивидуальный пост управления вынесены все измерительные приборы, позволяющие осуществлять ведение режима и контроль за состоянием агрегата.

На общестанционном посту управления сосредоточены дистанционное управление всеми оперативными элементами гэс и связанные с ним измерительная система и система сигнализации, а также измерительные приборы, необходимые для ведения режима работы гэс. С общестанционного поста управления производится комплексное управление главными агрегатами.

Преодоление трудностей управления большим числом агрегатов является одной из интересных задач при проектировании многоагрегатной гэс. Переход на укрупненные блоки в электрической части, очевидно, должен быть связан с переходом на управление блоком как единым комплексом. Для этого на гидроэлектростанции установлены специальные автоматические операторы. В процессе регулирования нагрузки блока оператор автоматически производит включение или отключение агрегатов и выравнивание нагрузки между работающими агрегатами. Все это делается таким образом, чтобы к. п. д. получался оптимальным. Воздействие на оператор при регулировании нагрузки блока производится или вручную, или посредством автоматов по частоте, мощности и т. п. На гэс с числом агрегатов, равным 20 и более, с помощью автоматического операто число управляемых комплексов может быть с дено к четырем-восьми [3].

Гидроэлектростанции обеспечиваются ср ствами телемеханики, позволяющими управл ими с диспетчерского пункта энергосистемы. диспетчерские пункты выносится также управ ние автооператорами.

Из сказанного видно, что переход к автом тическому управлению более крупными компле сами значительно упрощает процесс управлен большим количеством элементов. При этом мере отдаления поста управления от агрега степень укрупненности комплекса увеличивает С индивидуального поста производится управ ние отдельными элементами и агрегатом в ц лом, с общестанционного поста — агрегатом целом и блоком и с диспетчерского пункта только блоком.

Гидроэлектростанция и независимо от не шлюз оборудуются устройствами внешней и вну тренней связи, обеспечивающими ведение надеж ной и удобной эксплуатации.

Компоновка здания гэс и размещение обору дования. В целях удобства эксплуатации пр компоновке строительного блока каждого гидро агрегата должна быть обеспечена возможност сообщения по вертикали между отметкой расп ложения возбудителей и отметкой крышки тур бины. Помимо этого должен быть устроен по крайней мере один сквозной проход вдоль всего здания гидроэлектростанции. При всех компонов ках здания гэс, за исключением случая, когда агрегаты расположены в теле водослива, этот проход находится на отметке, близкой к верху статора генератора, и является главным. Чере него осуществляется сообщение между всем агрегатами гэс вдоль всей станции.

Регуляторы турбин и их маслонапорные уста новки при любых компоновках здания гэс распо лагаются в непосредственной близости от агре гата. Это дает возможность максимально укоро тить маслопроводы и механические связи систе мы регулирования. Как правило, регуляторы размещаются в пространстве между агрегатами на отметке главного прохода. В случае, когда агрегаты расположены в теле водослива, регуля торы турбин со своими маслонапорными установ ками помещаются в приагрегатном зале, приме но на уровне крышки турбины.

Выше указывалось, что современная кон струкция гидроагрегатов позволяет значительно увеличить промежуток времени от одной его пол ной разборки до другой. Кроме того, при экс плуатационном демонтаже агрегата нет необхо димости все детали размещать на монтажной площадке. Часть этих деталей, которые не боят ся атмосферных осадков, может быть размещена на открытых площадках. Что же касается пер-

[2] Местные посты управления создаются также и на территории распределительных устройств повышенного напряжения в связи с тем, что последние обычно удалены от здания гидроэлектростанции. На этих постах размещается релейная защита отходящих линий электропередачи.

[3] Основные принципы решения вопросов, связанных с многоагрегатностью, разработаны и освещены в статье Б. С. Успенского и Ю. А. Якуба „Основные положения по проектированию электромеханической части многоагрегатных гидроэлектростанций большой мощности", (Электричество, № 4, 1946).

нального монтажа, то при большом числе агатов можно широко использовать гнезда не-нтированных агрегатов. Все эти соображения орят за то, что размеры монтажной площадки роэлектростанции должны быть минимальны-. Учитывая высокую строительную стоимость нтажной площадки, такое решение является ональным и с экономической точки зрения. В отдельных случаях длину монтажной пло-адки по продольной оси гэс удается сделать вной 0,75 ширины блока агрегата. Однако при регатах с большими габаритами ее приходится еличивать до 1,5 этой ширины.

При ремонтах и осмотрах гидротурбин воз-кает необходимость в откачке воды из спи-льной камеры и всасывающей трубы. Для этой ли применяются насосы с вертикальными ва-ми. Электродвигатели этих насосов разме-ются на высоких отметках. Все насосы уста-ливаются в одном общем помещении насос-й станции. Их количество и производитель-ость определяются величиной фильтрационного хода и стремлением обеспечить опорожнение ненных емкостей за 15 ... 20 *час*.

При наличии возможности во многих случаях опорожнения спиральной камеры и всасы-ающей трубы устраивают систему сливных по-ов, которые располагаются ниже дна всасы-щих труб и соединены с емкостями, располо-ными под монтажной площадкой. Примене-сливных потерн позволяет уменьшить коли-во и мощность насосов, сократить расход роэнергии на откачку воды, ускорить про-сс откачки и уплотнение шандорных стенок щадью до 500 $м^2$ под воздействием быстро-растающего напора.

Размещение электрического оборудования. рактикой проектирования и эксплуатации уста-влено, что повышающие трансформаторы це-сообразно размещать непосредственно на са-гэс и в подавляющем числе случаев со сто-ны нижнего бьефа. При таком расположении нсформаторов их связи с генераторами полу-ются наиболее короткими.

Сборка и ревизия трансформаторов произво-тся на монтажной площадке. Для транспорти-ки туда они должны выкатываться под боль-й портальный кран гэс или иметь вдоль своего онта специальный путь. При весе трансформа-а, равном 300 ... 350 *т*, целесообразно приме-ть для их транспорта поворотные катки вместо нсформаторных тележек.

Комплектные распределительные устройства ераторного напряжения с воздушными выклю-лями, релейная защита генераторов, панели матики и местный пост управления разме-ются в непосредственной близости от агрега-на отметке главного прохода гэс. Таким раз-щением создаются наиболее благоприятные вия для эксплуатации оборудования, его на-ки испытаний и ремонтов.

Общестанционный пост управления, как пока-л опыт эксплуатации автоматических гэс, це-сообразно размещать поблизости от гидроагре-

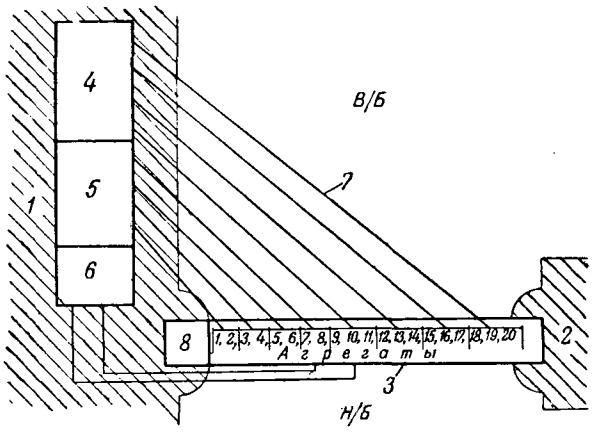


Рис. 16.

1 — берег реки; *2* — плотина; *3* — здание гэс; *4* — открытое распредустройство 400 *кв*; *5* — открытое распредустройство 220 *кв*; *6* — открытое распредустройство 110 *кв*; *7* — выводы; *8* — монтажная площадка.

татов, а при большом их числе — посредине гидроэлектростанции.

Аккумуляторные батареи, зарядные устройства, устройства связи располагаются вблизи общестанционного поста управления.

При большой длине гэс и большом числе линий электропередачи, расходящихся от гэс на оба берега реки, одним из серьезных вопросов является размещение открытых распределительных устройств повышенного напряжения и осуществление их соединения с повышающими трансформаторами.

Соединение трансформаторов с открытыми распределительными устройствами выполняется голыми проводами, подвешенными на гирляндах изоляторов. При большой протяженности гэс длина проводов, перекинутых с гэс на берег реки, где расположены открытые распределительные устройства, достигает 0,9 ... 1 *км*. Такие пролеты требуют больших расстояний между проводами и, следовательно, больших участков фронта гэс для их подвески. Высота мачт над уровнем воды достигает 80 ... 100 *м*. Вследствие этого более крупные блоки, занимающие большие участки по фронту гэс, размещают дальше от берега, а менее крупные — ближе (рис. 16).

Опоры можно снизить, расположив выводы со стороны нижнего бьефа. Однако это не всегда можно сделать по условиям компоновки гидроузла в целом. Пролет может быть уменьшен на 10 ... 15%, если выводы будут расходиться в обе стороны от гэс, как это показано на рис. 17, 18 и 19. В отдельных случаях некоторое количество выводов может быть расположено вдоль здания гэс. Опоры при этом устанавливаются на бетонных и земляных сооружениях. Таким образом, удается избежать косых выводов с большими пролетами.

Как правило, линии электропередачи 400 *кв* идут от гэс по одному берегу. Линии других напряжений при значительном их числе в большинстве случаев отходят на оба берега. При одностороннем относительно гэс расположении открытых распределительных устройств это обстоятельство усложняет переброску линий с одного берега на другой. Число переходов через реку можно

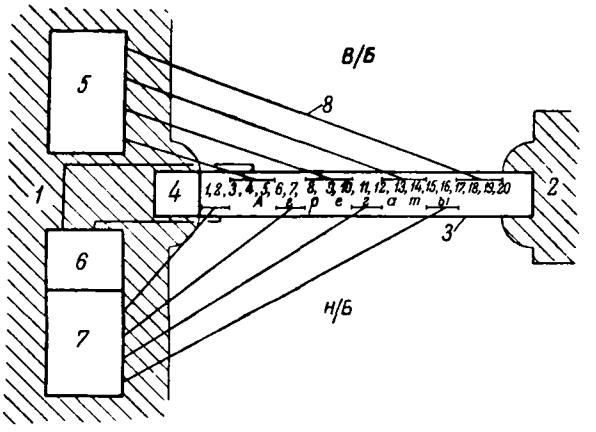


Рис. 17.

1 — берег реки; *2* — плотина; *3*— здание гэс; *4* — монтажная площадка; *5* — открытое распредустройство 400 *кв*; *6* — открытое распредустройство 110 *кв*; *7* — открытое распредустройство 220 *кв*.

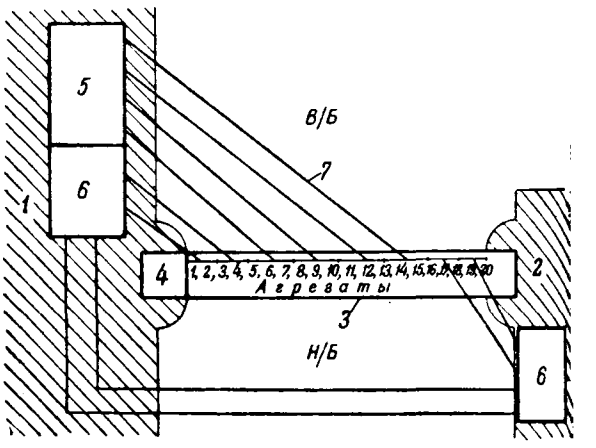


Рис. 19.

1 — берег реки; *2* — плотина; *3*— здание гэс; *4* — монтажная площад *5* — открытое распредустройство 400 *кв*; *6* — открытое распредуст ство 220 *кв*; *7* — выводы.

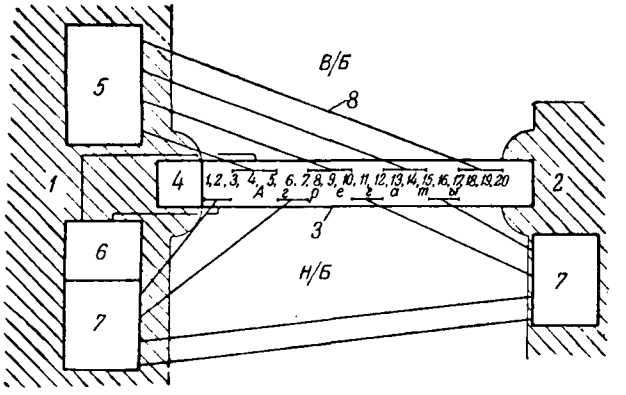


Рис. 18.

1 — берег реки; *2* — плотина; *3*— здание гэс; *4* — монтажная площадка; *5* — открытое распредустройство 400 *кв*; *6* — открытое распредустройство 110 *кв*; *7* — открытое распредустройство 220 *кв*; *8* — выводы.

уменьшить, разместив открытые распредустройства по обе стороны от гэс (рис. 18 и 19). Число перекидок при этом сократится до одной-двух, которые, по существу, явятся продолжением сборных шин. Одновременно уменьшится длина пролета выводов (рис. 19). Некоторая удаленность открытых распредустройств от гэс при наличии средств телемеханики не приведет к каким-либо затруднениям в отношении их эксплуатации. Тем более, что применение воздушных выключателей на всех напряжениях не требует для обслуживания открытых распредустройств сложного вспомогательного оборудования.

При размещении электротехнических устройств серьезное значение имеет положение в блоке гэс железнодорожного и шоссейного переходов. Если повышающие трансформаторы установлены со стороны нижнего бьефа, то эти переходы располагаются со стороны верхнего бьефа с предельно возможным удалением их от первых. Такое расположение переходов обеспечивает надежную и безопасную эксплуатацию. Кроме того, оно дает наиболее правильную общую планировку гидроузла.

Компрессорное хозяйство каждого открыто распредустройства находится на его территори там же размещены местные посты управлен и панели релейной защиты линии электропер дачи.

Следует указать на большую зависимос размещения электрических устройств от местны условий гидроузла. Это не позволяет дать гот вые рецепты, годные для всех случаев. Можн лишь наметить пути преодоления тех трудносте которые возникают при решении вопросов, св занных с этим размещением.

В конструктивном отношении открытые ра предустройства выполняются с двухрядным ра мещением выключателей и внешним по отноше нию к ним расположением сборных шин (рис. 20)

Архитектура гидроузла. С возникновение гидроузла коренным образом меняется внешни облик района. Его сооружения хорошо обозре ваются. Через них проходят транспортные арте рии — железная и шоссейная дороги, судоходны шлюз. Массы населения имеют широкий досту к сооружениям.

В нашей стране каждый мощный гидроузел воздвигается по инициативе и под руководство товарища Сталина.

Архитектура новых гидроузлов — сооружени Великой Сталинской эпохи коммунистическог преобразования нашей Родины — является в выс шей степени ответственным делом.

Сложность архитектурного решения гидро электростанции заключается в том, что ее со оружения и оборудование тесно связаны с техно логическим процессом производства электроэнер гии. Однако совместная творческая работа гид ротехников, электриков и архитекторов позволяе найти красивый и выразительный архитектурны образ гэс. При этом нисколько не ухудшаются условия эксплуатации сооружений и оборудова ния. Гидромеханическое и электротехническое оборудование, а также все вспомогательны устройства включаются как составные элементы в общий архитектурный ансамбль.

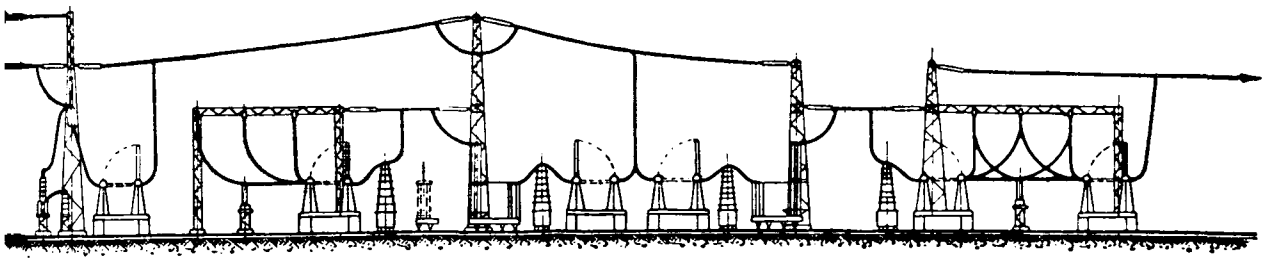


Рис. 20. Разрез по цепям отходящей линии электропередачи и повышающего трансформатора.

Заключение. Размеры журнальной статьи позволили осветить в общей форме далеко не все основные вопросы, связанные с сооружением гидроэлектростанции большой мощности на равнинной реке. Остались неосвещенными такие важные вопросы, как гидрология, водохозяйственные расчеты, энергетические расчеты, затопление, связанное с образованием чаши водохранилища и т. п., которые затрагивают коренные вопросы народного хозяйства страны. Однако сказанного в настоящей статье достаточно, чтобы у читателя создалось представление о том, каким важным сооружением и предприятием в системе социалистического народного хозяйства является современная гидроэлектростанция.

Советский народ всегда придавал большое значение своим гидроэнергетическим стройкам, с большим вниманием следил за их ходом, оказывал им всемерную помощь. Огромное значение, которое народ придает им в настоящее время, проявилось в том, что он назвал их великими сталинскими стройками коммунизма. В этом названии заключен глубочайший смысл.

Современную мощную советскую гидроэлектростанцию можно с полным основанием считать прообразом предприятия грядущего коммунистического общества. Характерной ее особенностью является высокая степень механизации и автоматизации производственных процессов. Каждая такая гидроэлектростанция при минимальной затрате человеческого труда дает огромное количество электроэнергии. На современной гидроэлектростанции в значительной степени стерта грань между трудом инженера и трудом рабочего.

Мощные гидроэлектростанции, сооружаемые на Волге и других реках, окажут огромное преобразующее влияние на промышленность, сельское хозяйство, транспорт и быт тех районов нашей Родины, куда будет направлена выработанная ими электроэнергия. В этом отношении трудно переоценить ту роль, которую сыграют эти и другие гидроэлектростанции в осуществлении грандиозной программы создания материально-технической базы коммунизма, начертанной товарищем Сталиным в его речи перед избирателями 9 февраля 1946 г.

[24. 10. 1951]

◇ ◇ ◇

О предельной компенсации параметров электропередачи

Кандидат техн. наук Г. Е. ПОСПЕЛОВ

Средне-Азиатский политехнический институт

Рассматриваются характеристики электропередачи, у которой полностью компенсированы индуктивность и емкость (вполне компенсированная электропередача). Устанавливается целесообразная степень компенсации индуктивности и емкости электропередачи.

Исследования, проведенные советскими учеными [Л. 1, 2 и 3], показали, что наиболее эффективным средством увеличения расстояния, на которое может передаваться энергия переменным током, является компенсация параметров электропередачи посредством индуктивных и емкостных компенсирующих элементов. В настоящей статье делается попытка выяснить предельные возможности компенсации параметров электропередачи с точки зрения увеличения передаваемой мощности.

В пределе индуктивное сопротивление и емкостная проводимость электропередачи могут быть полностью компенсированы. Такую электропередачу назовем вполне компенсированной.

При достаточно малой или компенсированной емкостной проводимости линии мощность, отдаваемая генераторами передающей станции,

$$P_1 = \frac{E^2}{z}\sin\alpha + \frac{EU}{z}\sin(\theta - \alpha), \qquad (1)$$

где E — э. д. с. генератора передающей станции;

U — напряжение на шинах приемника;

z — индуктивно-активное сопротивление системы электропередачи;

$$\alpha = 90° - \psi,$$

ψ — фазный угол сопротивления.

Для вполне компенсированной системы электропередачи $z = r$, $\alpha = 90°$,

$$P_1 = \frac{E^2}{r} - \frac{EU}{r}\cos\theta \qquad (2)$$

и синхронизирующий момент

$$S = \frac{dP_1}{d\theta} = \frac{EU}{r}\sin\theta, \qquad (3)$$

где r — активное сопротивление системы электропередачи.

Для устойчивости параллельной работы необходимо, чтобы

$$\sin\theta > 0. \qquad (4)$$

Мощность на приемном конце вполне компенсированной электропередачи

$$P_2 = \frac{EU}{r}\cos\theta - \frac{U^2}{r}. \qquad (5)$$

Согласно условию граничными точками, оп деляющими зону устой вой работы, являются θ и $\theta = 180°$. При $\theta = 90$

$$P_1 = \frac{E^2}{r}, \qquad P_2 = -\frac{U^2}{r},$$

а синхронизирующий момент имеет наибольш значение. Но режим электропередачи получае при этом неудовлетворительным, так как эн гия, отдаваемая передающей станцией и при ной системой, полностью поглощается в акти сопротивлении системы электропередачи.

На рис. 1 представлены кривые зависимост P_1, P_2 и η (к. п. д.) от угла θ между э. д. с. и напряжением U. Величины U, E, P_1 и P_2 даны относительных единицах. При построении крив было принято: $U = 1$, $r = 0{,}1$. Пунктиром изобр жены кривые для случая $E = 1{,}05$, а сплошны линиями — для случая $E = 1{,}20$.

Рассмотрение рис. 1 показывает, что вполн компенсированная электропередача не може найти практического применения ввиду неудов летворительности своих характеристик. Напр мер, при наибольшем значении к. п. д. $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U}{I}$, который может быть определен из соо ношений

$$P_1 = \frac{E^2}{r} - \frac{EU}{r} = EI$$

и

$$P_2 = \frac{EU}{r} - \frac{U^2}{r} = UI,$$

синхронизирующий момент равен нулю, т. е условие устойчивости параллельной работы не соблюдается.

Возникает вопрос, как далеко следует итти в применении компенсации параметров электропередачи. Прежде всего рассмотрим этот вопрос в отношении последовательной компенсации. Мерой последовательной компенсации служит степень компенсации k_C, определяемая как отношение включенного последовательно в линию емкостного сопротивления к индуктивному сопротивлению линии $x_л$.

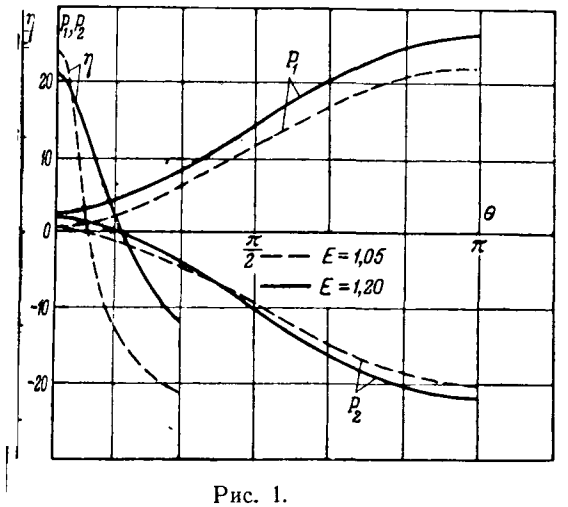


Рис. 1.

Допустим, что емкость линии скомпенсирована индуктивными элементами, а передающие генераторы—неявнополюсные. Тогда мощность, передаваемая приемнику,

$$P=\frac{EU}{z}\sin(\theta+\alpha)-\frac{U^2}{z}\sin\alpha.$$

предельное значение передаваемой мощности

$$P_м=\frac{EU}{z}-\frac{U}{z}\sin\alpha$$

или

$$P_м=\frac{EU}{\sqrt{r^2+x^2}}-\frac{U^2r}{r^2+x^2}. \qquad (6)$$

Реактивное сопротивление системы электропередачи x зависит от степени компенсации согласно выражению

$$x=x_{ГТ}+x_л(1-k_C),$$

где $x_{ГТ}$ — индуктивное сопротивление конечных устройств.

Исследование выражения (6) показывает, что $P_м$, как функция степени компенсации k_C, имеет максимум и, следовательно, начиная с некоторого значения $k_{C\,пр}$, которое назовем предельным, передаваемая мощность будет убывать. Основываясь на выражении (6), для $k_{C\,пр}$ можно получить (приложение):

$$k_{C\,пр}=\frac{x_и}{x_л}-\frac{r}{x_л}\sqrt{\frac{3+4m}{1+4m}}, \qquad (7)$$

где $x_и$ и r — суммарные индуктивное и активное сопротивления системы электропередачи;

$x_л$ — индуктивное сопротивление линии электропередачи;

m — перепад напряжений в системе электропередачи в долях от U.

При $m=0{,}1$

$$k_{C\,пр}=\frac{x_и}{x_л}-1{,}56\frac{r}{x_л}. \qquad (7')$$

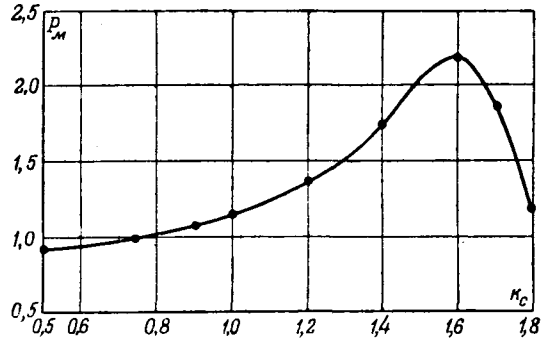


Рис. 2.

При $x_л=1$, $r=0{,}1$ и $x_и=2{,}2$, что соответствует синхронному индуктивному сопротивлению генератора, получим:

$$k_{C\,пр}=2{,}04.$$

Учитывая генератор переходным индуктивным сопротивлением, что примерно соответствует наличию компаундирования и электронного регулятора напряжения, примем $x_и=1{,}56$, тогда

$$k_{C\,пр}=1{,}4.$$

На основании выражения (6) была построена кривая $P_м=\varphi(k_C)$, изображенная на рис. 2. При этом генератор учитывался синхронным индуктивным сопротивлением. Предельная мощность $P_м$ (рис. 2) и принятые сопротивления системы электропередачи (рис. 3) даны в относительных единицах: $P_{баз}=280$ *мгвт*; $U_{баз}=220$ *кв*. Для электропередачи (рис. 3), по кривой (рис. 2) определим $k_{C\,пр}=1{,}6$. Такое же значение $k_{C\,пр}$ дает и формула (7').

Из формул (7) и (7'), а также из приведенных примеров следует, что $k_{C\,пр}$ больше единицы. Степень же последовательной компенсации, необходимая для электропередачи на большое расстояние, как показали исследования [Л. 4], меньше единицы. Таким образом, с точки зрения предельной мощности имеется широкий диапазон значений k_C, достаточный для электропередачи на большие расстояния.

Явление самораскачивания синхронных машин не ограничит указанной предельной степени компенсации. Согласно опытам [Л. 5] возможность самораскачивания может быть устранена при помощи демпферной обмотки. Кроме того, как было показано в [Л. 6], для машины, не имеющей демпферных контуров, основным условием самораскачивания является соотношение

$$\operatorname{tg}\theta_0<\operatorname{ctg}\varphi=\frac{r}{x}, \qquad (8)$$

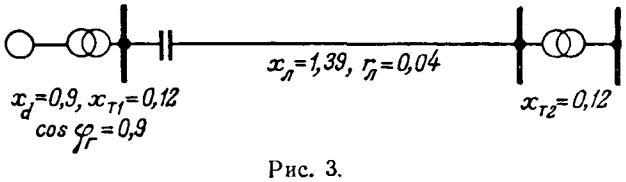


Рис. 3.

где θ_0 — угловой сдвиг между э. д. с. генератора и напряжением шин постоянной частоты и постоянного напряжения, на которые работает генератор через индуктивно-активное сопротивление $z \cdot e^{j\varphi}$, r и x — активная и индуктивная составляющие полного сопротивления цепи статора.

Очевидно, условие (8) не будет выполняться даже для указанной выше предельной степени компенсации, т. е. явления самораскачивания при последовательной компенсации и значительных нагрузках ожидать не следует.

Выясним также, какие возможности представляет для электропередачи на большие расстояния параллельная компенсация и прежде всего каково ее влияние на свойства самой линии электропередачи.

Если параллельно включенные индуктивные элементы распределены равномерно вдоль линии электропередачи и уменьшают ее емкость в k раз, то волновое сопротивление линии

$$w = \sqrt{\frac{Lk}{C}}$$

увеличится в $\sqrt{k}$ раз, а волновая длина линии

$$\lambda = \omega l \sqrt{\frac{LC}{k}}$$

уменьшится в $\sqrt{k}$ раз. Из этого следует, что натуральная мощность

$$P_н = \frac{U^2}{w}$$

уменьшится в $\sqrt{k}$ раз, а эквивалентное сопротивление линии $x_л = \sin\lambda$ в относительных единицах ($z_{баз} = w$) уменьшится меньше, чем в $\sqrt{k}$ раз.

Таким образом, параллельная компенсация несколько понижает пропускную способность линии. Но в целом на электропередачу индуктивная параллельная компенсация оказывает благоприятное действие. Параллельно включенная индуктивность, компенсируя зарядный ток линии, увеличивает э. д. с. генератора и повышает этим устойчивость параллельной работы. В этом заключается главная положительная роль реактора, включенного в начале линии электропередачи.

Приняв П-образную схему замещения линии электропередачи, предположим, что емкостная проводимость приемного конца линии полностью используется для повышения коэффициента мощности приемной энергосистемы. Обозначив через b_L индуктивную проводимость включенного в начале линии реактора и b_C емкостную проводимость передающего конца линии, назовем отношение

$$k_L = \frac{b_L}{b_C}$$

степенью параллельной компенсации.

В случае принятой нами схемы замещения линии электропередачи емкостная проводимость последней в относительных единицах

$$b_C = \operatorname{tg}\frac{\lambda}{2}$$

или

$$b_C \approx 0{,}001\frac{l}{2}.$$

Погрешность при определении b_C по формуле (9) составит: для $l \leqslant 300$ км не более 5,3%, для $l \leqslant 600$ км — 7,7% и для $l \leqslant 1000$ км 13,3%.

Пренебрегая активным сопротивлением электропередачи, которое в данном случае несущественно, передаваемую мощность можно выразить:

$$P = \frac{EU}{x_э}\sin\theta. \quad (\text{I})$$

Эквивалентное сопротивление электропередачи получим путем преобразования звезды в треугольник:

$$x_э = x_Г + x_л + x_{T2} + x_Г x_л b_C (k_L - 1) + \\ + x_Г x_{T2} b_C (k_L - 1),$$

где $x_Г$ — индуктивное сопротивление генератора и повышающего трансформатора;
x_{T2} — индуктивное сопротивление понижающего трансформатора.

Электродвижущая сила E может быть определена из векторной диаграммы рис. 4, согласно которой можно написать:

$$E\cos\theta = U + U_1 b_C (k_L - 1)\, x_Г \cos\varphi_1$$

или

$$E = \frac{U[1 + b_C x_Г (k_L - 1)]}{\cos\theta}.$$

Подстановка значений $x_э$ и E в выражение (I) дает:

$$P = \frac{U^2[1 + x_Г b_C (k_L - 1)]\operatorname{tg}\theta}{x_Г + x_л + x_{T2} + x_Г x_л b_C (k_L - 1) + x_Г x_{T2} b_C (k_L -}$$

Принимая $P_{баз} = P_{нат}$, $U_{баз} = U$, $x_Г \approx \frac{1{,}12}{P}$, $x_л = \frac{0{,}12}{P}$, коэффициент запаса статической уст

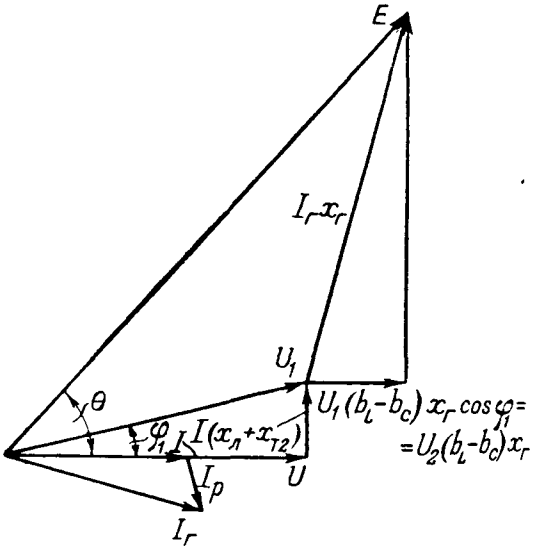


Рис. 4.

ивости $s_c=0{,}20$ и соответственно $\operatorname{tg}\theta=1{,}5$, олучим:

$$P=\frac{1{,}5+\frac{1{,}68}{P}b_C(k_L-1)}{\frac{1{,}24}{P}+x_л+\frac{1{,}12}{P}x_л b_C(k_L-1)+\frac{0{,}134}{P^2}b_C(k_L-1)}. \quad (11)$$

Решение этого уравнения относительно P дет:

$$P=\frac{-0{,}56x_л b_C(k_L-1)+0{,}13+\sqrt{[0{,}56\,x_л b_C(k_L-1)-0{,}13]^2+1{,}55\,x_л\,b_C(k_L-1)}}{x_л}. \quad (12)$$

сследование выражения (12) показывает, что P ляется возрастающей функцией k_L. Следовательно, можно было бы, используя реактор хтаточной мощности, передать любую мощность на любое расстояние, если бы не было ких-либо других ограничений.

В качестве фактора, определяющего наибольшую допустимую степень параллельной мпенсации, можно считать допустимое значение отстающего коэффициента мощности редающей станции. Тогда наибольшее допустимое значение k_L определится из уравнения

$$b_C(k_{L\,пр}-1)+P^2(x_л+x_{T2})=P\operatorname{tg}\varphi_Г;$$

$$k_{L\,пр}=\frac{P\operatorname{tg}\varphi_Г-P^2(x_л+x_{T2})+b_C}{b_C}.$$

ли принять:

$$\cos\varphi_Г=0{,}85;\quad x_{T2}=\frac{0{,}12}{P},$$

$$k_{L\,пр}=\frac{0{,}5\,P-P^2x_л+b_C}{b_C}. \quad (13)$$

Подставляя значение

$$k_{L\,пр}-1=\frac{0{,}5-P^2x_л}{b_C}$$

выражение (11), получим уравнение

$$P=\frac{1{,}5+1{,}68\,(0{,}5-Px_л)}{\frac{1{,}24}{P}+x_л+1{,}12x_л(0{,}5-Px_л)+\frac{0{,}134}{P}(0{,}5-Px_л)}$$

и

$$1{,}12x_л^2P^2-3{,}11x_л P+1{,}03=0, \quad (14)$$

которого можно определить наибольшую щность электропередачи с параллельной комсацией. Решая уравнения (14), получим:

$$P=\frac{0{.}38}{\sin\lambda}. \quad (15)$$

Второй корень уравнения (14) дает отрицательное значение $k_{L\,пр}$ и не соответствует рассматриваемому случаю параллельной компенсации.

Аналогично при $\cos\varphi_Г=0{,}8$ получим:

$$k_{L\,пр}=\frac{0{,}628\,P-P^2\sin\lambda+\operatorname{tg}\frac{\lambda}{2}}{\operatorname{tg}\frac{\lambda}{2}},$$

$$k_{L\,пр}-1=\frac{0{,}628\,P-P^2\sin\lambda}{\operatorname{tg}\frac{\lambda}{2}}$$

и уравнение, определяющее наибольшую передаваемую мощность,

$$1{,}12x_л^2P^2-3{,}25\,x_л P+1{,}23=0.$$

Решая уравнение, получим:

$$P=\frac{0{,}446}{\sin\lambda}. \quad (16)$$

Из выражений (15) и (16) следует, что электропередача с параллельной компенсацией позволяет передать натуральную мощность: 1) при $\cos\varphi_Г=0{,}85$ на расстояние 370 *км*; 2) при $\cos\varphi_Г=0{,}80$ на расстояние 440 *км*. При этом в обоих случаях степень компенсации $k_{L\,пр}=1{,}77$, а мощность реактора соответственно 0,328 и 0,417.

Из изложенного следует, что параллельная компенсация имеет ограниченное значение; наибольшую мощность, которую она позволяет передать на заданное расстояние l, можно определить по формулам (15) и (16).

При $x_Г$ и x_{T2}, отличных от принятых, в формулах (15) и (16) вместо 0,38 и 0,446 будут другие коэффициенты, которые легко определить описанным выше способом.

Ввиду ограниченности параллельной компенсации, начиная с некоторых значений передаваемой мощности и длины линии электропередачи, определяемых из уравнения (14), следует применять последовательную компенсацию.

Принимая коэффициент мощности передающей станции равным 0,85, определим целесообразную степень параллельной и последовательной компенсаций. При наличии последовательной компенсации уравнение (14) перепишется следующим образом:

$$1{,}12\,P^2(1-k_C)^2\sin^2\lambda-3{,}11\,P(1-k_C)\sin\lambda+1{,}03=0, \quad (14')$$

где P — мощность, передаваемая по одной цепи линии электропередачи.

Решая уравнение (14'), получим:

$$k_C=1-\frac{0{,}38}{P\sin\lambda}. \quad (17)$$

Соответствующая степень параллельной компенсации может быть определена на основе уравнения (13), которое в данном случае будет иметь следующий вид:

$$k_{L\,пр}=\frac{0{,}5P-P^2(1-k_C)\sin\lambda+\operatorname{tg}\frac{\lambda}{2}}{\operatorname{tg}\frac{\lambda}{2}}. \quad (18)$$

Из уравнений (17) и (18) находим:

$$k_{L\,пр}=1+\frac{0{,}12P}{\operatorname{tg}\frac{\lambda}{2}}. \quad (19)$$

Таким образом, передачу заданной мощности на некоторое расстояние $l=\frac{\arcsin\lambda}{0{,}06}$ можно осуществить при одновременном применении обоих видов компенсации (последовательной и параллельной) согласно уравнениям (17) и (19).

Выводы. 1. Вполне компенсированная электропередача не может быть принята для практического применения вследствие неудовлетворительности ее характеристик.

2. Предельная степень последовательной компенсации ($k_{C\,пр}$) по предельной мощности электропередачи больше единицы и может быть подсчитана по формуле (7). Для мощных линий электропередачи большой протяженности не потребуется такой степени компенсации.

В заключение автор считает своим долгом отметить, что при выполнении настоящей работы он пользовался весьма ценными указаниями Н. Н. Щедрина.

Приложение. *Вывод формул предельной степени компенсации.*

Введем вспомогательную переменную

$$\chi=\frac{x}{r},$$

тогда

$$\frac{x^2}{r^2}=1-\chi^2 \quad (I,1)$$

При коэффициенте мощности на конце линии, равном единице, векторная диаграмма электропередачи, у которой емкость линии скомпенсирована, имеет вид, показанный на рис. 5. На основании векторной диаграммы

$$E^2=(m+1)^2U^2+m^2U^2\chi^2, \quad (I,2)$$

где $m=\frac{\Delta U_a}{U}$ — коэффициент, характеризующий перепад напряжений в электропередаче.

Из выражений (I,1) и (I,2) получим:

$$E=U\sqrt{1+2m+\frac{m^2}{r^2}x^2}. \quad (I,3)$$

Подставляя значение E из (I,3) в выражение мощности

$$P_м=EUy-U^2ry,$$

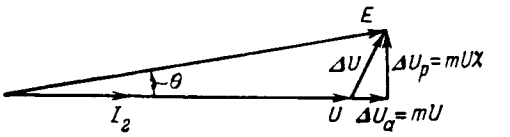


Рис. 5.

получим:

$$P_м=U^2\sqrt{y^2(1+2m)+\left(\frac{m}{r}\right)^2}-U^2ry,$$

где

$$y=\frac{1}{x}.$$

Дифференцируя $P_м$ по y и приравнивая производ нулю, найдем уравнение, определяющее значение k_C

$$\frac{(1+2m)\,yU^2}{\sqrt{y^2(1+2m)+\left(\frac{m}{r}\right)^2}}-2U^2ry=0$$

или

$$4(1+2m)\,r^2y^2=1+4m,$$

откуда

$$1+\chi^2=\frac{4(1+2m)}{1+4m}.$$

Значение χ, соответствующее $k_{C\,пр}$,

$$\chi=\sqrt{\frac{3+4m}{1+4m}}.$$

Если $x_и$ и r — суммарные индуктивное и актив сопротивления системы электропередачи, а $x_л$ — индукт ное сопротивление линии, то

$$k_{C\,пр}=\frac{x_и}{x_л}-\frac{r}{x_л}\sqrt{\frac{3+4m}{1+4m}}.$$

Литература

1. А. А. Вульф. Проблема сверхдальней переда электроэнергии по линии без ответвлений. Докторск диссертация. ЛИИ, 1938.

2. И. С. Брук. Продольная компенсация линий эл ктропередачи. Докторская диссертация. Академия на СССР, 1936.

3. Л. В. Цукерник. Сериесная компенсация реа тивности мощных электропередач. Кандидатская ди сертация. Сборник научно-технических статей ХЭП вып. III, 1937.

4. Г. Е. Поспелов. Основные технические и эк номические вопросы применения последовательной ст тической компенсации в системах передачи энергии дальние расстояния. Кандидатская диссертация. ЭНИ Академии наук УзССР, 1950.

5. R. B. Bodine, C. Concordia, G. Cron. Se Excited Oscillations of Capacitor-Compensated Lon Distance Transmission Systems. Tr. AJEE, vol. 62, p. 43– 1943.

6. Н. Н. Щедрин. Простейшее истолкование явл ния параметрического самораскачивания синхронной м шины, соединенной с шинами постоянного напряжен и постоянной частоты. Труды ЛПИ им. Калинина, № 1948.

[15. 6. 19

◇ ◇ ◇

Магистральные системы распределения энергии в промышленных сетях низкого напряжения

Инж. Д. С. ЛИВШИЦ

Московское проектно-конструкторское управление Центроэлектромонтажа МСПТИ

Описаны конструкции цеховых сетей, не требующие переделок («универсальные» сети) или требующие незначительных переделок («гибкие» сети) при перепланировках технологического оборудования. Для сравнения приведены технико-экономические показатели этих сетей и сетей, выполненных по радиальной схеме. Рассмотрены наиболее актуальные вопросы, возникающие при проектировании «гибких» и «универсальных» сетей.

Еще в довоенные го- выявился ряд суще- ых недостатков ра- льных систем распре- ения электроэнергии кого напряжения на мышленных пред- иятиях. Особенно ярко недостатки проявились на машиностроитель- х заводах.

Изменение типов выпускаемых изделий, тех- логии производства и связанные с этим пере- анировки станочного оборудования приводили му, что радиальные кабельные сети на ма- ностроительных заводах изнашивались во раз быстрее, чем на других предприятиях. проведении перепланировок, осуществляе- как правило, без остановки производства, ые линии иногда просто обрезались и остав- сь в каналах, а взамен их прокладывались В результате каналы настолько загро- дались, что нормальная эксплуатация кабе- становилась невозможной, а демонтаж и пе- борудование сети применительно к новым ировкам крайне затруднялись.

В поисках способов устранения этих недостат- Ф. Я. Гольдберг разработал известную си- распределения энергии с помощью «шин- сборок», применение которой позволило одить каналы от значительного числа тон- кабелей распределительной сети, подводя- энергию от шкафов с предохранителями к ам. В каналах оставались лишь радиальные и питающей сети, подводящие энергию от ов подстанций к распределительным пунк- и от пунктов к шинным сборкам. При изме- ии планировки оборудования шинные сбор- относительно легко переставлялись на но- место и заменялись лишь питающие их ка- ь.

Однако и эта система — радиальных линий, ающих мелкие, переносные распределитель- магистрали («шинные сборки»), — обладает ми технических и экономических недостатков. более существенными из них являются сле- ие: порча шинных сборок при перестанов- трудность демонтажа и присоединения к кам новых потребителей без перерыва в ра- всей линии, значительные отходы демонти- ых кабелей, загромождение кабельных ка- в и ухудшение использования производ- ственной площади и планировки оборудования из- за наличия этих каналов.

Еще в предвоенные годы проектные организации Главэлектромонтажа Минтяжстроя [Л. 1] начали внедрять так называемые «универсальные» или «гибкие» системы распределения энергии. Основой этих систем являются более или менее мощные магистрали из шин или толстых проводников, прокладываемых на уровне ферм вдоль всех пролетов цеха и служащие всегда готовой базой питания потребителей.

Надобность в радиальных кабельных линиях и каналах при таких системах распределения вовсе отпадает. Также отпадает в большинстве случаев надобность в распределительных щитах на подстанциях, так как питание магистралей может осуществляться по схемам блоков трансформатор — магистраль. Сами установки и их эксплуатация максимально упрощаются. Монтажные работы легко индустриализируются и потому выполняются в минимально короткие сроки. Переделки сети при перепланировках оборудования сводятся к минимуму. Надежность и бесперебойность электроснабжения повышаются.

Применение «универсальных» и «гибких» сетей, выполненных из толстых проводников, имеющих значительный запас пропускной способности, не только не приводит к росту начальных затрат цветных металлов, но и дает экономию их. Значительные затраты средств, потери рабочей силы, цветных металлов и других материалов, неизбежные при частых переделках радиальных сетей, полностью исключаются при «универсальных» и «гибких» сетях, что также дает значительную экономию и существенно улучшает технические и экономические показатели сетей промышленных предприятий.

В послевоенные годы проектные организации разных министерств стали настойчиво уточнять детали целесообразных конструкций магистральных систем и систематически внедрять их в практику. Ввиду хороших технико-экономических показателей эти системы рекомендовались вместо радиальных не только для цехов с часто перемещаемым оборудованием, а для всех случаев, где особые условия среды и эксплуатации не препятствуют их применению.

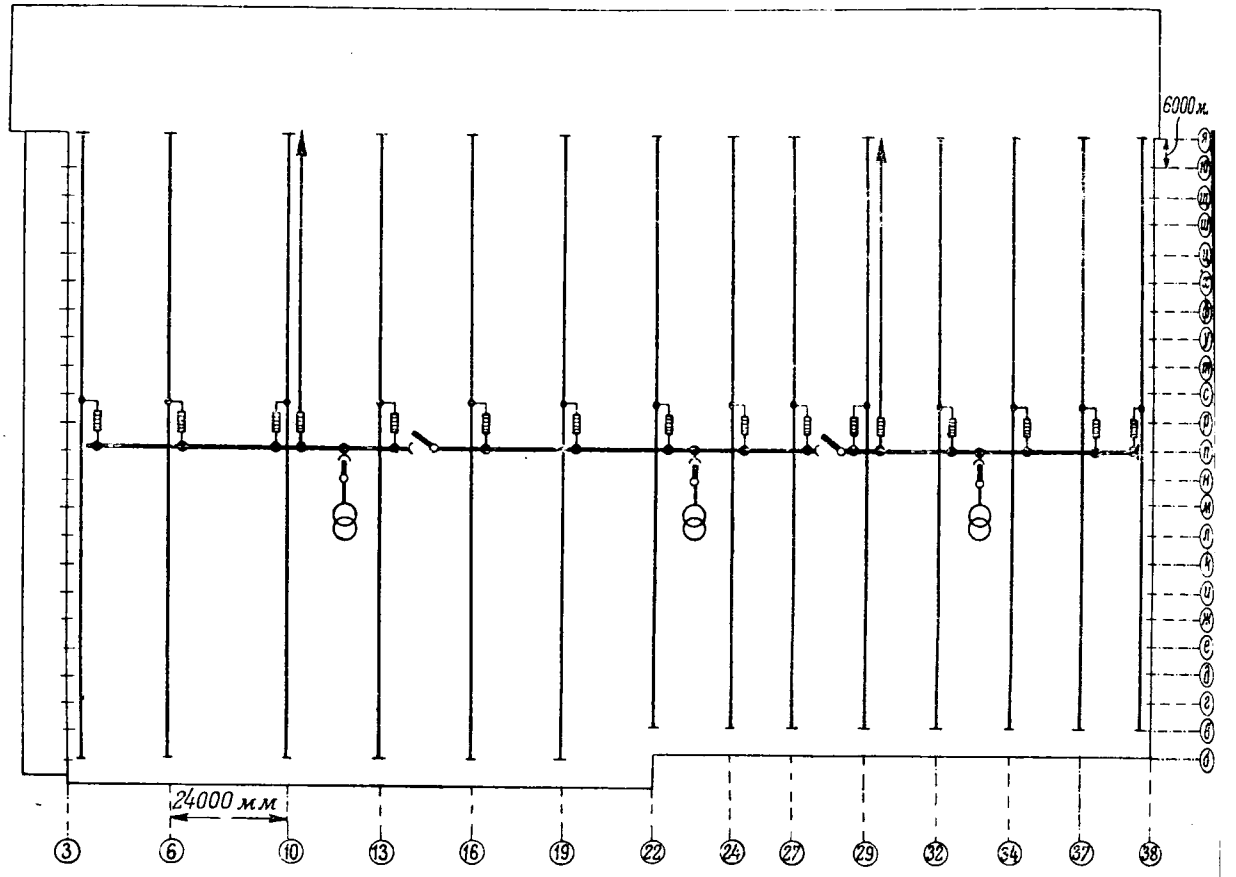


Рис. 1. Схема осуществленной сети механосборочного цеха паровозостроительного завода.

На рис. 1 приведена принципиальная схема осуществленного варианта «гибкой» электросети механосборочного корпуса паровозостроительного завода. Каждый из трех трансформаторов мощностью 750 *ква*, расположенных в центре нагрузок, присоединен через разъединитель непосредственно к одной из трех секций главной магистрали в виде голых шин, проложенных вдоль всего цеха на изоляторах, выше нижнего пояса ферм. Нормально трансформаторы работают раздельно. При малых нагрузках имеется возможность замкнуть секционные разъединители и питать всю главную магистраль от одного трансформатора. Таким же путем можно осуществить питание части сети в случае выхода из строя одного из трансформаторов.

Ввиду наличия кранов в каждом пролете цеха распределительные магистрали проложены также выше нижнего пояса ферм, по перпендикулярно главной магистрали (рис. 2); их присоединение к последней осуществлено через коммутационный и защитный аппарат.

Краны препятствуют осуществлению питания часто перемещаемых потребителей непосредственно от распределительных магистралей при помощи спусков сверху. Следовательно, необходимости в частом соприкосновении обслуживающего персонала с этими магистралями не предвидится. Поэтому они выполнены из голых проводов, в виде воздушных линий на изолятор установленных на нижних поясах ферм.

В нужных местах на полу у колонн устан ливаются распределительные пункты. Их пи ние осуществляется при помощи спущенных колоннам ответвлений от распределительных гистралей, выполненных изолированными про дами в газовых трубах. На вводе в кажд пункт устанавливается коммутационный и щитный аппарат.

Связь между распределительными пунктам потребителями осуществлена радиальными ниями, выполненными обычно из изолирован

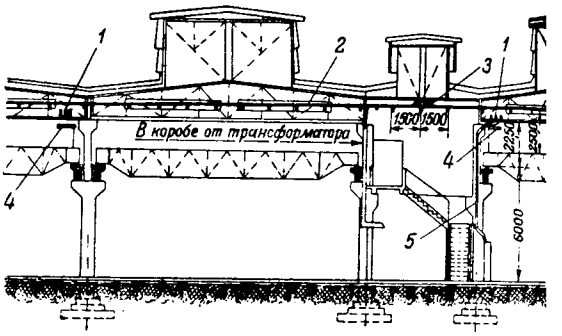


Рис. 2. Расположение голых магистралей в пролета с кранами.

1 — распределительная магистраль: *2* — главная магистраль; *3* — ный компенсатор; *4* — козырек со съемной сеткой на мосту кр *5* — ответвление к распределительному пункту.

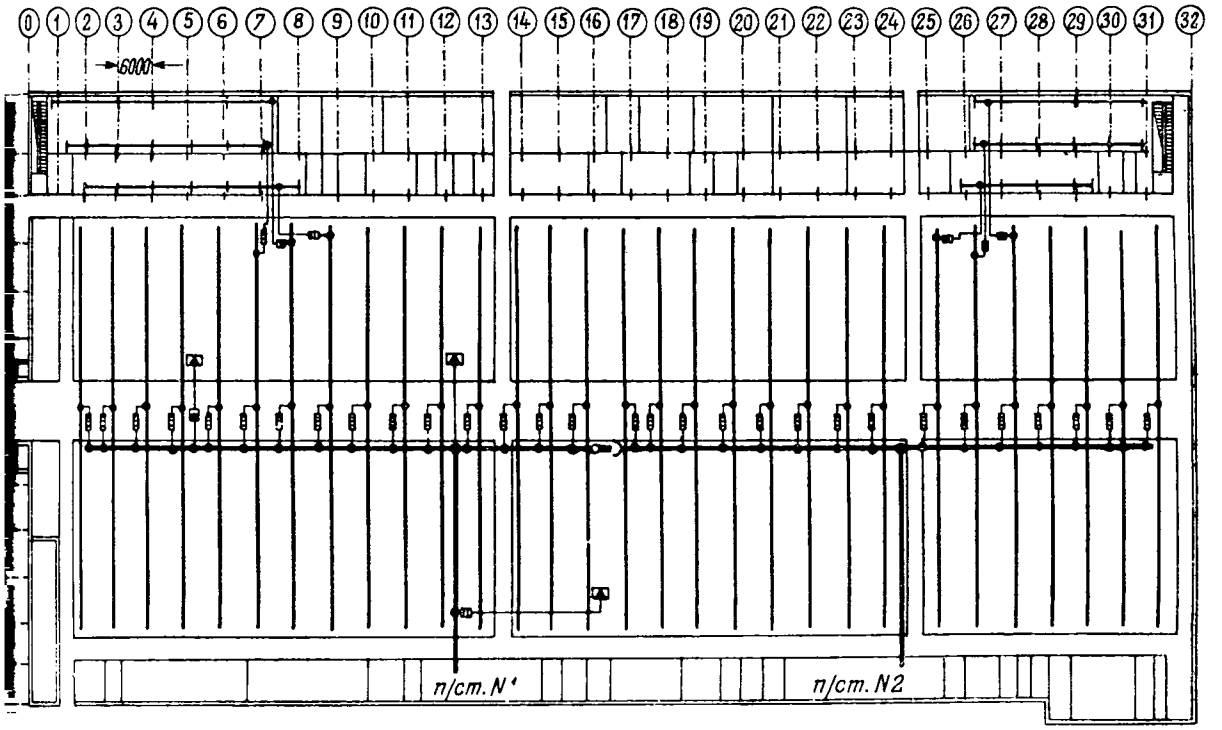


Рис. 3. Схема принятой к осуществлению сети реконструируемого механосборочного цеха автомобильного завода.

водов в газовых трубах и уложенными под ним настилом пола. Если в середине пролета параллельно рядам колонн, устанавливается один или два ряда станков небольшой мощности, для их питания устанавливается линия шинопроводов сборок, которая присоединяется к ближайшему распределительному пункту.

При перепланировках оборудования распределительная сеть, связывающая распределительные пункты с потребителями, в нужных местах изменяется. Дополнительные распределительные пункты устанавливаются заново или переносятся со старых мест туда, где они нужны. Соответственно же магистрали никаких переделок не требуют, так как они рассчитаны на любую нагрузку, могущую возникнуть при любом расположении наличного в цехе оборудования.

На рис. 3 приведен принятый к осуществлению вариант «универсальной» электросети реконструируемого механосборочного цеха автомобильного завода. Главная шинная магистраль, как и в предыдущем случае, прокладывается на изоляторах, вдоль всего корпуса выше нижнего пояса ферм. В цехе имеются две мощные подстанции. В результате расчетов было признано целесообразным их использовать. Поэтому главная магистраль секционирована лишь на две части, каждая из которых питается от одной из подстанций мощным шинопроводом (2 500 *а*).

Ввиду отсутствия в цехе кранов распределительные магистрали подвешиваются перпендикулярно главной магистрали, под фермами на высоте примерно 4 *м* над полом, но не ниже уровня всех прочих коммуникаций (рис. 4). Магистрали располагаются над линиями вероятного расположения станков и выполняются в виде так называемых штепсельных шинопроводов, смонтированных в металлических коробах сборными секциями длиной по 3 *м* каждая. С двух противоположных сторон короба имеются открывающиеся окна, расположенные не напротив друг друга, а в шахматном порядке. Расстояние между окнами с одной стороны 0,7 *м*. Таким образом, ответвления можно осуществлять через каждые 0,35 *м* погонной длины шинопровода.

Ответвительная коробка представляет собой металлический ящик с плотно закрывающейся крышкой, в который вмонтированы рубильник и предохранители, или автомат, или только предохранители. Из задней стенки ящика выступают штепсельные контакты, с помощью которых от-

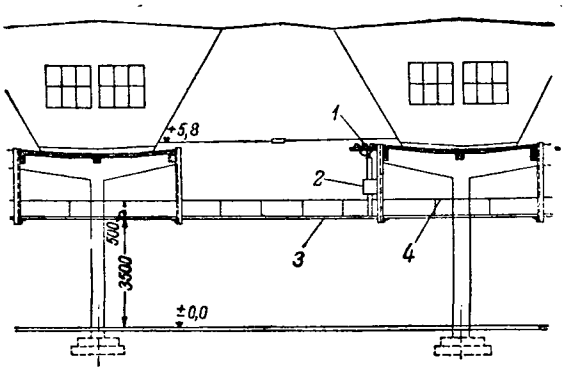


Рис. 4. Подвеска штепсельного шинопровода.
1 — главная магистраль; *2* — рубильник с предохранителями; *3* — штепсельный шинопровод; *4* — натяжной трос для промежуточных креплений шинопровода.

ветвительная коробка через окно короба присоединяется непосредственно к шинам. Если крышка ответвительной коробки открыта, рубильник или автомат выключены и коробка может безопасно присоединяться к шинам или сниматься с них под напряжением.

Гибкий шланг от коробки спускается вниз к аппарату управления и защиты потребителя. На периферийных участках цеха питание потребителей осуществляется с помощью шинных сборок.

Такие сети принято называть «универсальными», так как при перепланировках оборудования сеть не подвергается никаким переделкам. Каждый станок отсоединяется от шин с помощью своей ответвительной коробки и вместе с ней и гибким шлангом перемещается на новое место, где через ближайшее окно штепсельного шинопровода вновь присоединяется к сети.

Ответвительные коробки с предохранителями изготовляются на токи от 100 до 200 *а*. Это дает возможность при напряжении сети 380 *в* присоединять к шинопроводам короткозамкнутые асинхронные двигатели мощностью до 50 *квт*. Более мощные потребители присоединяются через соответствующие аппараты непосредственно к шинам главной магистрали.

Имеется несколько типов штепсельных шинопроводов. Один из них представляет собой серию с шинами пропускной способностью 250, 400 и 600 *а*, которые монтируются в коробах одинакового габарита. Для всех шинопроводов этого типа пригодны одни и те же ответвительные коробки и установлены нормальные фитинги: углы, тройники и кресты для поворота и разветвления шинопровода под прямым углом в любой плоскости. Для длинных шинопроводов и мест прохода через температурные швы имеются специальные секции с шинными компенсаторами.

В таблице приведены технико-экономические показатели сетей механосборочных цехов паровозостроительного и автомобильного заводов. Для сравнения наряду с рассмотренными вариантами сети («гибкая» и «универсальная») привед данные кабельной сети, выполненной по радиной схеме.

Технико-экономические показатели подсч ны, исходя из того, что сети сооружаются ва При подсчетах принимались во внимание л стоимости той части установки, которая не о накова для обоих вариантов.

Из этих и многочисленных других расче экономические преимущества «гибкой» и «у версальной» сетей очевидны. Они дают су ственное снижение капитальных затрат, расх цветных металлов и ежегодных эксплуатац ных расходов. И это несмотря на то, что ма страли этих сетей рассчитаны, как это будет казано ниже, с весьма большим запасом п пускной способности, исключающим необхо мость их переделок при перепланировках те логического оборудования.

Дополнительные затраты материалов и об рудования на переделки за время «нормальн жизни» радиальной сети составляют весьма зн чительную долю расходов, которая не поддает учету. Но без преувеличения можно предпо жить, что она составляет не менее 100% нача ной стоимости сети.

К экономическим преимуществам необходи добавить не поддающуюся учету мобильно «гибких» и «универсальных» сетей: их монт осуществляется в короткие сроки и заканчива ся задолго до окончания монтажа технологи ского оборудования, монтажные работы инду риализуются в максимальной степени, питан к новым или перемещенным потребителям под дится легко и, что особенно важно, без затр («универсальная» сеть) или с минимальной т тратой («гибкая сеть») новых материалов.

Благодаря этой мобильности значительно со кращается время наладки новых технологическ потоков, что дает большую экономию в виде д бавочной продукции, которая не идет ни в к кое сравнение с прочими показателями сети.

Технико-экономические показатели	Механосборочный цех паровозостроительного завода		Механосборочный цех автомобильного завода	
	Принятый вариант „гибкой" сети (рис. 1)	Вариант радиальной кабельной сети	Принятый вариант „универсальной" сети (рис. 3)	Вариант радиальной кабельной сети
Относительная стоимость оборудования подстанций с питающими их кабелями и с питающей сетью низкого напряжения, % . .	100	144,2	100	117,0
Относительные величины суммарного расхода цветных металлов в главных и распределительных магистралях, в ответвлениях от магистралей к распределительным пунктам сети низкого напряжения, в трансформаторах и в сети высокого напряжения, %	100	138,0	100	200,0
Относительная стоимость потерь энергии в сетях высокого и низкого напряжений и в трансформаторах, %	100	94,4	100	83,7
Относительные величины суммарных ежегодных эксплуатационных расходов, исчисленные из расчета: амортизация и ремонт подстанций 6%, сети 8%; отчисления на развитие народного хозяйства при норме эффективности 12%* от затрат, приведенных в первом пункте; стоимость потерь энергии 12,5 коп. за 1 *квтч*, %	100	135	100	105,5

* Начисления на расширенное воспроизводство здесь учтены в соответствии с практикой МПКУ Центроэлектромонтажа. Целесообр мость таких начислений многими оспаривается.

Требование минимальных переделок сети в ус-
виях частых перемещений технологического
орудования заставляет несколько своеобразно
шать технические вопросы, связанные с кон-
ированием сети. Наилучшие решения могут
ть найдены путем обмена опытом проектиро-
ния и эксплуатации сетей промышленных пред-
иятий.

Расчет сети производится не применительно
заданной планировке оборудования, а с учетом
можности размещения наиболее мощных по-
ебителей в любом пункте площади пола. Схе-
тически такой расчет производится следующим
разом. Выявляется участок пола с наибольшей
ельной нагрузкой ($ва/м^2$). Пропускная способ-
каждой магистрали определяется путем
ожения наибольшей удельной нагрузки на
мер площади, обслуживаемой магистралью.
щность, потребляемая стационарными потре-
телями (печами, вентиляторами и пр.), при-
ляется к этой расчетной нагрузке.

В системе Главэлектромонтажа Минтяжстроя
ствуют указания, которые регламентируют и
ощают расчет. Рассмотрение этих указаний
ходит за рамки настоящей статьи. Отметим
ь, что в результате расчета получаются та-
сечения магистралей, при которых их про-
жная способность в два и более раза больше
ученной при расчете по заданной планировке
рудования. Сети, рассчитанные таким обра-
, не нуждаются в проверке их по потере на-
жения и по экономической плотности тока.

Коммутационные аппараты главной магистра-
должны быть доступны для управления. По-
ством их главная магистраль в аварийных
чаях должна отключаться под нагрузкой.
качестве таких аппаратов при схеме блока
нсформатор — магистраль употребляются ма-
ные выключатели или разъединители мощно-
на стороне высокого напряжения, или авто-
ы на стороне низкого напряжения. В сетях,
возможно обратное питание, на стороне низ-
напряжения должен быть установлен разъ-
итель или рубильник.

Отключение магистрали под нагрузкой осуще-
яется масляным выключателем в том случае,
он установлен вблизи трансформатора. При
новке же его на коммутационном пункте и
значительной протяженности контрольных
водов дистанционного управления масляным
лючателем лучше иметь на вводе к трансфор-
ору разъединитель мощности.

Автомат на стороне низкого напряжения —
огой и капризный аппарат, а при отсутствии
мента выдержки времени и непадежный, так как
т иметь место случаи неселективного отключе-
даже при коротких замыканиях за ближайши-
предохранителями. Поэтому к автомату прибе-
т лишь в тех случаях, когда масляный вы-
ватель отнесен далеко. Защита сети от одно-
ных замыканий на землю может быть надеж-
осуществлена при помощи реле, установлен-
в цепи нуля трансформатора. Эта защита
ействует на масляный выключатель, разъеди-
ль мощности или автомат.

В качестве коммутационных и защитных ап-
паратов на ответвлениях от главной к распреде-
лительным магистралям по указанным выше при-
чинам предпочтительнее иметь рубильники с пре-
дохранителями, чем максимальные автоматы без
элемента выдержки времени. Это подтверждено
опытом эксплуатации одного из цехов автомо-
бильного завода, где вопреки проекту были уста-
новлены автоматы. К тому же современные типы
предохранителей обладают способностью ограни-
чивать ток короткого замыкания в защищаемых
цепях, что очень важно, так как конструкции
штепсельных шинопроводов по условиям динами-
ческой устойчивости допускают ток короткого
замыкания не более 15—20 *ка*.

Обычно предохранители применяют в случае,
если распределительные магистрали требуют для
своей защиты плавких вставок не более 600 *а*.
Ставить предохранители со вставками до 1 000 *а*
избегают, предпочитая им автоматы или два па-
раллельно включенных предохранителя по 600 *а*.
Это объясняется отсутствием данных эксплуата-
ции и вряд ли имеет оправдание. Во всех случаях
должны применяться предохранители предпо-
чтительно с кварцевым или иным заполнением.

Все коммутационные и защитные аппараты
ответвлений к распределительным магистралям,
а также разъединители, секционирующие глав-
ную магистраль, располагаются на том же уров-
не, на котором находятся магистрали. Это вы-
звано желанием избежать устройства дорогих и
ненадежных в эксплуатации спусков тяжелых,
многоамперных проводов в газовых трубах. Во
всех случаях предусматривается возможность
управлять этими аппаратами с пола.

Профилактический осмотр и ремонт аппара-
тов, расположенных на уровне магистралей, осу-
ществляется с кранов или с лестниц. Следует
заметить, что персонал, эксплуатирующий эти ап-
параты, не высказывает каких-либо жалоб на
неудобства.

Предохранители на вводе в распределитель-
ный пункт при питании от магистралей во мно-
гих случаях не ставятся на том якобы основании,
что проводники питающего ответвления обычно
имеют небольшую длину и надежно защищены
газовой трубой, а на ответвлениях, отходящих от
распределительного пункта, имеются свои (груп-
повые) предохранители. Такую практику следует
признать неправильной.

Действующие правила в целях удобства об-
служивания разрешают в подобных случаях уста-
навливать аппарат, защищающий ответвление на
некотором расстоянии (до 30 *м*) от места присо-
единения к магистрали. Но из этого не следует,
что можно вообще отказаться от установки такого
аппарата на вводе в распределительный пункт и
перенести все функции защиты на групповые пре-
дохранители.

Однако установка предохранителей на вводе
в распределительный пункт необходима не толь-
ко по формальным соображениям. Короткие за-
мыкания возможны и в самом распределитель-
ном пункте. Нельзя допускать, чтобы при этом
отключилась вся распределительная магистраль.

Отсутствие промежуточной ступени защиты между мощным предохранителем 600 *а*, защищающим распределительную магистраль, и малоамперным групповым предохранителем отнюдь не способствует бесперебойной работе сети.

Малогабаритные шинные трансформаторы тока, через которые включаются приборы учета энергии, врезаются таким образом, чтобы учитывалась или энергия всей распределительной магистрали, или энергия ее правого и левого плеча порознь. Конструктивно трансформаторы тока располагаются в общем ящике с рубильником и предохранителями ответвления. Счетчики концентрируются в одном или двух пунктах цеха и монтируются в стальных запираемых шкафах. Контрольные проводники от трансформаторов тока к счетчикам прокладываются в газовых трубах.

Из сказанного не трудно заключить, что при магистральных сетях можно осуществить более совершенный учет энергии по хозрасчетным единицам, чем при радиальных. При этом полностью исключаются нарушения учета после первой же перепланировки технологического оборудования.

Нагрузка главной магистрали контролируется при помощи измерительных приборов трансформатора. Контроль нагрузки распределительных магистралей легко осуществим в местах установки трансформаторов тока для учета энергии.

Местное освещение станков согласно действующим нормам должно осуществляться при напряжении 36 *в*. На предприятиях, где применены шинные сборки, лампы местного освещения принято питать от групповых однофазных трансформаторов мощностью 250...500 *ва*. К одному зажиму трансформатора присоединяется стальная полоска, проложенная на роликах вдоль короба шинной сборки снаружи, а второй зажим — заземляется. От полоски к лампе каждого станка спускается один провод, проложенный в общих трубах с проводами силовой сети. Второй зажим лампы также заземляется.

Такой способ питания ламп 36 *в* более экономичен, чем установка индивидуальных трансформаторов 36 *в* на каждом станке, но он противоречит принципу универсальности сети. Поэтому в сетях со штепсельными шинопроводами приходится устанавливать на каждый станок отдельный трансформатор мощностью 50 *ва*, как это делается и при обычном радиальном питании кабелем или проводом. Если помимо лампы на части станков предусмотреть штепсельные розетки, то это освободит от необходимости иметь особую сеть ремонтного освещения.

Заземление (или зануление) элементов электрооборудования и потребителей при радиальных сетях обычно осуществляется при пом газовых труб, в которых проложены пров Один конец этих труб присоединяется к зазем емым элементам электрооборудования, а друго к полосе, проложенной у распределитель пунктов и связанной с магистралями заземле

На предприятиях, где применяются шин сборки, оборудование заземляется при помо катанки, которая приваривается к шинной сбо и используется для подвески проводов, соеди ющих сборку с потребителями. Короб шин сборки связывается с магистралями заземле стальной приваренной полосой. В качестве ма стралей заземления используются подкрано рельсы, балки и некоторые из ферм, котор связываются перемычками в общий контур. А логичным образом может выполняться зазем ние в случае применения «гибких» сетей в про тах с кранами.

Иначе обстоит дело при универсальных се со штепсельными шинопроводами. В этом слу приходится прокладывать в гибком шланге проводами, подводящими энергию к потребите специальную (четвертую) жилу для заземлен Согласно действующим правилам жила заземл ния в общей оплетке с основными проводами до жна иметь пропускную способность не менее фазного провода и сечение по меди не мен 1 *мм*². На практике, однако, не рекомендует применять жилы сечением менее 1,5 *мм*². К нец жилы со стороны шинопровода закрепляет под один из болтов, крепящих штепсельную робку к коробу шинопровода.

В качестве вторичной магистрали заземлен используется короб штепсельного шинопрово который через каждые полтора метра крепи болтами к подвескам, связанным с заземлени ми конструкциями (металлическими ферма балками, колоннами и т. п.). Проводимость роба должна соответствовать этому его назнач нию.

Вызывает некоторые опасения наличие бо товых соединений в стыках секций короба (ч рез каждые 3 *м*). Но учитывая, что стыки выпо нены внахлестку и что крепление осуществле четырьмя болтами, можно рассчитывать на д статочно надежный контакт. Однако это следу проверить испытанием.

Литература

1. Ю. Л. Мукосеев. Вопросы проектирования э ктрооборудования металлообрабатывающих заводов. В № 7, 1936; № 12, 1937.

2. М. Е. Островский. Промышленные разво и фундаменты под оборудование в универсальных цех Бюллетень строительной техники, № 12 и 20, 1949.

[12. 9. 1

◇ ◇ ◇

рафоаналитический метод исследования работы дистанционных реле

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

Москва

Изложен разработанный автором метод исследования поведения дистанционных реле при симметричных и несимметричных режимах с учетом неравенства величин э. д. с. и расхождения их по фазе. Метод заключается в построении круговых диаграмм полных проводимостей и сопоставлении их с характеристиками дистанционных реле, вычерченными в комплексной плоскости Y. Приведены примеры исследования поведения дистанционных реле при двухфазном коротком замыкании, сопровождающемся расхождением э. д. с. по фазе, и при качаниях, происходящих в системе с линией электропередачи большой протяженности.

При проектировании эксплуатации релей- защиты современных оковольтных систем возникает необхо- ость в исследовании ведения дистанционных ле при различных ре- мах: перегрузках линий, ратких замыканиях, ка- ниях, отключениях од- из фаз и т. д. Это следование в конечном итоге сводится к со- ставлению характеристик срабатывания дистан- ционных реле с сопротивлениями, получающи- ся на их зажимах.

В зависимости от типа дистанционной за- ты проверке могут подлежать дистанционные де защиты от замыканий между фазами и за- ты от замыканий на землю. Первые включа- ся обычно на линейные напряжения и разности ответствующих токов, а вторые — на фазные пряжения и токи, компенсированные током левой последовательности.

При несимметричных коротких замыканиях неполнофазных режимах поведение дистан- ционных реле обычно проверяется во всех трех зах с учетом нагрузки, расхождения э. д. с. раторов по фазе и неравенства величин их э. д. с. При проектировании релейной щиты линий электропередачи большой протя- женности учитывается и емкость линии.

Таким образом, анализ поведения дистанцион- ых реле оказывается на практике весьма тру- емкой работой, требующей большой затраты емени. Поэтому при современном состоянии ники релейной защиты возникает острая не- ходимость в разработке метода исследования ведения дистанционных реле, не требующего ачительного объема вычислительных работ.

В отличие от существующих методов исследо- ания поведения дистанционных реле [*Л.* 1 ... 5] тод, предлагаемый в настоящей статье, осно- н на построении круговых диаграмм полных роводимостей и сопоставлении последних с ха- ктеристиками дистанционных реле, вычерчен- ыми в комплексной плоскости проводимо- ей (*Y*). Круговые диаграммы и характерис- ки реле чертятся в предположении, что реле, щищающие линию, включены не на напряже- в месте установки защиты, а на э. д. с. источника. Характеристика дистанционного реле в комплексной плоскости *Z* мыслится перемещенной относительно начала координат на величину сопротивления прямой последовательности источника или в неполнофазном режиме на величину, вычисляемую по одной из формул, приведенных в табл. 7 приложения.

Такое предположение коренным образом упрощает весь процесс построения диаграмм, сводя его к вычерчиванию концентрических окружностей и радиальных лучей, образующих углы, равные фазным сдвигам между э. д. с. источников.

Ввиду того, что представление характеристик дистанционных реле в *плоскости Y* является менее привычным, чем в плоскости *Z*, ниже приведены уравнения и характеристики дистанционных реле в обеих плоскостях.

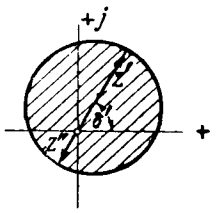
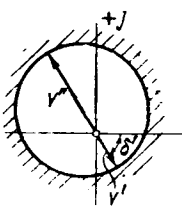
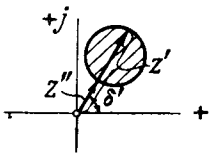
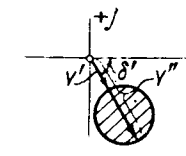
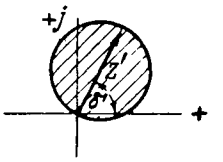
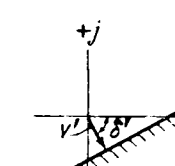
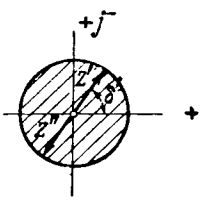
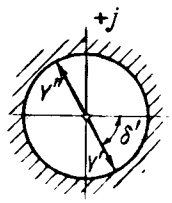
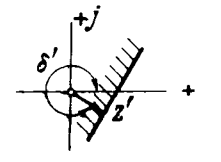
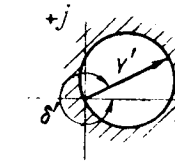
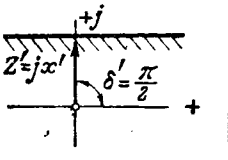
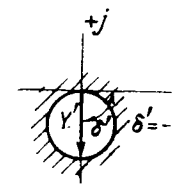
Характеристики дистанционных реле в плоскостях *Z* и *Y*. Представление характеристик дистанционных реле в комплексной плоскости (*Z* или *Y*) удобно с двух точек зрения.

Во-первых, такое представление дает возможность сопоставлять характеристики реле с векторами полных сопротивлений или проводимостей, получающихся на зажимах реле в условиях рассматриваемого режима, и решать тем самым вопрос о том, может ли сработать дистанционное реле в указанных условиях или нет. Обычно характеристика дистанционного реле представляет собой окружность или прямую линию, разделяющую комплексную плоскость на две части, одна из которых соответствует области срабатывания реле. Условием срабатывания дистанционного реле является нахождение в пределах этой области конца вектора полного сопротивления или проводимости, измеренных на зажимах реле.

Во-вторых из рассмотрения уравнения, соответствующего той или иной характеристике реле, может быть выявлен самый принцип устройства данного дистанционного реле.

В табл. 1 приведены характеристики основных типов дистанционных реле, вычерченные в плоскостях *Z* и *Y*, и соответствующие им уравне-

Характеристики дистанционных реле в плоскостях Z и Y *Табл*

Тип реле	Основное условие	Плоскость Z		Плоскость Y	
		Характеристика	Уравнение	Характеристика	Уравнение
Дистанционное реле общего типа	$\arg Z' = \arg Z'' \pm \pi$		$\left\|Z-\frac{Z'+Z''}{2}\right\| = \left\|\frac{Z'Z''}{Z}-\frac{Z'+Z''}{2}\right\| = \left\|\frac{Z'-Z''}{2}\right\|$		$\left\|Y-\frac{Y'+Y''}{2}\right\| = \left\|\frac{Y'Y''}{Y}-\frac{Y'+Y''}{2}\right\| = \left\|\frac{Y'-Y''}{2}\right\|$
а) Начало координат внутри круга	$\arg Y' = \arg Y'' \pm \pi$				
б) Начало координат вне круга	$\arg Z' = \arg Z''$ $\arg Y' = \arg Y''$		$z^2 - z(z' \mp z'')\cos(\varphi - \delta') \mp \mp z'z'' = 0$		
Направленное дистанционное реле	$Z'' = 0$ $Y'' = \infty$		$\left\|Z-\frac{Z'}{2}\right\| = \left\|\frac{Z'}{2}\right\|$ $z = z'\cos(\varphi - \delta')$		$\|2Y' - Y\| = \|Y$
Ненаправленное дистанционное реле полного сопротивления и полной проводимости	$Z' = -Z''$ $Y' = -Y''$		$\|Z\| = \|Z'\|$ $z = z'$		$\|Y'\| = \|Y\|$
Блокирующее дистанционное реле	$z'' = \infty$ $Y'' = 0$		$\|Z\| = \|2Z' - Z\|$ $z\cos(\varphi - \delta') = z'$		$\|Y'\| = \|2Y - Y'\|$
Дистанционное реле реактивного сопротивления и реактивной проводимости	$\arg Z' = \frac{\pi}{2}$ $Z'' = -j\infty$ $\arg Y = -\frac{\pi}{2}$ $Y'' = 0$		$\|Z\| = \|2Z' - Z\|$ $z\sin\varphi = x'$		$\|Y'\| = \|2Y - Y'\|$

Примечание: $\arg Z'$ обозначает угол полного сопротивления.

ния. Входящие в уравнения величины Z и Y обозначают полные сопротивления и полные проводимости на зажимах реле:

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}.$$

В свою очередь,

$$Z' = \frac{1}{Y'} \quad \text{и} \quad Z'' = \frac{1}{Y''}$$

представляют собой заданные фиксированные величины (уставки реле). Здесь и ниже все величины отнесены к первичной стороне.

Выбор напряжений $\dot{U}$ и токов $\dot{I}$, как уже указывалось выше, зависит от назначения дистанционных реле [Л. 6]. В случае защиты от замыканий между фазами в качестве напряжений $\dot{U}$ берутся линейные напряжения $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$, $\dot{U}_{CA}$, а в качестве токов — соответствующие разности

$\dot{I}_{AB}=\dot{I}_A-\dot{I}_B$, $\dot{I}_{BC}=\dot{I}_B-\dot{I}_C$, $\dot{I}_{CA}=\dot{I}_C-\dot{I}_A$.
случае же защиты от замыканий на землю
ользуются фазные напряжения $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$
соответствующие компенсированные токи
$+k3\dot{I}_0$, $\dot{I}_B+k3\dot{I}_0$, $\dot{I}_C+k3\dot{I}_0$, где

$$k\approx\frac{z_0-z_1}{3z_1}.$$

Если обе части какого-либо из уравнений,
веденных в табл. 1, умножить на ток $\dot{I}$, то
лучится уравнение равновесия, на основании
торого можно судить о принципе устройства
станционного реле данного типа. Так, напри-
ер для дистанционного реле общего типа полу-
тся уравнение

$$\left|\dot{U}-\frac{Z'+Z''}{2}\dot{I}\right|=\left|\frac{Z'-Z''}{2}\dot{I}\right|, \qquad (1)$$

торое показывает, что оно может быть вы-
лнено на базе реле балансной конструкции,
ющего две обмотки. К одной из этих обмо-
к, являющейся тормозной, должно быть под-
ено напряжение

$$U_{\text{т}}=\left|\dot{U}-\frac{Z'+Z''}{2}\dot{I}\right|, \qquad (2)$$

к другой, являющейся рабочей, напряжение

$$U_{\text{р}}=\left|\frac{Z'-Z''}{2}\dot{I}\right|. \qquad (3)$$

кое реле срабатывает при

$$U_{\text{т}}<U_{\text{р}}. \qquad (4)$$

Следует обратить внимание на то, что для
лучения характеристики в виде окружности,
катывающей начало координат, углы полных
противлений Z' и Z'' должны отличаться на
°, т. е. $|Z'-Z''|=z'+z''$. В свою очередь,
получения характеристики в виде окружно-
и с началом координат, вынесенным за пре-
ы круга, углы полных сопротивлений Z' и Z''
лжны быть одинаковыми, т. е.

$$|Z'-Z''|=z'-z''.$$

Анализ показывает, что дистанционные реле,
сматриваемые в настоящей работе, могут
ть выполнены на базе балансной системы,
ющей тормозное напряжение

$$\dot{U}_{\text{т}}=\dot{U}-Z'\dot{I}+\dot{U}_n \qquad (5)$$

абочее напряжение

$$\dot{U}_{\text{р}}=\dot{U}-Z'\dot{I}-\dot{U}_n. \qquad (6)$$

вием срабатывания такого реле служит не-
нство (4).
Входящее в выражения (5) и (6) напряже-
$\dot{U}_n$ выбирается так, чтобы оно примерно
падало по фазе с напряжением $\dot{U}$ или было
нуто относительно него на острый угол.

Выбором напряжения $\dot{U}_n$ определяется тип дистанционного реле.

При

$$\dot{U}_n=n(\dot{U}-Z''\dot{I}) \qquad (7)$$

($n>0$) получается дистанционное реле общего типа, имеющее характеристику,

$$|Z-Z'+n(Z-Z'')|=|Z-Z'-n(Z-Z'')|. \qquad (8)$$

Уравнение, приведенное в табл. 1 для этого типа реле,

$$\left|Z-\frac{Z'+Z''}{2}\right|=\left|\frac{Z'-Z''}{2}\right| \qquad (9)$$

соответствует коэффициенту $n=1$.

Уравнение в плоскости Y записывается по аналогии с уравнением (9)

$$\left|Y-\frac{Y'+Y''}{2}\right|=\left|\frac{Y'-Y''}{2}\right|. \qquad (10)$$

Подстановка $Z=\frac{1}{Y}$ в уравнение (9) и соответственно $Y=\frac{1}{Z}$ в уравнение (10) приводит к дополнительным уравнениям

$$\left|\frac{Z'Z''}{Z}-\frac{Z'+Z''}{2}\right|=\left|\frac{Z'-Z''}{2}\right| \qquad (11)$$

и

$$\left|\frac{Y'Y''}{Y}-\frac{Y'+Y''}{2}\right|=\left|\frac{Y'-Y''}{2}\right|, \qquad (12)$$

удобным при рассмотрении некоторых частных случаев.

Уравнения (8), (9) и (11) могут быть, в свою очередь, представлены в виде уравнения окружности

$$z^2-z(z'\mp z'')\cos(\varphi-\delta')\mp z'z''=0, \qquad (13)$$

смещенной относительно начала координат на расстояние $\frac{z'\mp z''}{2}$ (под углом δ') и имеющей радиус

$$\sqrt{\left(\frac{z'\mp z''}{2}\right)^2\pm z'z''}=\frac{z'\pm z''}{2}.$$

Верхние знаки относятся к характеристике с началом координат внутри круга, а нижние — к характеристике с началом координат вне круга. Обращает на себя внимание тот факт, что уравнение (13) сохраняет свой вид независимо от выбора величины коэффициента $n>0$, входящего в (8).

При

$$\dot{U}_n=n\dot{U} \qquad (14)$$

($n>0$) получается направленное дистанционное реле. Уравнения, приведенные в табл. 1 для этого типа реле,

$$\left|Z-\frac{Z'}{2}\right|=\left|\frac{Z'}{2}\right| \qquad (15)$$

и

$$|2Y'-Y|=|Y| \qquad (16)$$

соответствуют $n=1$. Уравнения (15) и (16) непосредственно следуют из (9) и (12) при $z''=0$ и $y''=\infty$. Независимо от выбора величины коэффициента n, входящего в (14), уравнение реле приводится к виду:

$$z=z'\cos(\varphi-\delta'), \tag{17}$$

являющемуся частным случаем (13) при $z''=0$.

Дистанционные реле, имеющие такую характеристику при симметричном и несимметричном коротком замыкании (к реле подводятся напряжения и токи одноименных фаз), получили в литературе хотя и неудачное, но распространенное название реле типа *Mho*.

При

$$\dot{U}_n=n(\dot{U}+Z'\dot{I}) \tag{18}$$

($n>0$) получается ненаправленное дистанционное реле полного сопротивления и полной проводимости, подчиняющееся условиям

$$z=z' \tag{19}$$

и

$$y=y'. \tag{20}$$

Уравнение (19) является частным случаем уравнения (13) при $z'=z''$.

При

$$\dot{U}_n=nZ'\dot{I} \tag{21}$$

($n>0$) получается блокирующее дистанционное реле. Приведенные для него в табл. 1 уравнения

$$|Z|=|2Z'-Z| \tag{22}$$

и

$$|Y'|=|2Y-Y'| \tag{23}$$

соответствуют $n=1$ и вытекают из (11) и (10) при $z''=\infty$ и $y''=0$.

Независимо от выбора коэффициента n, входящего в уравнение (21), реле приводится к виду:

$$z\cos(\varphi-\delta')=z', \tag{24}$$

представляющему частный случай уравнения (13) при $z''=0$.

При

$$\dot{U}_n=njx'\dot{I} \tag{25}$$

($n>0$) получается дистанционное реле реактивного сопротивления и реактивной проводимости, представляющее частный случай предыдущего при $\delta'=\pm\frac{\pi}{2}$. При этом уравнение (24) приобретает вид:

$$z\sin\varphi=x'. \tag{26}$$

Сравнение модулей напряжений U_{I} и U_{II}, представленных выражениями (5) и (6), может быть, как известно, выполнено не только с помощью балансной системы, но и индукционной с вращающимся магнитным полем. Для этого к реле, реагирующему на косинус угла между подводимыми напряжениями, достаточно подвести напряжения

$$\tfrac{1}{2}(\dot{U}_{\text{I}}+\dot{U}_{\text{II}})=\dot{U}-Z'\dot{I} \tag{27}$$

и

$$\tfrac{1}{2}(\dot{U}_{\text{I}}-\dot{U}_{\text{II}})=\dot{U}_n. \tag{(

Таким образом, каждый из рассмотрен выше типов дистанционных реле может б выполнен на базе индукционной системы с в щающимся магнитным полем, реагирующей косинус угла между напряжениями $\dot{U}-\dot{I}$ и $\dot{U}_n$. Поляризующее напряжение $\dot{U}_n$ выбирае согласно (7), (14), (18), (21) или (25) в завис мости от типа реле.

Нами до сих пор рассматривались дист ционные реле, включаемые на напряжения и то одноименных фаз, например на напряжение $\dot{U}$ и ток $\dot{I}_{AB}$ и т. д. Иначе говоря, поляризующ напряжение $\dot{U}_n$, входящее в (5), (6) и (28), вы ралось по фазе одноименно с $\dot{U}$ и $\dot{I}$. Между т в качестве $\dot{U}_n$ может быть принято напряжен неодноименное с $\dot{U}$. Например, в случае при нения балансной системы могут быть выбра напряжения (при $\dot{U}_n=j\dot{U}_{BC}$):

$$\dot{U}_{\text{I}}=\dot{U}_{AB}-Z'\dot{I}_{AB}+j\dot{U}_{BC}, \tag{(}$$

$$\dot{U}_{\text{II}}=\dot{U}_{AB}-Z'_{AB}-j\dot{U}_{BC}, \tag{(}$$

что, в свою очередь, в соответствии с (27) и (2 равносильно применению реле с вращающим магнитным полем, реагирующего на синус уг между напряжениями $\dot{U}_{AB}-Z'\dot{I}_{AB}$ и $\dot{U}_{BC}$.

Уравнение характеристики такого реле може быть записано на основании (29) и (30) для сим метричного режима в следующем виде:

$$|Z-Z'+e^{-j30^\circ}Z|=|Z-Z'-e^{-j30^\circ}Z| \tag{31}$$

или

$$z=\frac{z'}{\cos 30^\circ}\cos(\varphi-\delta'+30^\circ). \tag{32}$$

Если в выражениях (29) и (30) заменить $\dot{U}_A$ на $\dot{U}_A$ или $\dot{U}_{AC}$, а $\dot{I}_{AB}$ — на $\dot{I}_A$ или $\dot{I}_{AC}$, что при использовании индукционных систем с вращающимся полем равносильно применению реле реагирующих на синусы углов между $\dot{U}_A-Z'\dot{I}_A$ и $\dot{U}_{BC}$, то получатся уравнения, справедливые только для симметричного режима,

$$|Z-Z'+\sqrt{3}Z|=|Z-Z'-\sqrt{3}Z|, \tag{33}$$

$$|Z-Z'+e^{j30^\circ}Z|=|Z-Z'-e^{j30^\circ}Z| \tag{34}$$

или

$$z=z'\cos(\varphi-\delta') \tag{35}$$

и

$$z=\frac{z'}{\cos 30^\circ}\cos(\varphi-\delta'-30^\circ). \tag{36}$$

Как видно из уравнений, полученные таким образом реле представляют собой не что иное, как направленные дистанционные омметры, имеющие только при симметричных режимах характеристики, аналогичные приведенным в табл. 1.

Токи и напряжения на зажимах реле *Таблица 2*

Дистанционная защита	Реле в фазах	Напряжения	Токи
От замыканий между фазами	AB	$\dot{U}_{AB}=(1-a^2)(\dot{U}_1-a\dot{U}_2)$	$\dot{I}_{AB}=(1-a^2)(\dot{I}_1-a\dot{I}_2)$
	BC	$\dot{U}_{BC}=(a^2-a)(\dot{U}_1-\dot{U}_2)$	$\dot{I}_{BC}=(a^2-a)(\dot{I}_1-\dot{I}_2)$
	CA	$\dot{U}_{CA}=(a-1)(\dot{U}_1-a^2\dot{U}_2)$	$\dot{I}_{CA}=(a-1)(\dot{I}_1-a^2\dot{I}_2)$
От замыканий на землю	A	$\dot{U}_A=\dot{U}_1+\dot{U}_2+\dot{U}_0$	$\dot{I}_A+k3\dot{I}_0=\dot{I}_1+\dot{I}_2+(1+3k)\dot{I}_0$
	B	$\dot{U}_B=a^2\dot{U}_1+a\dot{U}_2+\dot{U}_0$	$\dot{I}_B+k3\dot{I}_0=a^2\dot{I}_1+a\dot{I}_2+(1+3k)\dot{I}_0$
	C	$\dot{U}_C=a\dot{U}_1+a^2\dot{U}_2+\dot{U}_0$	$\dot{I}_C+k3\dot{I}_0=a\dot{I}_1+a^2\dot{I}_2+(1+3k)\dot{I}_0$

Однако при несимметричных режимах вследие подведения к реле напряжений неодноименх фаз такие дистанционные реле ведут себя ично от приведенных в табл. 1 и не подлеит анализу с помощью уравнений (31) — (36). аче говоря, эти реле не обладают характеристиками срабатывания в комплексной плоскости, изменными при различных режимах работы ектропередачи.

На практике такие дистанционные реле нашли ьма ограниченное применение (например, в ате L-3 фирмы BBC).

Круговые диаграммы полных проводимо-й. Выражения полных проводимостей на замах дистанционных реле получаются в результе деления токов, подводимых к реле, на ответствующие напряжения.

Ввиду того, что при несимметричных режих работы системы анализ производится, как авило, на основе метода симметричных соавляющих, ниже приведена табл. 2, в которой пряжения и токи на зажимах дистанционных ле выражены через симметричные составляие.

При наличии двухстороннего питания от точников, имеющих э. д. с. $\dot{E}_{\text{I}}$ и $\dot{E}_{\text{II}}$, каждая приведенных в табл. 2 симметричных составющих тока или напряжения представляет бой линейную зависимость от $\dot{E}_{\text{I}}$ и $\dot{E}_{\text{II}}$ вида $m\dot{E}_{\text{I}}+n\dot{E}_{\text{II}}$, где m и n — комплексные коэффициенты, зависящие от параметров системы и ющие размерность проводимости для токов е имеющие размерности для напряжений.

Выражения полных проводимостей на зажих дистанционных реле представляются в виде бно-линейных функций вида:

$$Y=\frac{m_1\dot{E}_{\text{I}}+n_1\dot{E}_{\text{II}}}{m_2\dot{E}_{\text{I}}+n_2\dot{E}_{\text{II}}}$$

$$Y=\frac{m_1+n_1\dfrac{\dot{E}_{\text{II}}}{\dot{E}_{\text{I}}}}{m_2+n_2\dfrac{\dot{E}_{\text{II}}}{\dot{E}_{\text{I}}}}. \qquad (37)$$

Если положить, что

$$\frac{\dot{E}_{\text{II}}}{\dot{E}_{\text{I}}}=\frac{E_{\text{II}}}{E_{\text{I}}}e^{-j\theta}, \qquad (38)$$

то могут быть построены зависимости:

1) $Y=F_1\left(\dfrac{E_{\text{II}}}{E_{\text{I}}}\right)$ при постоянных углах θ;

2) $Y=F_2(\theta)$ при постоянных значениях $\dfrac{E_{\text{II}}}{E_{\text{I}}}$.

В обоих случаях получаются семейства круговых диаграмм.

Выражение (37) приобретает исключительно простой вид в том случае, когда в качестве напряжений, подводимых к дистанционным реле, принимаются э. д. с. источников. Так, например, при подведении к реле э. д. с. источника E_{I} коэффициент n_2, входящий в (37), обращается в нуль и выражения проводимостей приобретают вид, указанный в табл. 3.

Таблица 3

Выражения полных проводимостей

Дистанционная защита	Реле в фазах	Полная проводимость
От замыканий между фазами	AB	$Y_{AB}=\dfrac{\dot{I}_1-a\dot{I}_2}{\dot{E}_{\text{I}}}$
	BC	$Y_{BC}=\dfrac{\dot{I}_1-\dot{I}_2}{\dot{E}_{\text{I}}}$
	CA	$Y_{CA}=\dfrac{\dot{I}_1-a^2\dot{I}_2}{\dot{E}_{\text{I}}}$
От замыканий на землю	A	$Y_A=\dfrac{\dot{I}_1+\dot{I}_2+(1+3k)\dot{I}_0}{\dot{E}_{\text{I}}}$
	B	$Y_B=\dfrac{\dot{I}_1+a^2\dot{I}_2+a(1+3k)\dot{I}_0}{\dot{E}_{\text{I}}}$
	C	$Y_C=\dfrac{\dot{I}_1+a\dot{I}_2+a^2(1+3k)\dot{I}_0}{\dot{E}_{\text{I}}}$

В результате выражение полной проводимости в общем виде записывается так:

$$Y_{\text{I}} = M + N\frac{\dot{E}_{\text{II}}}{\dot{E}_{\text{I}}}. \qquad (39)$$

При

$$E_{\text{II}} = 0 \quad Y_{E_{\text{II}}=0} = M.$$

В свою очередь, при

$$\frac{\dot{E}_{\text{II}}}{\dot{E}_{\text{I}}} = 1 \quad Y_{E_{\text{I}}-E_{\text{II}}} = M + N.$$

Таким образом, M представляет собой полную проводимость на зажимах реле (питаемого от э. д. с. источника) при равенстве нулю э. д. с. второго источника, а N может быть получено как разность полных проводимостей при $\dot{E}_{\text{I}} = \dot{E}_{\text{II}}$ и $E_{\text{II}} = 0$.

Итак,

$$Y_{\text{I}} = Y_{E_{\text{II}}=0} + (Y_{E_{\text{I}}-E_{\text{II}}} - Y_{E_{\text{II}}=0})\frac{\dot{E}_{\text{II}}}{\dot{E}_{\text{I}}}. \qquad (40)$$

Выражение (40) справедливо для любой фазы при всяком режиме работы системы. При несимметричных коротких замыканиях без переходных сопротивлений в месте короткого замыкания проводимости $Y_{E_{\text{I}}-E_{\text{II}}}$ и $Y_{E_{\text{II}}=0}$, измеренные в поврежденных фазах (например, Y_{BC} при двухфазном коротком замыкании фаз BC или Y_A при однофазном замыкании на землю фазы A и т. д.), равны. Поэтому для этих фаз

$$Y = Y_{E_{\text{II}}=0}. \qquad (41)$$

При учете же переходных сопротивлений в месте короткого замыкания следует пользоваться формулой (40).

Что касается неповрежденных фаз, то для них также остается в силе формула (40). На основе этой формулы весьма просто строятся круговые диаграммы полных проводимостей, представляющие концентрические окружности, отнесенные от начала координат на величину $Y_{E_{\text{II}}=0}$ и имеющие радиус

$$|Y_{E_{\text{I}}-E_{\text{II}}} - Y_{E_{\text{II}}=0}|\frac{E_{\text{II}}}{E_{\text{I}}}.$$

При

$$\frac{E_{\text{II}}}{E_{\text{I}}} = \left|\frac{Y_{E_{\text{II}}=0}}{Y_{E_{\text{I}}-E_{\text{II}}} - Y_{E_{\text{II}}=0}}\right|$$

окружность проходит через начало координат; при бо́льших значениях $\frac{E_{\text{II}}}{E_{\text{I}}}$ она охватывает начало координат; наконец, при меньших значениях $\frac{E_{\text{II}}}{E_{\text{I}}}$ начало координат оказывается вне круга.

Угол $\theta = 0$ соответствует лучу, исходящему из центра круга в направлении вектора $Y_{E_{\text{I}}-E_{\text{II}}} - Y_{E_{\text{II}}=0}$, а угол $\theta > 0$ лучу, исходящему из центра круга и повернутому относительно чального луча (соответствующего $\theta = 0$) на уг по ходу часовой стрелки [на основании (3 (40)]. В этом отношении круговые диагра полных проводимостей, в отличие от диагр сопротивлений, наряду с исключительной про той построений обладают удобством непос ственного отсчета углов θ по диаграмме. С дует также заметить, что вычисление резу тирующей проводимости может быть замен графическим построением в соответствии с таб

Построив круговые диаграммы полных п водимостей, можно произвести проверку пове ния дистанционных реле путем сопоставле этих диаграмм с характеристиками дистанц ных реле, вычерченными в плоскости Y. Учи вая, однако, что диаграммы полных прово мостей, построенные вышеуказанным спосо относятся не к месту установки реле, а к точ электрически отдаленной от места устано реле на величину сопротивления источника, диаграммы необходимо сопоставлять с харак ристиками реле, получаемыми следующим об зом.

Характеристика реле в плоскости Y по чается в результате обращения характеристи реле, вычерченной в плоскости Z и смещен относительно начала координат на некотор определенную величину, равную разности за ров полных сопротивлений на зажимах реле п подведении к ним: 1) э. д. с. источника и 2) пряжения в месте установки реле.

Предлагаемый графоаналитический ме применим тогда, когда указанная разность з меров не зависит от э. д. с. источников. Сю относятся следующие режимы работы элект передачи:

а) При анализе поведения дистанцион реле, включенных согласно табл. 2: качания н неполнофазные режимы с одной или дву разомкнутыми фазами, не сопровождающие коротким замыканием, при произвольном со ношении сопротивлений прямой, обратной нулевой последовательностей источника, а так любые виды короткого замыкания, если сопр тивление генераторов близко к нулю (по ср нению с сопротивлением остальной час системы).

б) При анализе поведения дистанцион реле, включенных на линейные напряжения разности токов: любые виды коротких замык ний и любые режимы работы электропередач при равенстве сопротивлений прямой и обратно последовательностей эквивалентного источни

в) При анализе поведения дистанцион реле, включенных на фазные напряжения в схеме с токовой компенсацией: несимметричн короткие замыкания, не сопровождающиеся пр теканием I_0 в месте установки реле, при равенст сопротивлений прямой и обратной последовател ностей эквивалентного источника, а также люб виды коротких замыканий и режимы работ электропередачи, сопровождающиеся протек нием I_0 в месте установки реле, при равенств соотношений сопротивлений всех последовател

стей эквивалентного источника и защищаемой нии.

В случае соблюдения условий пп. „б" или „в" казанная выше разность замеров равна сопро-влению прямой последовательности эквива-ентного источника.

Действительная характеристика направлен-ого дистанционного реле в плоскости Z имеет д окружности, проходящей через начало оординат. Для получения характеристики плоскости Y она смещается на величину пол-ого сопротивления источника, т. е. приобретает д характеристики дистанционного реле общего па с началом координат вне круга (табл. 1).

Характеристика в плоскости Y, получаемая результате обращения смещенной характери-тики Z, представляет окружность, расположен-ую в нижней части полуплоскости. Именно а и сопоставляется с круговыми диаграммами ных проводимостей.

Точки пересечений этих диаграмм с харак-ристикой реле Y соответствуют предельным ловиям срабатывания реле и определяют углы хождения θ э. д. с. источников, при которых тупает срабатывание реле. Каждый такой ол отсчитывается непосредственно по диа-мме как угол между лучом, соответству-им $\theta=0$, и лучом, проведенным через центр уга и данную точку пересечения круговой аммы с характеристикой реле. Отсчет по-ительных углов ведется по ходу часовой елки (для питающего конца).

Расчетное выражение полной проводимости качаниях или перегрузках получается на овании (40), исходя из того, что при неучете кости $Y_{E_I-E_{II}}=0$ и $Y_{E_{II}=0}=\frac{1}{Z_I}$.

Оно имеет следующий вид:

$$Y_I=\frac{1}{Z_I}\left(1-\frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_I}\right); \qquad (42)$$

сь Z_I — сопротивление прямой последова-ьности всей электропередачи, включая со-отивления источников.

Соответственно для противоположного конца ктропередачи

$$Y_{II}=\frac{1}{Z_I}\left(1-\frac{\dot{E}_I}{\dot{E}_{II}}\right). \qquad (43)$$

При наличии двух одинаковых параллельных ий характеристика реле одной линии строится редположении, что в плоскости Z она смещена величину удвоенного сопротивления источ-а. Если параллельные цепи неодинаковы, то актеристика дистанционного реле первой и смещается на величину сопротивления ис-ника, умноженного на отношение суммы отивлений параллельных цепей к сопротив-ю второй цепи.

При исследовании поведения дистанционной ты линий электропередачи большой протя-ности, когда расчеты ведутся с учетом кости линии, целесообразно пользоваться теорией четырехполюсника. На основе известных уравнений линии электропередачи для питающего конца

$$\left.\begin{aligned}\dot{E}_I&=A_{11}\dot{E}_{II}+A_{12}\dot{I}_{II},\\ \dot{I}_I&=A_{21}\dot{E}_{II}+A_{22}\dot{I}_{II}\end{aligned}\right\} \qquad (44)$$

и для приемного конца (с измененным положительным направлением токов)

$$\left.\begin{aligned}\dot{E}_{II}&=A_{22}\dot{E}_I+A_{12}\dot{I}_I,\\ \dot{I}_{II}&=A_{21}\dot{E}_I+A_{11}\dot{I}_I\end{aligned}\right\} \qquad (45)$$

входные проводимости выражаются следующим образом:

$$Y_I=\frac{A_{22}}{A_{12}}-\frac{1}{A_{12}}\frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_I}, \qquad (46)$$

$$Y_{II}=\frac{A_{11}}{A_{12}}-\frac{1}{A_{12}}\frac{\dot{E}_I}{\dot{E}_{II}}. \qquad (47)$$

Предполагается, что четырехполюсник с параметрами A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22} включает в себя линию электропередачи вместе с сопротивлениями источников.

Если расчет ведется без учета емкости, $A_{11}=A_{22}$, $A_{12}=Z_I$ и выражения (46) и (47) преобразуются в (42) и (43).

Исследование дистанционных реле при несимметричных коротких замыканиях с учетом емкости линии может быть произведено на основании формул табл. 3, причем симметричные составляющие токов $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_0$ находятся из комплексных схем замещения. Емкость линии может учитываться либо по схеме П [Л. 2], либо путем замены линии четырехполюсником. Комплексные схемы замещения в последнем случае имеют вид, приведенный в [Л. 6].

Проиллюстрируем применение описанного в настоящей работе графоаналитического метода исследования поведения дистанционных реле двумя числовыми примерами. В целях проверки эффективности метода были выбраны примеры, решения которых другими способами приведены в литературе. Применение графоаналитического метода дало возможность значительно сократить объем вычислительных работ и получить результаты при малой затрате времени.

Пример 1. На рис. 1,*а* изображена схема электропередачи с двухсторонним питанием. Сопротивления прямой и обратной последовательностей системы одинаковы. Угол полного сопротивления источников и линии составляет 80°. Линия защищена от замыканий между фазами направленными дистанционными реле, включенными на линейные напряжения и разности фазных токов. Местоположение реле указано на рис. 1, *а*.

Требуется: 1) определить углы расхождения э. д. с. $\dot{E}_I$ и $\dot{E}_{II}$, при которых срабатывают направленные дистанционные реле в неповрежденных фазах в случае металлического двухфазного короткого замыкания между фазами B и C в точке K; 2) определить минимальный угол расхождения э. д. с. $\dot{E}_I$ и $\dot{E}_{II}$, при котором насту-

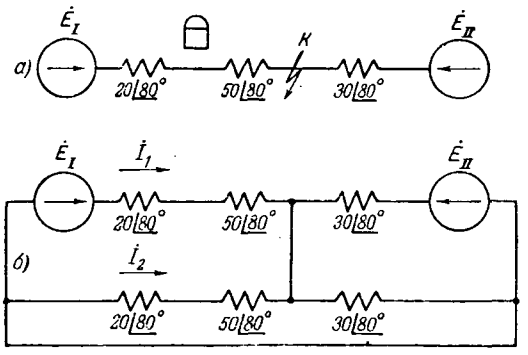


Рис. 1.
а — расчетная схема; *б* — комплексная схема замещения для случая двухфазного короткого замыкания.

пает срабатывание направленных дистанционных реле в случае отсутствия повреждения.

Соотношение между величинами э. д. с. источников $\frac{E_{II}}{E_I} = 0{,}65;\ 1{,}0;\ 1{,}3.$

Сопротивление защищаемой дистанционными реле зоны (при металлическом коротком замыкании) 60 *ом*. Угол наклона диаметра характеристики реле в плоскости Z $\delta' = 80°$.

Р е ш е н и е. На рис. 1, *б* приведена комплексная схема замещения для расчета двухфазного короткого замыкания. Результаты расчета полных проводимостей в соответствии с табл. 3 при $\dot{E}_{II} = 0$ и $\dot{E}_I = \dot{E}_{II}$ сведены в табл. 4.

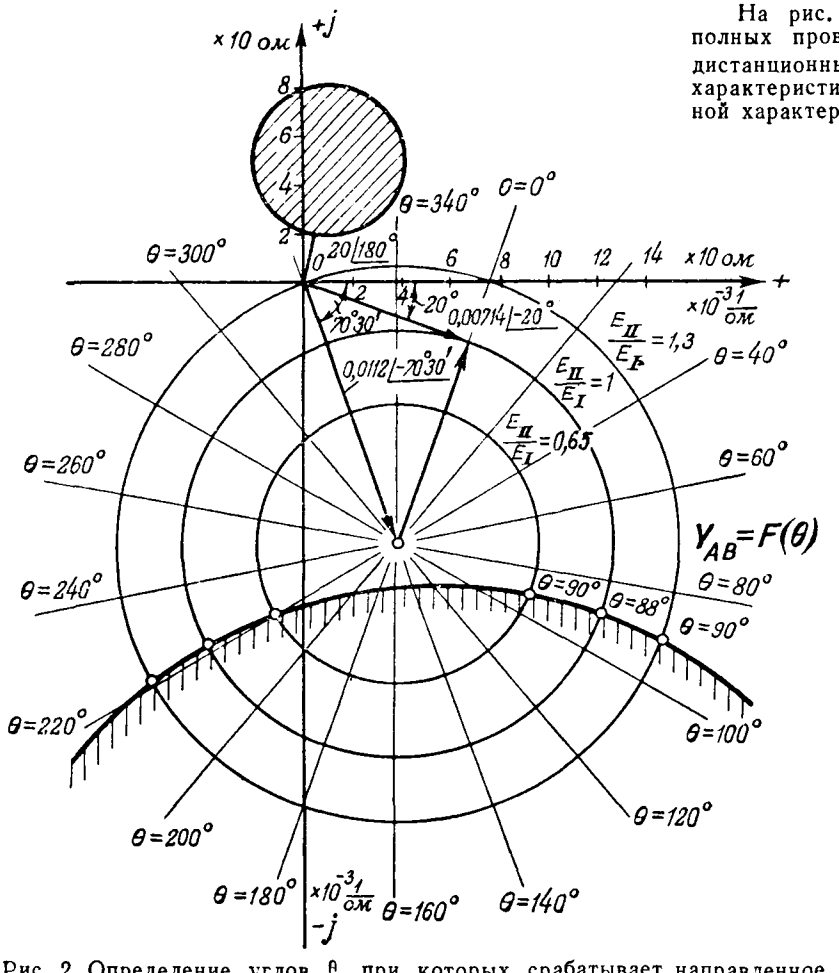


Рис. 2. Определение углов θ, при которых срабатывает направленное дистанционное реле фаз *AB* при двухфазном коротком замыкании между фазами *B* и *C*.

Ввиду равенства сопротивлений прямой и обр последовательностей токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ при $\dot{E}_I = \dot{E}_{II}$ одина по величине и обратны по знаку, вследствие чего жения для проводимостей Y_{AB} и Y_{CA} упрощаются и нимают следующий вид:

$$Y_{AB\,(E_I = E_{II})} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{E}_I}, \quad e^{j60},\ Y_{CA\,(E_I = E_I)} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{E}_I} e$$

Результирующие проводимости определяются в ветствии с (40):

$$Y_{AB} = 0{,}0112\,|\underline{-70°30'} + \\ + [0{,}00714|\underline{-20°} - 0{,}0112\,|\underline{-70°30'}]\frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_I},$$

$$Y_{CA} = 0{,}0112\,|\underline{-89°30'} + \\ + [0{,}00714|\underline{-140°} - 0{,}0112\,|\underline{89°30'}]\frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_I}.$$

Аналитическое вычисление разностей $Y_{E_I = E} - Y_{E_{II} = 0}$, определяющих радиусы окружностей $E_I = E_{II}$ и направление лучей $\theta = 0$, не требуется, как они получаются непосредственно из диаграмм по того, как нанесены $Y_{E_I = E_{II}}$ и $Y_{E_{II} = 0}$. Радиусы ост ных окружностей отличаются от полученных мно телем $\frac{E_{II}}{E_I}$.

На рис. 2 и 3 представлены круговые диагра полных проводимостей Y_{AB} и Y_{CA} и характерист дистанционных реле в плоскостях Z и Y. В плоскост характеристика получена путем смещения действите ной характеристики на величину сопротивления пер источника (20°|80°). Наклон диаметр соответствии с заданием принят рав 80°, а величина диаметра 60 *ом*. В рез тате обращения этой характеристики лучена характеристика реле в плоскости Последняя пересекает круговые граммы полных проводимостей в точ соответствующих углам срабатывания которые отсчитываются непосредстве на диаграмме. Результаты отсчета угло сведены в табл 5.

Для случая, когда поврежде отсутствует, круговые диаграммы (рис. строятся по формуле (42):

$$Y_I = 0{,}01\,|\underline{-80°}\left(1 - \frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_I}\right).$$

Наименьшие углы, при которых с батывают реле

$$\theta = \pm 124°\left(\text{при } \frac{E_{II}}{E_I} = 0{,}65\right),$$

$$\theta = \pm 120°\left(\text{при } \frac{E_{II}}{E_I} = 1 \text{ и } \frac{E_{II}}{E_I} = 1{,}3\right).$$

Пример 2. Линия электропередач большой протяженности соединяет д электрические системы. Вследствие н идентичности концевых трансформато электропередача в целом замещает несимметричным четырехполюсником, им ющим параметры:

$$A_{12} = 282\,|\underline{77°}\ ом,$$

$$A_{21} = 1{,}337 \cdot 10^{-6}\,|\underline{91°}\ \frac{1}{ом},\quad A_{22} = 0{,}769\,|\underline{3°}.$$

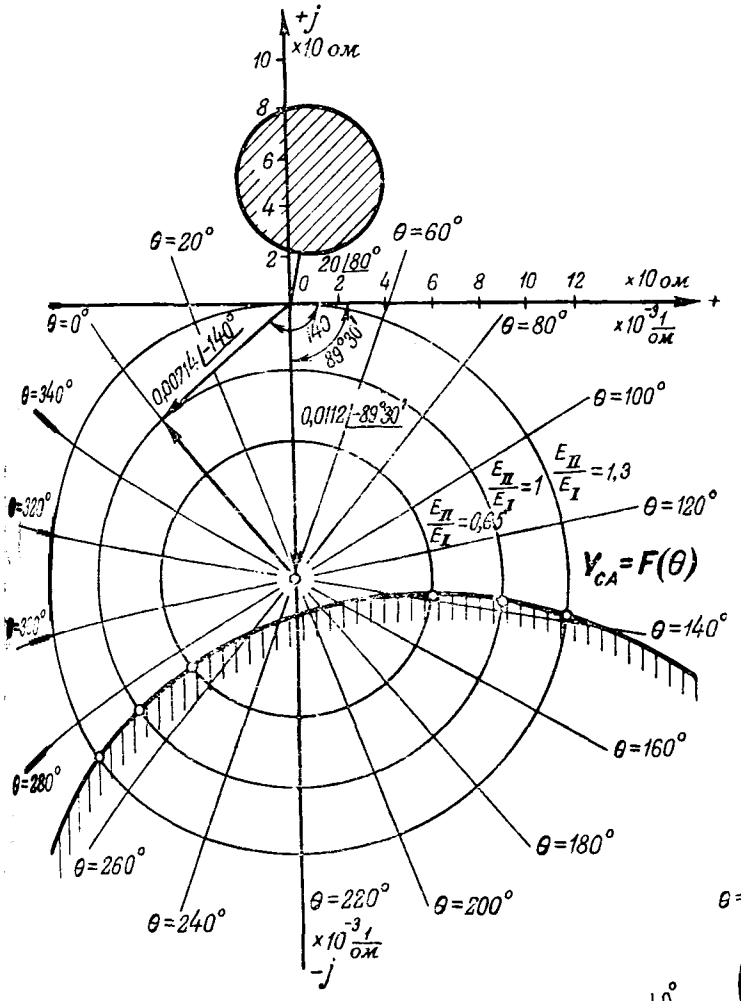


Рис. 3. Определение углов θ, при которых срабатывает направленное дистанционное реле фаз *CA* при двухфазном коротком замыкании между фазами *BC*.

Ввиду значительной мощности электрических систем сопротивлением источников можно пренебречь.

Требуется при $\frac{E_{II}}{E_I} = 1$ определить углы расхождения э. д. с., при которых наступает срабатывание направленных и ненаправленных дистанционных реле, установленных на передающем конце с низкой стороны трансформатора.

Предполагается, что при металлическом коротком замыкании зона действия защиты распространяется на всю электропередачу. Угол наклона диаметра характеристик направленных дистанционных реле $\delta' = 60°$.

Решение. Круговая диаграмма полных проводимостей на передающем конце при заданном соотношении строится в соответствии с (46) по формуле

$$\dot{Y}_1 = \frac{A_{22}}{A_{12}} - \frac{1}{A_{12}} \left| \underline{-\theta} = 0{,}00273 \right| \underline{-74°} - 0{,}00355 \left| \underline{-77°} - \theta. \right.$$

Согласно заданию конец вектора входного сопротивления при коротком замыкании на низкой стороне приемного конца передачи $Z_{к.з} = \frac{A_{12}}{A_{22}} = 367 \left| \underline{74°} \right.$ располагается на границе характеристик дистанционных реле.

Таблица 4

Результаты расчета двухфазного короткого замыкания

Искомые величины	$\dot{E}_{II} = 0$	$\dot{E}_I = \dot{E}_{II}$
$\frac{\dot{I}_1}{\dot{E}_I}$	$0{,}01214 \left\| \underline{-80°} \right.$	$0{,}00714 \left\| \underline{-80°} \right.$
$\frac{\dot{I}_2}{\dot{E}_I}$	$0{,}00214 \left\| \underline{-80°} \right.$	$0{,}00714 \left\| \underline{-80°} \right.$
Y_{AB}	$0{,}0112 \left\| \underline{-70°30'} \right.$	$0{,}00714 \left\| \underline{-20°} \right.$
Y_{CA}	$0{,}0112 \left\| \underline{-89°30'} \right.$	$0{,}00714 \left\| \underline{-140°} \right.$

Таблица 5

Углы θ, при которых срабатывают дистанционные реле

Фазы	$\frac{E_{II}}{E_I} = 0{,}65$	$\frac{E_{II}}{E_I} = 1$	$\frac{E_{II}}{E_I} = 1{,}3$
AB	220°>θ>90°	222°>θ>88°	121°>θ>90°
CA	271°>θ>140°	274°>θ>137°	271°>θ>138°

На рис. 5 представлены круговая диаграмма полных проводимостей и характеристики направленных и ненаправленных дистанционных реле в плоскостях *Z* и *Y*. Точки пересечения круговой диаграммы с характеристиками реле в плоскости *Y* определяют углы расхождения $\theta = 50°$ и $\theta = 77°$, при

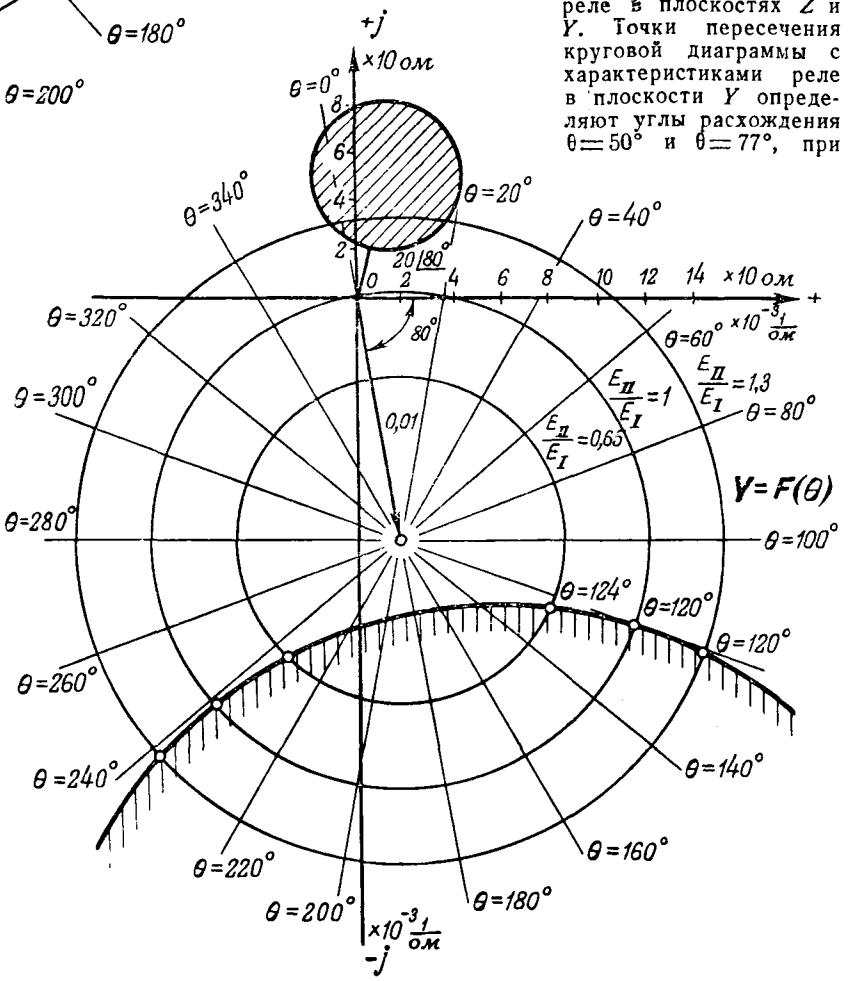


Рис. 4. Определение наименьших углов θ, при которых срабатывают направленные дистанционные реле при качаниях.

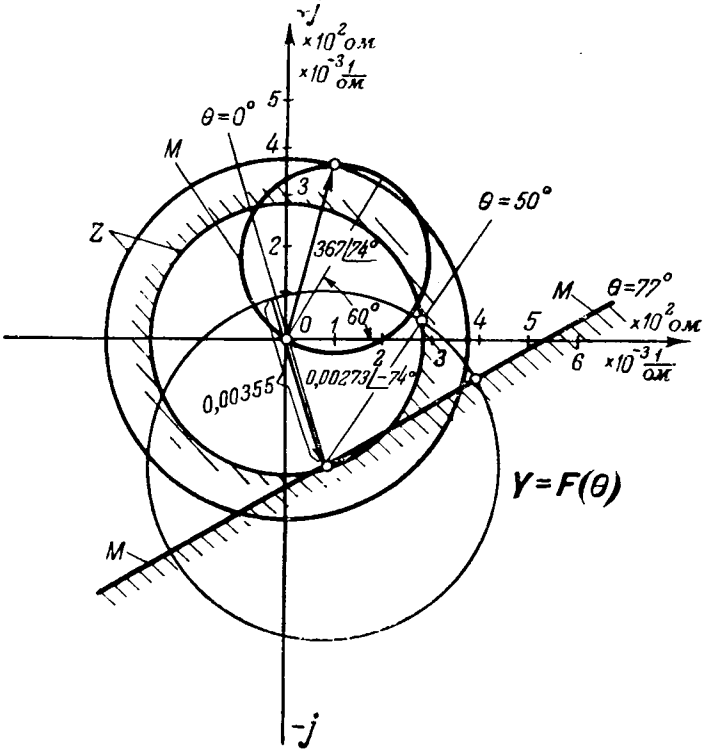


Рис. 5. Определение наименьших углов θ, при которых срабатывают направленные и ненаправленные дистанционные реле при качаниях.

M — характеристика направленного дистанционного реле; *Z* — характеристики ненаправленного дистанционного реле.

которых срабатывают ненаправленное и направленное дистанционные реле.

Приложение. *Расчетные выражения для случаев неполнофазных режимов работы электропередачи.* Ниже приведены расчетные выражения для двух случаев работы электропередачи: 1) с отключенной фазой *A* и 2) с отключенными фазами *B* и *C*, не сопровождающихся короткими замыканиями.

На основании известных комплексных схем замещения электропередачи для указанных режимов работы можно заключить, что симметричные составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательностей прямо пропорциональны разности э. д. с. эквивалентных источников по концам электропередачи. Поэтому в соответствии с табл. 3 выражения полных проводимостей на зажимах реле, включенных на э. д. с. источников, принимают вид:

$$Y_I = Y\left(1-\frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_I}\right) \text{ и } Y_{II} = Y\left(1-\frac{\dot{E}_I}{\dot{E}_{II}}\right).$$

Значения проводимостей *Y* указаны в табл. 6.

Табл.

Реле фаз	Разомкнута одна фаза (*A*)	Разомкнуты
AB	$\frac{Z_2 - a^2 Z_0}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0}$	$\frac{\sqrt{3}e^{-j}}{Z_1+Z_2-}$
BC	$\frac{Z_2 + 2Z_0}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0}$	0
CA	$\frac{Z_2 - aZ_0}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0}$	$\frac{\sqrt{3}e^{j}}{Z_1+Z_2+}$
A	$\frac{-k3Z_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0}$	$\frac{3(1+k)}{Z_1+Z_2+}$
B	$\frac{\sqrt{3}Z_0e^{j30°} + (1-a-ak3)Z_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0}$	$\frac{ak3}{Z_1+Z_2+}$
C	$\frac{\sqrt{3}Z_0e^{-j30°} + (1-a^2-a^2k3)Z_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0}$	$\frac{a^2k3}{Z_1+Z_2+}$

Здесь Z_1, Z_2, Z_0 — полные сопротивления пря обратной и нулевой последовательностей всей элек передачи, включая сопротивления эквивалентных ис ников.

Характеристики срабатывания дистанционных р в плоскости проводимостей получаются в резуль обращения характеристик, вычерченных в плоскости противлений и смещенных относительно начала коор нат на ΔZ.

Величины ΔZ для отправительного конца электро редачи указаны в табл. 7.

При равенстве сопротивлений прямой и обрат последовательностей эквивалентного источника ($Z_{II} \approx Z$ величина ΔZ для всех трех реле фаз *AB*, *BC* и *CA* ра сопротивлению прямой последовательности источни т. е. $\Delta Z = Z_{II}$.

Таблица 7

Реле фаз	Разомкнута одна фаза (*A*)	Разомкнуты две фазы (*B*, *C*)
AB	$\frac{Z_2Z_{II} + Z_0(Z_{II} + aZ_{2I})}{Z_2 - a^2Z_0}$	$\frac{e^{j30°}}{\sqrt{3}}(Z_{II} - aZ_{2I})$
BC	$\frac{Z_2Z_{II} + Z_0(Z_{II} + Z_{2I})}{Z_2 + 2Z_0}$	—
CA	$\frac{Z_2Z_{II} + Z_0(Z_{II} + a^2Z_{2I})}{Z_2 - aZ_0}$	$\frac{e^{-j30°}}{\sqrt{3}}(Z_{II} - a^2Z_{2I})$
A	$\frac{Z_0(Z_{2I} - Z_{II}) + Z_2(Z_{0I} - Z_{II})}{k3Z_2}$	$\frac{1}{3(1+k)}(Z_{II} + Z_{2I} + Z_{0I})$
B	$\frac{Z_0(a^2Z_{II} - aZ_{2I}) + Z_2(a^2Z_{II} - Z_{0I})}{-j\sqrt{3}Z_0 + (a^2 - 1 - k3)Z_2}$	$\frac{1}{k_3}(a^2Z_{II} + aZ_{2I} + Z_{0I})$
C	$\frac{Z_0(aZ_{II} - a^2Z_{2I}) + Z_2(aZ_{II} - Z_{0I})}{j\sqrt{3}Z_0 + (a - 1 - k3)Z_2}$	$\frac{1}{k3}(aZ_{II} + a^2Z_{2I} + Z_{0I})$

◇ ◇ ◇

Литература

1. Р. С. Зурабов. Исследова влияния качаний на работу релей защиты. Электричество, № 12, 1934.

2. Н. Н. Щедрин. Токи коро го замыкания высоковольтных сис (методы вычисления). ОНТИ, 1935.

3. А. Б. Барзам. Основные со ношения электрических величин и ведение релейной защиты при ка ниях. Электрические станции, № 4, 19

4. Edith Clarke, Impedan Seen by Relays during Power Swi with and without Faults, AIEE Tra т. 64, стр. 372 — 384, 1945.

5. A. R. van C. Warringt Graphical Method for Estimating Performance of Distance Relays dur Faults and Power Swings, AIEE Tra т. 68, ч. I, стр. 608 — 620, 1949.

6. Г. И. Атабеков. Релей защита высоковольтных сетей. Г энергоиздат, 1949.

[5. 6. 1

Компенсация уравнительных токов в замкнутых контурах высоковольтных сетей

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

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Дается простой метод определения коэффициентов трансформации регулировочного трансформатора. Исследуется вопрос о наивыгоднейшем месте установки регулировочного трансформатора. Дается сравнительная оценка эффективности регулировочного трансформатора и продольной компенсации индуктивности линии.

Введение. Включение параллельно линиям 110 *кв* линий 220 *кв* обусловливает появление в сетях замкнутых контуров. Отношения реактивных сопротивлений ветвей этих контуров к активным по своей величине значительно отличаются друг от друга. Наивыгоднейшее токораспределение в таких контурах может быть обеспечено установкой регулировочных трансформаторов.

Однако до настоящего времени не было выработано методов настолько простых, чтобы с их помощью можно было не только выбирать параметры регулировочных трансформаторов, но и осуществлять регулирование во время эксплуатации, при непрерывно изменяющихся нагрузках сети. Настоящая статья представляет попытку восполнить этот пробел [1].

Контуры с двумя узлами. При заданной величине притекающего к контуру тока I потери в контуре достигают минимальной величины, если этот ток распределяется в ветвях контура обратно пропорционально их активным сопротивлениям.

Для контуров с двумя узлами (рис. 1,*а*) при соблюдении этого условия минимум потерь получается равным:

$$\Delta P_{мин} = I^2 \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \qquad (1)$$

Любое другое токораспределение в контуре может быть представлено равенствами

$$\dot{I}_1' = \dot{I}\frac{r_2}{r_1+r_2} + \dot{I}_y \text{ и } \dot{I}_2' = \dot{I}\frac{r_1}{r_1+r_2} - \dot{I}_y,$$

где $\dot{I}_y$ — вектор произвольной величины, расположенный под произвольным углом θ к вектору $\dot{I}$.

Таким образом, токи в ветвях контура в нашем случае могут быть представлены как совокупность токов, распределенных обратно пропорционально активным сопротивлениям ветвей, и циркулирующего по контуру уравнительного тока $\dot{I}_y$.

Совмещая ток $\dot{I}$ с осью вещественных и раскладывая ток $\dot{I}_y$ на составляющие, получим:

$$\Delta P = I_1'^2 r_1 + I_2'^2 r_2 =$$

$$= \left[\left(I\frac{r_2}{r_1+r_2} + I_y\cos\theta\right)^2 + (I_y\sin\theta)^2\right] r_1 +$$

$$+ \left[\left(I\frac{r_1}{r_1+r_2} - I_y\cos\theta\right)^2 + (I_y\sin\theta)^2\right] r_2 =$$

$$= I^2\frac{r_1 r_2}{r_1+r_2} + I_y^2(r_1+r_2). \qquad (2)$$

Из равенств (1) и (2) видно, что потери ΔP всегда больше, чем $\Delta P_{мин}$, на величину $I_y^2(r_1+r_2)$. Это объясняется наличием уравнительного тока, вызывающего добавочные потери, иногда очень значительные по величине.

Для уменьшения или полного уничтожения добавочных потерь необходимо уменьшить или полностью уничтожить уравнительный ток. Это можно сделать двумя способами: 1) включением в контур дополнительной э. д. с., создающей

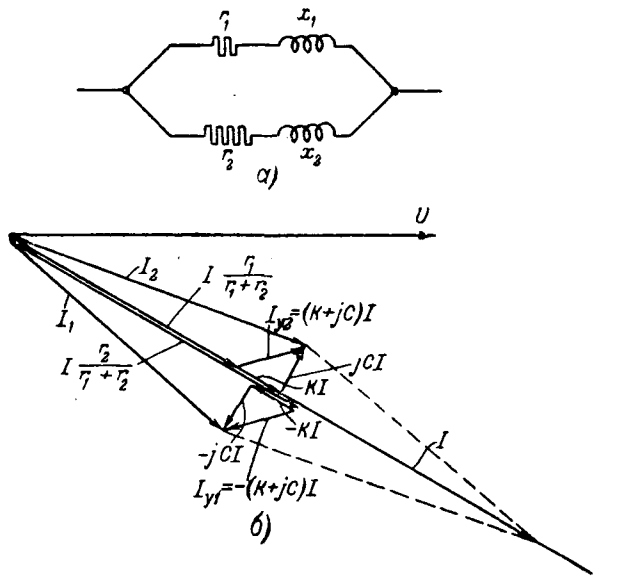


Рис. 1.

[1] После отправки статьи в редакцию автор узнал, что одновременно с ним и независимо от него кандидат техн. наук, доц. Ф. П. Лашков пришел к аналогичным выводам по вопросам упрощения методики определения параметров регулировочных трансформаторов.

ток, компенсирующий уравнительный ток контура (установка регулировочных трансформаторов); 2) изменением параметров сети в сторону сближения отношений $\frac{x}{r}$ в ветвях контура (включение реактора в ветвь с малым x или конденсатора в ветвь с большим x).

В настоящей статье рассматривается только первый способ, второй же затрагивается лишь в той мере, в какой это необходимо для сравнительной оценки эффективности регулировочных трансформаторов и последовательно включенных конденсаторов.

В общем случае выражения для токов в параллельных ветвях контура с двумя узлами могут быть записаны в следующем виде, весьма облегчающем решение поставленных в настоящей работе задач:

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}\frac{r_2}{r_1+r_2} - K\dot{I} - jC\dot{I}, \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}\frac{r_1}{r_1+r_2} + K\dot{I} + jC\dot{I}, \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

где

$$C = \frac{x_1 r_2 - r_1 x_2}{(r_1+r_2)^2 + (x_1+x_2)^2}, \qquad (4)$$

$$K = C\frac{x_1+x_2}{r_1+r_2}. \qquad (5)$$

Векторная диаграмма токов в контуре с двумя узлами представлена на рис. 1, *б*.

Компенсация уравнительных токов в контурах с двумя узлами. Рассмотрим, как влияет на компенсацию уравнительных токов направление вектора дополнительной э. д. с. При этом допустим, что дополнительная э. д. с. создается генерирующим источником, не имеющим потерь.

Если вектор напряжения U направить по оси вещественных, то при продольном включении дополнительной э. д. с. вектор обусловленного ею тока $\dot{I}_к$ будет лежать во II и IV квадрантах. Что касается вектора уравнительного тока, то его направление зависит от того, активной или реактивной составляющей притекающего к контуру тока он обусловлен.

В случае, когда притекающий к контуру ток является чисто активным, вектор уравнительного тока в соответствии с равенствами (3) расположится в I и III квадрантах и будет перпендикулярен вектору тока $\dot{I}_к$ (рис. 2, *а*). Следовательно, продольное включение э. д. с. не только не уменьшает потерь, а, наоборот, приводит к их увеличению.

Действительно, при отсутствии дополнительной э. д. с. потери

$$\Delta P = I_a^2 r_э,$$

где I_a — притекающий к контуру активный ток;
$r_э$ — вещественная часть комплекса

$$Z_э = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1+Z_2}.$$

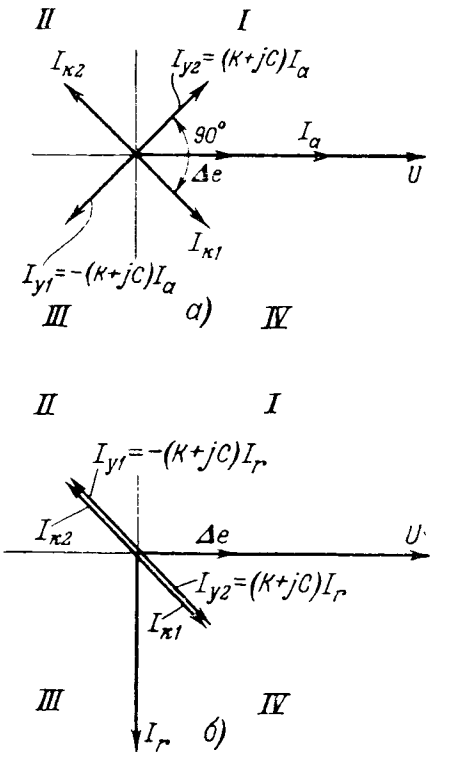


Рис. 2.

При наличии дополнительной э. д. с. поте

$$\Delta P_1 = \left[\left(I_a\frac{r_2}{r_1+r_2} - KI_a + I_{ка}\right)^2 + (CI_a + I_{кг})^2\right]r_1 + \left[\left(I_a\frac{r_1}{r_1+r_2} + KI_a - I_{ка}\right)^2 + (CI_a + I_{кг})^2\right]r_2 = I_a^2 r_э + I_к^2(r_1+r_2),$$

т. е. больше, чем ΔP, на величину $I_к^2(r_1+r_2)$.

Иначе обстоит дело, если из сети притек реактивный ток. Вектор обусловленного им ур нительного тока, как видно из рис. 2, *б*, ле на той же оси, что и вектор тока $\dot{I}_к$. Вследст этого ток $\dot{I}_к$ в зависимости от того, как он правлен, будет увеличивать или уменьш уравнительный ток.

Если величину дополнительной э. д. с. от гулировать так, чтобы контурный ток был ра по величине и противоположен по знаку ур нительному току, то потери в контуре дост нут относительного минимума и станут равн

$$\Delta P = I_a^2 r_э + I_r^2\frac{r_1 r_2}{r_1+r_2}.$$

При включении дополнительной э. д. с. п углом 90° к вектору напряжения $\dot{U}$ имеет мес совершенно аналогичная картина, но толь по отношению к другим составляющим то В этом случае контурные токи, будучи распол жены в I и III квадрантах, вызывают дополн тельные потери, если из сети притекает толь

активный ток; уменьшают или увеличивают потери, если из сети притекает активный ток. Относительный минимум потерь наступает и компенсации уравнительных токов, обусловленных активной составляющей притекающего тока. Потери при этом

$$\Delta P = I_a^2 \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} + I_r^2 r_3.$$

Для полной компенсации уравнительных токов, обусловленных как активной, так и реактивной составляющими притекающего тока, необходимо, чтобы включенная в контур дополнительная э. д. с. создавала контурный ток, равный по величине и противоположный по знаку уравнительному току контура

$$\dot{I}_к = -\dot{I}_y = (K + jC)\dot{I}. \qquad (6)$$

Величина и направление дополнительной э. д. с. определяются из равенства

$$\dot{\Delta e} = \dot{I}_к (Z_1 + Z_2) = (K + jC)\dot{I}[(r_1 + r_2) + j(x_1 + x_2)] = j\frac{x_1 r_2 - r_1 x_2}{r_1 + r_2}\dot{I} = jM\dot{I}, \qquad (7)$$

$$M = \frac{x_1 r_2 - r_1 x_2}{r_1 + r_2}.$$

Таким образом, для полной компенсации уравнительных токов вектор дополнительной э. д. с. должен быть перпендикулярен вектору притекающего к узлу тока и, следовательно, расположен под углом 90°—φ к вектору напряжения U (продольно-поперечное регулирование). Потери при этом снижаются до своего абсолютного минимума и становятся равными:

$$\Delta P_{мин} = (I_a^2 + I_r^2)\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Уместно отметить, что это правило, будучи введено в общем виде, в равной степени справедливо как по отношению к контурам с преобладающими реактивными сопротивлениями (воздушные сети), так и по отношению к контурам с преобладающими активными сопротивлениями (кабельные сети).

Выражения (6) и (7) весьма удобны для регулирования токораспределения во время эксплуатации. Дело в том, что коэффициенты K, C и M зависят только от параметров контура и потому для каждого конкретного случая их численные величины могут быть найдены заранее.

Если разложить ток I на активную и реактивную составляющие и учесть, что активная и реактивная мощности пропорциональны соответствующим токам, то формула (7) перепишется следующим образом:

$$\dot{\Delta e} = jM\dot{I} = MI_r + jMI_a = M_1 Q + jM_1 P. \qquad (7а)$$

Установив ваттметры активной и реактивной мощностей с шкалами, градуированными соответственно коэффициенту M_1, можно путем непосредственных отсчетов получать величину дополнительной э. д. с. по продольной и поперечной осям.

Влияние места установки регулировочного трансформатора. В реальных сетях дополнительная э. д. с. создается не генерирующим источником, а регулировочным трансформатором, в связи с чем возможность практического применения выведенных формул нуждается в дополнительной проверке.

Нетрудно установить, что они будут вполне справедливы лишь при условии, если все сопротивления расположены по одну сторону регулировочного трансформатора и если ток, притекающий к находящемуся с этой стороны узлу, известен. В тех случаях, когда сопротивления расположены по разные стороны трансформатора или известен ток, притекающий к противоположному узлу, эти формулы не вполне точны.

Чтобы установить необходимые поправки, рассмотрим схему рис. 3,*а*. Предположим, что потери в трансформаторе настолько незначительны, что ими можно пренебречь. Таким образом, передаваемая мощность до и после трансформатора остается неизменной.

Для схемы рис. 3, *а* точное значение наивыгоднейшего коэффициента трансформации трансформатора K может быть найдено совместным решением уравнений

$$\dot{U}_B + \dot{I}_2 Z_2 = \dot{U}_B K + \frac{\dot{I}_1}{K} Z_1, \quad \frac{\partial \Delta P}{\partial I_{a2}} = 0; \quad \frac{\partial \Delta P}{\partial I_{r2}} = 0,$$

где

$$\Delta P = I_2^2 r_3 + \frac{I_1^2}{K^2} r_1,$$

$$\dot{I}_2 = I_{a2} - jI_{r2}$$

и

$$\dot{I}_1 = (I_a - I_{a2}) - j(I_r - I_{r2}).$$

Однако для практических целей такой путь неприемлем, он приводит к необходимости решать уравнения 4-й степени. К тому же и нет необходимости в получении совершенно точного решения, так как погрешности все равно неизбежны из-за неточности измерительных приборов, зависимости r_1 и r_3 от температуры и т. д. Кроме того, необходимо учесть, что кривая потерь вблизи минимума идет весьма полого.

Анализ показал, что значение Δe, найденное по формуле (7), приводит к крайне незначительному увеличению потерь по сравнению с минимумом и, следовательно, никаких поправок в формулу (7) практически вносить не следует.

Результаты примерного расчета, выполненного для схемы рис. 3,*а*, представлены на рис. 4 в виде кривой $\Delta P = f(\Delta e)$, построенной для одного и того же наивыгоднейшего значения поперечной составляющей Δe. На оси абсцисс отложены значения продольной составляющей Δe.

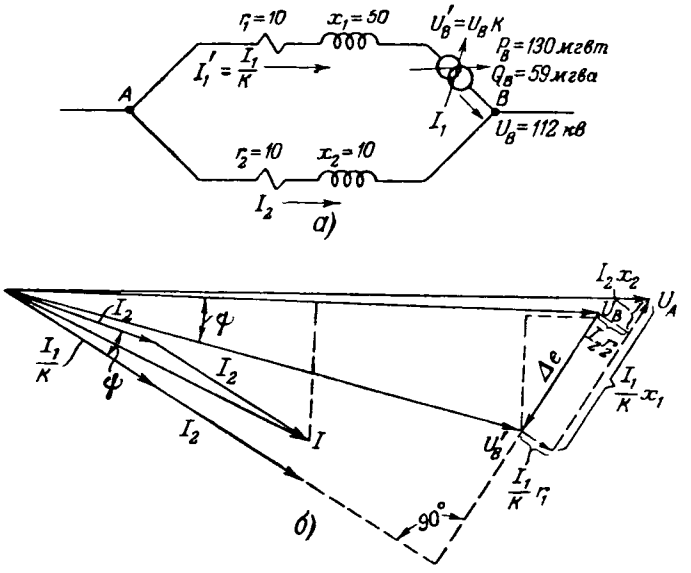


Рис. 3.

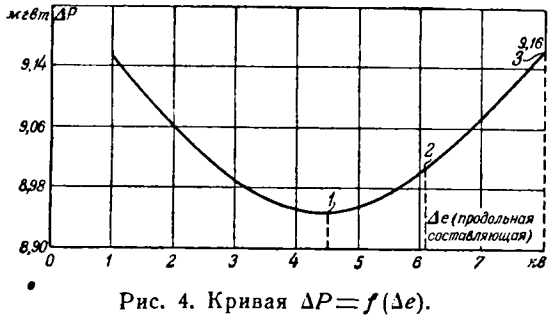


Рис. 4. Кривая $\Delta P = f(\Delta e)$.

1 — $\dot{\Delta e} = 4{,}5 + j13{,}4$, при котором получается минимум потерь $\Delta P = 8{,}95$ *мгвт*, $\frac{\dot{I}_1}{K} = 319 - j143$, $\dot{I}_2 = 347 - j236$, $\frac{\dot{I}_1}{K} + \dot{I}_2 = 666 - j379$; *2* — $\dot{\Delta e} = 5{,}06 + j13{,}4$, полученное по формуле (7), $\Delta P = 9{,}01$ *мгвт*, $\frac{\dot{I}_1}{K} = 327 - j168$, $\dot{I}_2 = 343 - j219$, $\frac{\dot{I}_1}{K} + \dot{I}_2 = 670 - j387$; *3* — $\dot{\Delta e} = 7{,}95 + j13{,}4$, при котором токи распределяются обратно пропорционально активным сопротивлениям ветвей, $\Delta P = 9{,}16$ *мгвт*, $\frac{\dot{I}}{K} = 337 - j198$, $\dot{I}_2 = 336 - j199$, $\frac{\dot{I}_1}{K} + \dot{I}_2 = 673 - j397$.

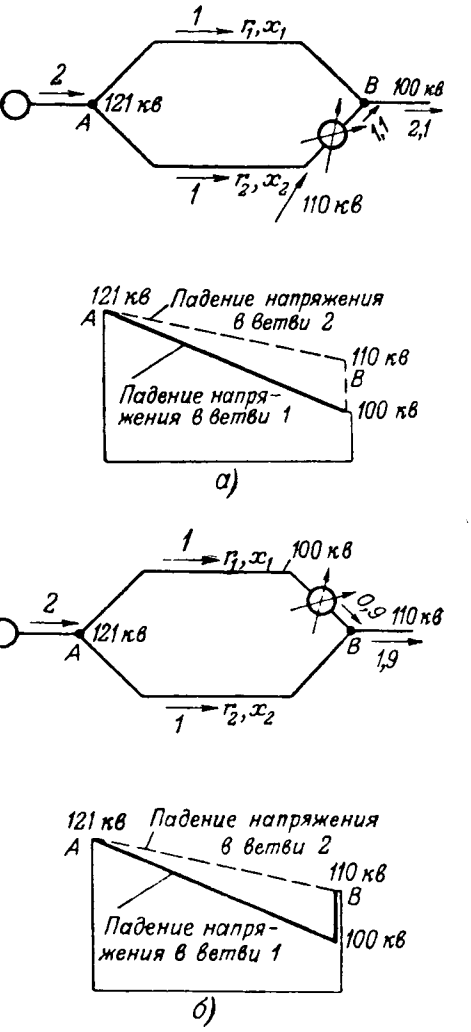


Рис. 5.

Интересно отметить, что потери при $\dot{\Delta e}$, найденном по формуле (7), получаются меньшими, чем при $\dot{\Delta e}$, при котором токи в контуре распределяются обратно пропорционально активным сопротивлениям ветвей. Объясняется это следующим обстоятельством. Чтобы токи в контуре распределились обратно пропорционально активным сопротивлениям ветвей, необходимо продольную составляющую $\dot{\Delta e}$ принять равной 7,95 *кв* вместо 6,06 *кв*, что ведет к понижению U_B' (рис. 3,*б*) и, следовательно, к увеличению суммарного тока в линиях (673—*j* 397 вместо 670—*j* 387). В результате невыгодное, казалось бы, распределение токов при $\dot{\Delta e}$, найденном по формуле (7), с избытком компенсируется меньшим значением суммарного тока в линиях. Этим же обстоятельством объясняется и тот факт, что минимум потерь наступает при меньшем значении $\dot{\Delta e}$. Выражение для него им сложный вид и не определяется правилом об ной пропорциональности между токами и ак ными сопротивлениями ветвей.

Перейдем к рассмотрению вопроса о в какой точке замкнутого контура наибо целесообразно установить регулировочный тр форматор. Предположим, что напряжение правного конца линии равно предельно допу мому, например, 121 *кв* при напряжении 110 *кв*.

При установке трансформатора в в с меньшим отношением x к r наивыгодне токораспределение достигается в том слу если трансформатор создает дополнительное дение напряжения, т. е. является понизитель Наоборот, устанавливая трансформатор в в с большим отношением x к r, необход чтобы он был повысительным, т. е. осуществ подъем напряжения.

При расположении трансформатора у пр ного узла (узел B) токи, протекающие в ве схемы, как это явствует из рис. 5, одинак независимо от того, в какую ветвь вклю

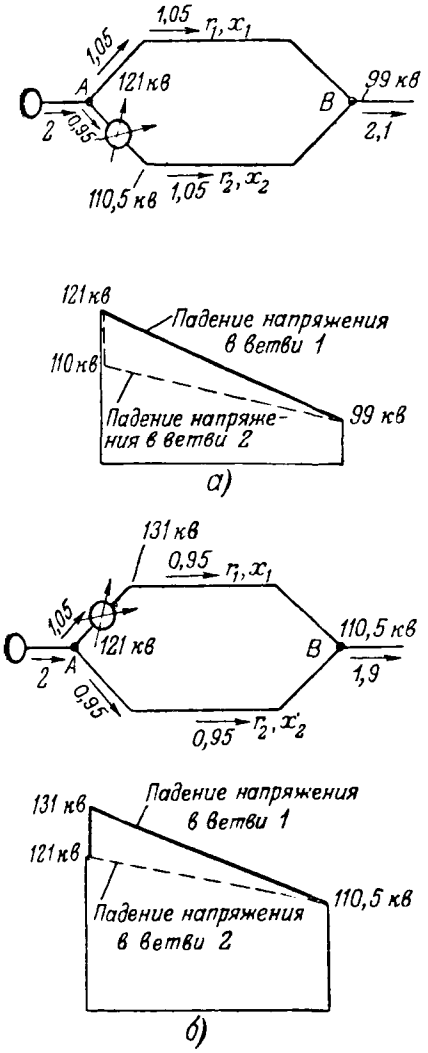


Рис. 6.

нсформатор[2], а следовательно, одинаковы и тери в контуре.

В схеме рис. 5,*б* напряжение в узле *B* равно) *кв*, в схеме же рис. 5,*а* — только 100 *кв*. к отмечалось, это не влияет на потери в рассматриваемом контуре. Но если в узел *B* включены также и другие линии, то наличие более сокого напряжения будет снижать токи в них следовательно, снижать потери. Вследствие го вариант, представленный на рис. 5,*б*, слеет предпочесть варианту рис, 5,*а*.

Следует, однако, отметить, что если напряие на приемном конце определяется падением пряжения в других линиях, то меньшие потери дут иметь место при схеме рис. 5,*а*, так как и схеме рис. 5,*б* пришлось бы в этом случае изить напряжение отправного конца.

Рассмотрим теперь случай, когда регулировочный трансформатор установлен у отправного нца (узел *A*).

Установка трансформатора в ветви с меньим отношением x к r приводит только к тому, о снижение напряжения произойдет не в конце

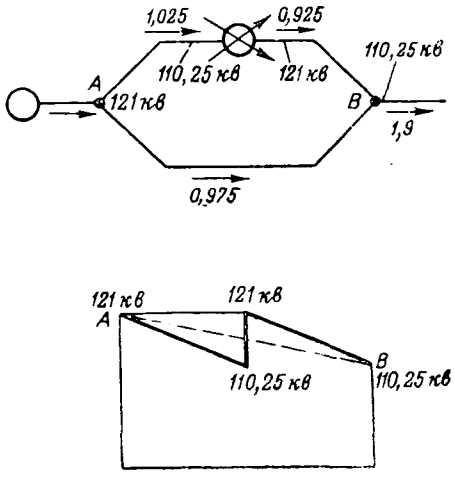


Рис. 7.

линии, а в начале ее, что вызовет прохождение бо́льших токов по линии и, следовательно, увеличение потерь (рис. 6,*а*). Установка же трансформатора в ветви с большим отношением x к r невозможна, так как это приведет к повышению напряжения выше предельно-допустимого (рис. 6,*б*)[3].

Теоретически наиболее выгодно установить трансформатор в той точке ветви с бо́льшим отношением x к r, где можно было бы поднять напряжение до предельно-допустимого (рис. 7). Однако установка трансформатора в середине линии неудобна, так как требует дополнительного оборудования, обслуживающего персонала, помещений и вспомогательного хозяйства.

На основании изложенного в нормальных условиях должна быть рекомендована установка трансформатора по схеме рис. 5,*б*. Но в целях снижения первоначальной стоимости трансформатора следует учесть еще номинальное напряжение и номинальную пропускную способность (мощность) трансформатора, которые также зависят от места установки (особенно в контурах с несколькими узлами). Поэтому окончательное решение должно приниматься на основании технико-экономического сравнения вариантов.

Компенсация уравнительных токов в контурах с произвольным количеством узлов. На рис. 8,*а* представлен замкнутый контур, имеющий 4 узла. Токораспределение в контуре не нарушится, если его разрезать в узле *A*, т. е. представить в виде линии с двусторонним питанием (рис. 8,*б*).

Для такой линии распределение токов, соответствующее минимуму потерь, может быть выражено следующим уравнением:

$$I_1 = I_{н2}\frac{r_2+r_3+r_4}{R} + I_{н3}\frac{r_3+r_4}{R} + I_{н4}\frac{r_4}{R}, \qquad (8)$$

где

$$R = r_1 + r_2 + r_3 + r_4.$$

[2] В схеме рис. 5 $r_1 = r_2$, $\frac{x_1}{r_1} > \frac{x_2}{r_2}$.

[3] В схемах рис. 6 $r_1 = r_2$, $\frac{x_1}{r_1} > \frac{x_2}{r_2}$.

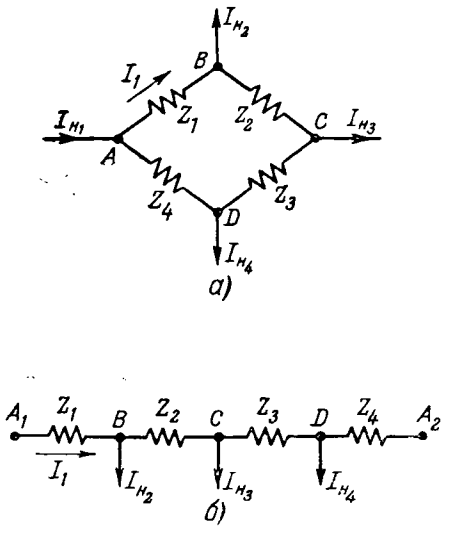


Рис. 8.

При наличии трансформатора с продольно-поперечным регулированием токораспределение в схеме подчиняется следующему уравнению:

$$\dot{U}_{A1}-\dot{U}_{A2}=\dot{I}_1(Z_1+Z_2+Z_3+Z_4)-$$
$$-\dot{I}_{н2}(Z_2+Z_3+Z_4)-\dot{I}_{н3}(Z_3+Z_4)-\dot{I}_{н4}Z_4,$$

откуда

$$\dot{I}_1=\frac{\dot{U}_{A1}-\dot{U}_{A2}}{Z}+\dot{I}_{н2}\frac{Z_2+Z_3+Z_4}{Z}+\dot{I}_{н3}\frac{Z_3+Z_4}{Z}+$$
$$+\dot{I}_{н4}\frac{Z_4}{Z}, \qquad (9)$$

где

$$Z=Z_1+Z_2+Z_3+Z_4.$$

При равенстве выражений (8) и (9) токораспределение будет соответствовать минимуму потерь. Таким образом,

$$\frac{\dot{U}_{A1}-\dot{U}_{A2}}{Z}+\dot{I}_{н2}\frac{Z_2+Z_3+Z_4}{Z}+\dot{I}_{н3}\frac{Z_3+Z_4}{Z}+$$
$$+\dot{I}_{н4}\frac{Z_4}{Z}=\dot{I}_{н2}\frac{r_2+r_3+r_4}{R}+\dot{I}_{н3}\frac{r_3+r_4}{R}+\dot{I}_{н4}\frac{r_4}{R}.$$

Это равенство позволяет определить необходимую дополнительную э. д. с.

$$\dot{\Delta e}=\dot{U}_{A1}-\dot{U}_{A2}=$$
$$=j\frac{(r_2+r_3+r_4)x_1-r_1(x_2+x_3+x_4)}{R}\dot{I}_{н2}+$$
$$+j\frac{(r_3+r_4)(x_1+x_2)-(r_1+r_2)(x_3+x_4)}{R}\dot{I}_{н3}+$$
$$+j\frac{r_4(x_1+x_2+x_3)-(r_1+r_2+r_3)x_4}{R}\dot{I}_{н4}=$$
$$=j\sum_{m=1}^{n}\frac{r_{1m}x_{IIm}-r_{IIm}x_{1m}}{R}\dot{I}_m=$$
$$=j\sum_{m=1}^{n}M_m\dot{I}_m, \qquad (10)$$

где r_{1m}, r_{IIm}, x_{1m} и x_{IIm} — активные и реактивные сопротивления (плечи) от точки включения нагрузки $\dot{I}_m$ до точек A_1 и A_2.

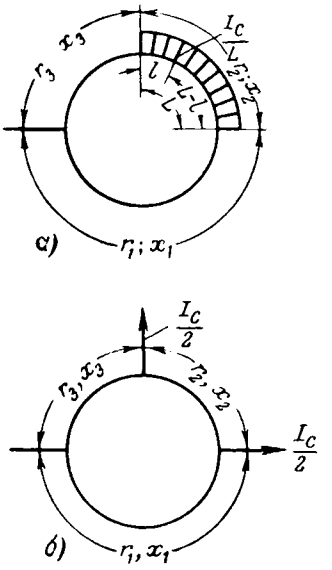


Рис. 9.

Величина и направление компенсирующего тока определяются из равенства

$$\dot{I}_к=\frac{\dot{\Delta e}}{Z}=\sum_{m=1}^{m=n}(K_m+jC_m)\dot{I}_m.$$

При желании учесть емкостную проводимость сети следует к нагрузочным токам в узлах добавить (алгебраически) токи $\frac{I_C}{2}$, где I_C — емкостный ток линии, соединяющей данные узлы. Возможность этого вытекает из следующего равенства, составленного применительно к рис.

$$\dot{I}_к=\int_0^L(K_l+jC_l)\frac{\dot{I}_C}{L}ldl=$$
$$=\frac{1}{R^2+X^2}\left(\frac{X}{R}+j\right)\frac{\dot{I}_C}{2}\{[x_1(r_2+r_3)-r_1(x_2+x_3)]+$$
$$+[(x_1+x_2)r_3-(r_1+r_2)x_3]\}=\Sigma(K+jC)\frac{\dot{I}_C}{2}.$$

Рассматривая источники питания, как нагрузки с отрицательными знаками, можно считать равенства (10) и (11) обобщенными выражениями компенсирующего тока и генерирующей ею э. д. с. для любого контура с произвольным числом узлов и вне зависимости от места установки регулировочного трансформатора. Равенства (10) и (11) показывают, что к замкнутым контурам с несколькими узлами может быть применен принцип наложения, что значительно упрощает расчет. При наличии заранее вычисленных коэффициентов K_m, C_m и M_m равенства (10) и (11) дают возможность получить величину компенсирующего тока или генерирующей ею э. д. с. при различных изменениях нагрузок путем проведения самой элементарной операции: сложения нескольких величин.

Простота полученных формул дает возможность при частых изменениях нагрузок автоматизировать процесс компенсации.

Сравнительная оценка эффективности регулировочных трансформаторов и последовательно включаемых конденсаторов. Представляет интерес дать сравнительную оценку эффективности компенсации уравнительных токов помощью компенсации индуктивности линий. Расчет эффективности регулировочных трансформаторов и последовательно включенных конденсаторов произведен применительно к схеме рис. 10. Результаты расчета сведены в таблицу.

Сравнение показало следующее:

1. Продольная компенсация снижает потери активной мощности в контуре в большей степени, чем установка регулировочных трансформаторов. Объясняется это тем, что последняя увеличивает ток в линиях (рис. 5,*б*), в то время как установка конденсаторов величины тока не меняет. Чем больше разность напряжений до и после трансформатора, тем больше и экономия, получаемая при продольной компенсации. Поэтому при $\cos\varphi = 1$ и, следовательно, при необходимости одного только поперечного регулирования экономия почти отсутствует, но она резко возрастает с понижением коэффициента мощности.

2. Продольная компенсация резко уменьшает потери реактивной мощности в контуре. Установка регулировочных трансформаторов, наоборот, приводит к их увеличению, что объясняется вытеснением тока из ветви с относительно большим r и малым x в ветвь с относительно малым r и большим x.

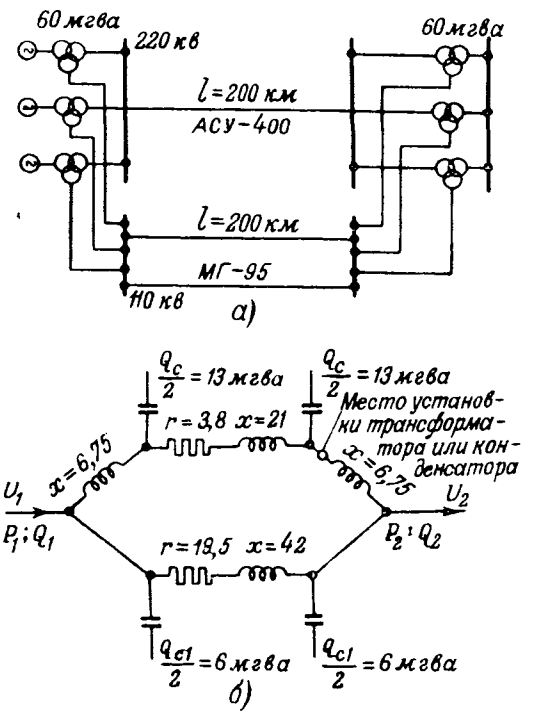


Рис. 10.

а — исходная расчетная схема; *б* — упрощенная схема замещения.

Установка конденсаторов имеет и другие положительные стороны (повышается устойчивость параллельной работы, наивыгоднейшее токораспределение обеспечивается при изменениях на-

Компенсирующее устройство	$P_в$, мгвт	$\cos\varphi_в$	$Q_в$, мгва	U_1, кв	$U_в$, кв	Потери активной мощности, мгвт	Потери реактивной мощности, мгва	$\cos\varphi_1$
Отсутствует	135	1,0	0	121	116,0	6,79	26,94	Опереж. 0,995
Регулировочный трансформатор					117,9 / 118,2*	4,23	33,54	Опереж. 0,999
Продольная компенсация					118,2	4,23	9,33	Опереж. 0,980
Отсутствует	135	0,95	44,5	121	108	7,97	31,67	0,967
Регулировочный трансформатор					115,25 / 110*	4,92	38,55	0,953
Продольная компенсация					115,5	4,50	9,87	0,993
Отсутствует	135	0,90	65,3	121	103,6	9,39	37,17	0,915
Регулировочный трансформатор					114,0 / 104,3*	5,97	45,39	0,890
Продольная компенсация					114,3	4,98	10,89	0,965
Отсутствует	135	0,85	83,7	121	99,4	11,22	44,49	0,855
Регулировочный трансформатор					112,8 / 98,4*	7,17	53,91	0,820
Продольная компенсация					113,0	5,59	12,27	0,928

* В знаменателе дано напряжение до трансформатора.

грузки без всякого вмешательства со стороны). Но она имеет, конечно, и отрицательные стороны.

В настоящее время нет возможности дать полную сравнительную оценку обоих рассмотренных способов. Но высокая эффективность статических конденсаторов при коэффициентах мощности, меньших чем 0,95, требует тщательного изучения вопроса о целесообразности их применения для компенсации паразитных токов в замкнутых контурах.

Выводы. 1. Токи, протекающие в замкнутых контурах, могут быть представлены, как совокупность токов, распределенных обратно пропорционально активным сопротивлениям ветвей и циркулирующего по контуру уравнительного тока.

2. Продольное регулирование напряжения, обычно не требующее установки специальных регулировочных трансформаторов (могут быть использованы регулировочные устройства на повысительных или понизительных трансформаторах), позволяет компенсировать уравнительный ток, обусловленный одной только реактивной составляющей нагрузочных токов.

3. Величины напряжений по продольной и поперечной осям, необходимые для компенсации уравнительных токов, обусловленных как ак ной, так и реактивной составляющими нагру ных токов, могут быть определены по след щей простейшей формуле:

$$\dot{\Delta e} = j \sum_{m=1}^{m=n} M_m (I_{am} - jI_{rm}),$$

где M_m — численные величины, зависящие то от параметров контура.

Простота этого выражения позволяет только осуществлять ручное регулирование время эксплуатации, но и автоматизировать цесс регулирования при частых изменениях грузок сети.

4. Наивыгоднейшее место регулировоч трансформатора в контуре определяется ря условий, детальный анализ которых дол производиться в каждом конкретном случае

5. Высокая эффективность продольной пенсации при нагрузках с относительно нев ким коэффициентом мощности требует тщат ного изучения вопроса о целесообразно применения такого способа компенсации у нительных токов в замкнутых контурах.

[29.

✧ ✧ ✧

Работа синхронной неявнополюсной машины при постоянных значениях напряжения и возбуждения

Кандидат техн. наук, доц. В. В. ЕНЬКО

Московский горный институт им. Сталина

Предложено графическое построение диаграммы тока насыщенной синхронной неявнополюсной машины при постоянстве напряжения и возбуждения. Активное сопротивление обмотки якоря не учитывается. Изложено пользование диаграммой. Дан аналитический расчет диаграммы. Предложен способ определения точки диаграммы, соответствующей пределу статической устойчивости. Проведен анализ изменения диаграммы тока в зависимости от величин рассеяния и реакции якоря, от возбуждения и напряжения. Показано, что реальная машина имеет диаграмму овальной формы, которая может быть апроксимирована эллипсообразным овалом или эллипсом. Также показано, что геометрические места векторов результирующей э. д. с. воздушного зазора и напряжения на зажимах в случае работы с внешней индуктивностью представляют кривые, подобные диаграмме тока. Отмечено методическое значение диаграммы тока.

Режим синхронной машины при постоянстве возбуждения и напряжения на зажимах характеризуется диаграммой тока и вытекающими из нее угловыми характеристиками активной и реактивной мощностей. Диаграмма тока этого режима излагается в специальных курсах электрических машин [Л.1] или в специальных главах общих курсов [Л. 2]. В упомянутых источниках рассматривается ненасыщенная машина. При этих условиях диаграммой тока неявнополюсной машины (как без учета активного сопротивления обмотки статора, так и с учетом сопротивления) является окружность.

Положенное в основу условие линейности характеристики холостого хода ограничивает область применения кр говых диаграмм си хронными двигателя малой мощности. Д мощных синхронных ш шин и, в частности, д турбогенераторов и си хронных быстроходны двигателей это услови неприемлемо. С друг стороны, для синхронны машин большой мощ ности влияние активно сопротивления статорн обмотки на диаграм тока статического р жима совершенно незначительно и это вли ние можно не учитывать. Диаграмма тока н явнополюсной насыщенной машины без уче активного сопротивления статора изложена в ку се Рихтера [Л. 3]. Настоящая работа представля дальнейшее углубление этого вопроса, и в не развиты те общие положения, которые были и

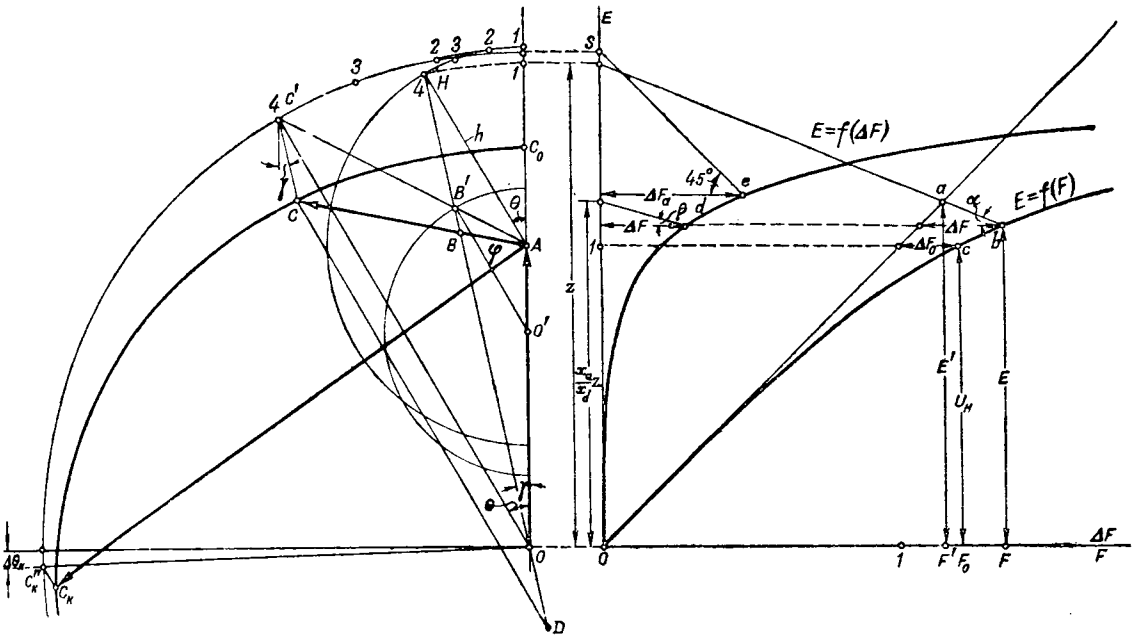


Рис. 1.

ожены автором в докладе на кафедре электрических машин Московского энергетического института в феврале 1950 г.

На рис. 1 изображена характеристика холостого хода в относительных величинах.

В качестве относительных единиц приняты оминальное напряжение и соответствующая н. с. о прямолинейной характеристике.

Масштаб по осям координат выбран одинаовым, так что абсциссы прямолинейной характеристики равны ординатам. Разность абсцисс о криволинейной и прямолинейной характеристикам определяет добавочную н. с. ΔF при аличии насыщения.

В основу построения и анализа диаграммы тока ложена „обобщенная" векторная диаграмма 3.4.], в которой отличие насыщенной машины ненасыщенной учитывается только введением ектора добавочной н. с. $\Delta\dot{F}$. Активное сопротивение не учитывается и принимается, что $x_q = x_d$. изическая картина режима машины определяется отношением н. с. $\dot{F}_q + \dot{F}_a = \dot{F}$. Намагничивающая сила реакции якоря F_a не зависит от насыщения и в обобщенной диаграмме численно вна Ix_a, где $x_a = x_d - x_\sigma$ для ненасыщенной машины. Результирующая F разделена на две составляющие, соответствующие машине без насыщения (воздушный зазор) и насыщению стальных участков магнитной цепи. Первая составляющая численно равна результирующей э.д.с. E. нтер не дал графического построения потому, о в диаграмме Потье вектор $j\dot{I}x_\sigma$ относительно мал и построение должно быть неточным. обобщенной диаграмме параметр x_d остается стоянным, что позволяет вместо вектора $j\dot{I}x_\sigma$ льзоваться значительно большим вектором $j\dot{I}x_d$. роме того, построение уточняется совмещением на чертеже треугольников н. с., э. д. с. и применением вместо характеристики холостого хода кривой $E = f(\Delta F)$.

В настоящей работе дано определение максимального значения активного тока и соответствующего ему критического угла, рассмотрен случай работы через внешнюю реактивность, намечены пути исследования диаграммы для динамического режима и показана возможность практически приемлемой апроксимации. Серия диаграмм тока, построенных при постоянном напряжении для нескольких значений возбуждения, является универсальной рабочей диаграммой синхронной неявнополюсной машины и подобно круговой диаграмме асинхронной машины позволяет построить все важнейшие характеристики[1].

Поэтому диаграмма тока с учетом насыщения имеет большое практическое значение как для эксплуатации, так и при расчетах в электрических системах.

На рис. 1 обозначено: $\overline{OA} = \dot{U}$ — напряжение на зажимах; $\overline{OB'} = \dot{E}'$ — э. д. с., индуктируемая результирующим потоком в воздушном зазоре при отсутствии насыщения; $\overline{OB} = \dot{E}$ — то же при наличии насыщения; $\overline{OC'} = \dot{F}_в$ — н. с. обмотки возбуждения (одна и та же для ненасыщенной и насыщенной машины), повернутая на $+\frac{\pi}{2}$; $\overline{AC'} = j\dot{I}'x_d$ — для ненасыщенной машины; $\overline{AC} = j\dot{I}x_d$ — то же для насыщенной машины.

На рис. 1 $\triangle OAC'$ представляет диаграмму ненасыщенной машины. Проведем $\overline{AH}$ параллельно $\overline{OC'}$ до пересечения с продолжением OB' в точке H. Очевидно, $\angle C'OA = \angle HOC_0 = \angle\theta$.

[1] Ранее были предложены рабочие диаграммы в форме зависимости $P_r = f(P_a)$ в пределах cos φ от 0 до 1 [Л.5. . .8].

Треугольники AHB' и $OC'B'$ подобны вследствие параллельности их сторон.

Из подобия этих треугольников следует:

$$\frac{AB'}{C'B'}=\frac{HB'}{B'O}=\frac{AH}{OC'}=\frac{x_\sigma}{x_a},$$

откуда

$$OH=OB'+B'H=E'+F'\frac{x_\sigma}{x_a}=z. \qquad (1)$$

При $z=пост$ равенство (1) можно рассматривать как уравнение прямой $E'=f(F')$, пересечение которой с прямолинейной характеристикой холостого хода в точке a определяет значения E' и F' (рис. 1). Множитель $\frac{x_\sigma}{x_a}$ — угловой коэффициент уравнения прямой (1) $\frac{x_\sigma}{x_a}=\operatorname{tg}\alpha$.

При наличии насыщения и неизменных значениях возбуждения $F_в$ и угла θ равновесие н. с. будет достигнуто при увеличенном значении результирующей н. с. F и уменьшенных значениях результирующей э. д. с. E и реакции якоря Ix_a.

Точка B' (рис. 1) переместится в точку B, и сторона OC' переместится параллельно самой себе в положение DC.

Так как $C'C$ параллельно BD, то $\frac{AB}{BC}=\frac{AB'}{B'C'}=\frac{x_\sigma}{x_a}$. Треугольники AHB и DCB подобны вследствие параллельности их сторон. Из подобия этих треугольников следует:

$$\frac{AB}{CB}=\frac{HB}{DB}=\frac{AH}{CD}=\frac{x_\sigma}{x_a},$$

откуда

$$OH=OB+BH=E+\frac{x_\sigma}{x_a}F=z, \qquad (1a)$$

Зная z, можно определить E и F пересечением прямой (1а) и кривой характеристики холостого хода насыщенной машины (рис. 1, точка пересечения b).

При изменении режима угол θ будет изменяться и точка C' опишет окружность радиуса $OC'=F_в$. Так как $\overline{AC}'=jI'x_d$, то геометрическое место точки C' представит в определенном масштабе диаграмму тока ненасыщенной машины. Диаграмма тока насыщенной машины, очевидно, определится геометрическим местом точки C, которая опишет некоторую кривую, напоминающую эллипс или эллипсообразный овал.

Вышеизложенное позволяет весьма просто, графически, по точкам построить диаграмму тока насыщенной неявнополюсной машины.

Построение диаграммы тока. Из точки A проводим дугу окружности радиусом $h=AH=\frac{x_\sigma}{x_a}F_в$, а из точки O — дугу окружности радиусом $OC'=F_в$. На каждой окружности на чаем ряд соответствующих точек $1,1$; $2,2$ и соответственно одинаковым значениям у (например, 10°, 20° и т. д.). Соединяя на координат O с точками $1, 2$ и т. д. на ма окружности получаем ряд значений $OH=z$

Дальнейшее построение понятно на рис

В этом построении наибольшего вним требует операция определения E и F. Ее мо облегчить и одновременно значительно уточни если предварительно нанести на рис. 1 кри $E=f(\Delta F)$ и определять ΔF непосредственно ресечением этой кривой с прямой, проведен под углом β к оси абсцисс. Отрезок на ординат и угловой коэффициент определя из (1а) следующим образом:

$$z=\ +\frac{x}{x_a}r=\frac{d}{x_в}E+\frac{x_\sigma}{x_a}\Delta F,$$

откуда

$$z=E+\frac{x_\delta}{x_a}\Delta F.$$

x_d

Следовательно, на оси ординат необходи откладывать $\frac{x_a}{x_d}z$ и проводить прямую под угл $\beta=\operatorname{arctg}\frac{x_\sigma}{x_d}$ до пересечения в точке d с кри $E=f(\Delta F)$.

Если постоянное значение напряжения по держивается не на зажимах генератора, а в н которой точке системы, с которой генерато связан через внешнюю реактивность $x_{вн}$, то пр построении диаграммы вместо x_σ следует брат сумму $x_\sigma+x_{вн}$, которую сокращенно обозначи x_σ, но будем подразумевать указанную сумм Внешним активным сопротивлением пренебр гаем.

На рис. 2 представлены диаграммы ток турбогенератора Т2-100-2 при возбуждениях соответствующих холостому ходу, половинно и полной нагрузке, рассчитанные по нормаль ной характеристике. На рис. 3 приведены диа граммы этого генератора при работе через внеш нюю реактивность, равную 0,42.

Пользование диаграммой тока. Пользовани диаграммой тока понятно из рис. 2. Отмети только некоторые особенности. Пересечение линии AC с диаграммами тока дает соответ ствующие значения I при различных возбужде ниях и $\cos\varphi=пост$. Эти значения определяю регулировочную характеристику $F_в=f(I)$ при U $\cos\varphi=пост$. Поэтому линия AC может бы названа „линией регулировочной ха рактеристики".

Имея ряд диаграмм тока при различны возбуждениях, можно построить регулировочну характеристику и обратно, имея ряд регулиро вочных характеристик для различных значени $\cos\varphi$, можно построить диаграммы тока. Эти путем можно получить диаграмму тока с уче том насыщения и активного сопротивлени

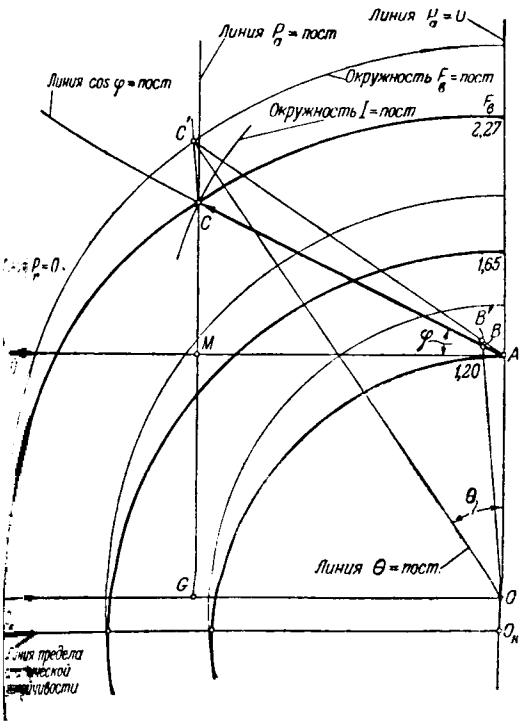


Рис. 2.

— линия постоянной активной мощности. пересечения этой линии с диаграммами тока различных $F_в$ определяют известную V-об- ую характеристику $I=f(F_в)$ при $U, P_a=пост$. тому линия CG может быть названа „ли- й V-образной характеристики". Имея ряд диаграмм тока, можно построить бразные характеристики с учетом насыщения тивного сопротивления. Если задан угол θ, проводя линию OC' под этим углом к OA, чим точку C' и можем определить I и φ. этого соединяем точки C' и A прямой, де- AC' в отношении $\frac{AB'}{B'C'} = \frac{x_\sigma}{x_a}$ и соединяем O прямой. Из точки C' проводим прямую, аллельную $\overline{OB'}$, до пересечения с соответ- ющей диаграммой тока в точке C. Ряд то- C', соответствующих различным значениям ов θ, определяет угловые характеристики ивной и реактивной мощностей. Поэтому ность $F_в=пост$ может быть названа ружностью угловых характери- тик".

Для определения угла θ по заданной точке C упаем в обратном порядке.

Аналитический расчет диаграммы тока. Из рис. 1 о, что координаты произвольной точки диаграммы насыщенной машины могут быть выражены следую- образом:

$$x = F_в \sin\theta - \Delta F \sin\gamma, \tag{3}$$

$$y = F_в \cos\theta - \Delta F \cos\gamma. \tag{4}$$

ства (3) и (4) представляют уравнение диаграммы в параметрической форме с параметром θ. Члены

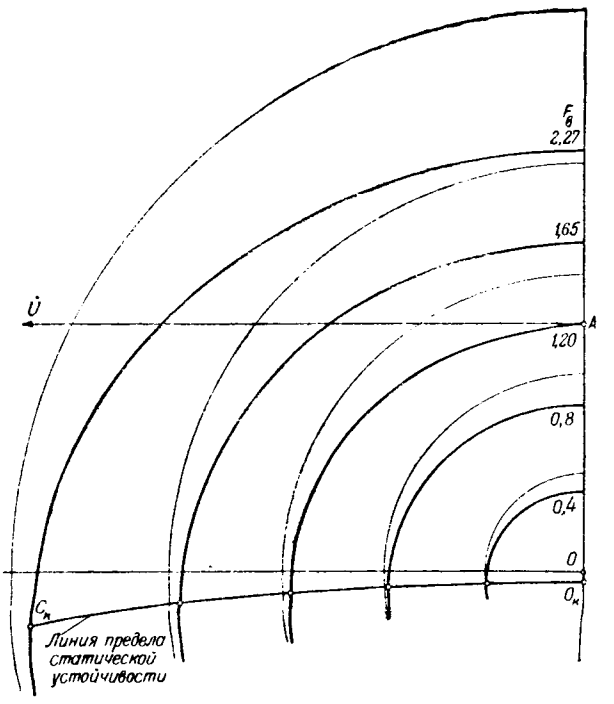


Рис. 3.

$\Delta F \sin\gamma$ и $\Delta F \cos\gamma$ являются функциями θ. По правилу синусов и рис. 2 имеем:

$$\frac{AH}{\sin\gamma} = \frac{OH}{\sin\theta} \quad \text{или} \quad \frac{h}{\sin\gamma} = \frac{z}{\sin\theta}, \quad \sin\gamma = \frac{h}{z}\sin\theta \tag{5}$$

по правилу косинусов:

$$z^2 = U^2 + h^2 + 2Uh\cos\theta \text{ или } z = \sqrt{U^2 + h(h + 2U\cos\theta)}. \tag{6}$$

Величина z при наличии характеристики холостого хода определяет F и E, а следовательно, и ΔF.

Если характеристика задана аналитически, например

$$E = \frac{AF}{B+F}, \tag{7}$$

то ΔF может быть определена также аналитически.

Решая совместно (7) и (1а) с исключением F, получим:

$$E = \frac{p}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - Az}. \tag{8}$$

Здесь для сокращения обозначено:

$$p = A + \frac{x_\sigma}{x_a}B + z. \tag{9}$$

Заменив в (1а) F на $E + \Delta F$, решаем относительно ΔF:

$$\Delta F = \frac{x_a}{x_\sigma}(z - E) - E. \tag{10}$$

Величины тока I и $\cos\varphi$ могут быть непосредственно определены по координатам x, y произвольной точки диаграммы тока:

$$I = \frac{1}{x_d}\sqrt{x^2 + (y-U)^2}, \tag{11}$$

$$\cos\varphi = \frac{x}{Ix_d}. \tag{12}$$

При аналитическом расчете диаграммы тока удобнее исходить не из угла θ, а из э. д. с. E.

Наибольшее значение активной составляющей тока и критическое значение угла Θ. Построив диаграмму тока для диапазона угла Θ от 0 до 180°, получим непосредственно из рисунка наибольшее значение активной составляющей тока и соответствующее критическое значение угла $\Theta_к$. Однако точность определения $\Theta_к$ невелика, потому что в области значений угла Θ 85°...95° изменение активной составляющей тока незначительно. Поэтому предлагается следующий способ.

Наибольшее значение абсциссы x точки C получится из (3) по общему правилу определения максимума и минимума

$$\frac{dx}{d\Theta} = F_в \cos\Theta - \frac{d(\Delta F \sin\gamma)}{d\Theta} = 0. \qquad (13)$$

Рассмотрим функцию $(\Delta F \sin\gamma) = f(\Theta)$.

Для построения этой функции выделим часть рис. 1, именно малую окружность радиуса h и определим ряд значений $z = OH' \ldots OH''$, начиная от $\Theta = \frac{\pi}{2}$ и выше. На рис. 4 сделано соответствующее построение для нескольких значений угла

$$\Delta\Theta = \Theta - \frac{\pi}{2}.$$

Для каждого значения z определяем ΔF, и в увеличенном в k раз масштабе откладываем на соответствующих направлениях $\bar{z} = \overline{OH}$. Например, для $\Theta = \frac{\pi}{2}$, $\gamma = \gamma'$, $\bar{z} = \overline{OH'}$, $ON = \Delta F' k$.

Очевидно,

$$\Delta F' \sin\gamma' = \frac{ON \sin\gamma'}{k} = \frac{RS}{k}.$$

В диапазоне $\Delta\Theta$ от 0 до 0,1 кривые $(\Delta F \sin\gamma) = f(\Delta\Theta)$ весьма близко совпадают с прямыми. Поэтому производная $\frac{d(\Delta F \sin\gamma)}{d\Theta}$ может быть принята постоянной и выражена тангенсом угла наклона этих прямых:

$$\frac{d(\Delta F \sin\gamma)}{d\Theta} \approx -\frac{\Delta F'' \sin j'' - \Delta F' \sin\gamma'}{\Delta\Theta''} = \operatorname{tg}\delta. \qquad (14)$$

На рис. 4, очевидно, $\operatorname{tg}\delta = \frac{ST}{k\Delta\Theta''}$. Подставляем (14)

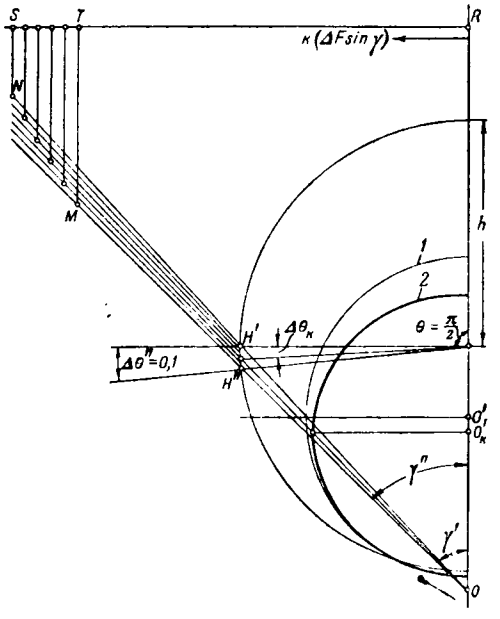


Рис. 4.

в (13), заменяем $\cos\Theta = \sin\left(\Theta - \frac{\pi}{2}\right) = \sin\Delta\Theta \approx \Delta\Theta$ и решаем относительно $\Delta\Theta$:

$$\Delta\Theta_к \approx \sin\Delta\Theta_к = \frac{\operatorname{tg}\delta}{F_в}.$$

Наибольшее значение абсциссы $x_к$, определяющей наибольшее значение активной составляющей тока, получается подстановкой в (3) $\Theta = \Theta_к = \frac{\pi}{2} + \Delta\Theta_к$:

$$x_к = F_в \cos\Delta\Theta_к + \Delta F_к \sin\gamma_к.$$

Значения $\Delta F_к$ и $\sin\gamma_к$ определяются по $z_к$, которое вычисляется по (6) или определяется графически при $\Theta = \Theta_к$. Ордината точки $C_к$ определится подстановкой в (4) $\Theta = \frac{\pi}{2} + \Delta\Theta_к$:

$$-y_к = F_в \sin\Delta\Theta_к + \Delta F_к \cos\gamma_к.$$

Вышеизложенное доказывает, что насыщенная машина может устойчиво работать при угле $\Theta > 90°$ (однако наибольшее значение активной мощности будет все же ниже, чем для машины ненасыщенной). Физически это объясняется тем, что с увеличением угла Θ степень насыщения уменьшается, чем обусловлено большее увеличение реакции якоря по сравнению с постоянным намагничением, а следовательно, и тока и его активной составляющей. Это увеличение в области $\Theta \approx 90°$ превалирует над влиянием изменения фазы н. с. возбуждения F, смещает критический угол на несколько градусов. Однако при дальнейшем увеличении угла Θ влияние изменения фазы $F_в$ становится преобладающим и, несмотря на увеличение тока его, активная составляющая уменьшается.

Анализ диаграммы тока. Форма кривой диаграммы тока определяется характеристикой холостого хода. Однако при одной и той же характеристике форма диаграммы будет различна в зависимости от возбуждения, напряжения и параметров $x_э$ и x_a.

Рассмотрим два предельных случая:

1. $x_э = 0$. В этом случае $\angle\gamma = 0$, $h = 0$, $z = U = пост$. Откладывая по оси ординат характеристики холостого хода $z = U$ и проводя прямую под углом $\operatorname{arc\,tg}\frac{x_э}{x_a} = \ldots$, получим точку пересечения c и величину $\Delta F = F_0 - \ldots$. Вследствие этого во всем диапазоне изменения угла $\Delta F = \Delta F_0 = пост$. Здесь ΔF_0 обозначает добавочное возбуждение холостого хода (рис. 1) и характеризует „основное насыщение".

Диаграмма для случая $x_э = 0$ представлена на рис. окружностью, данной пунктиром. Наибольшее значение активной составляющей тока и критическое значение угла Θ при $x_э = 0$ определяется по (11) подстановкой $\sin\gamma = 0$, последующим дифференцированием и приравниванием производной нулю:

$$x = F_в \sin\Theta, \qquad (1$$

$$\frac{dx}{d\Theta} = F_в \cos\Theta = 0. \qquad (1$$

Из (18) и (19) определяется:

$$\Theta_к = \frac{\pi}{2} \text{ и } x_к = F_в.$$

Отсюда следует, что наибольшее значение активной составляющей тока и критическое значение угла $\Theta_к$ машины без рассеяния равны таковым у ненасыщенной машины и совершенно не зависят от абсолютного значения насыщения. Однако соответствующее значение тока I и угла сдвига фаз φ у насыщенной машины без рассеяния больше, чем у ненасыщенной, что непосредственно вытекает из (4), (11) и (12), а также из рис. 5.

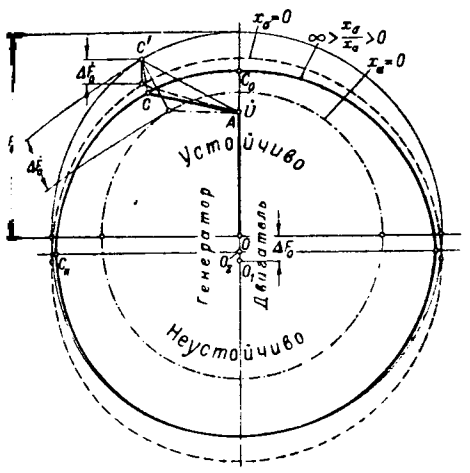


Рис. 5.

С физической точки зрения этот вывод должен быть объяснен тем, что результирующая н. с. остается постоянной по величине и фазе, так как $\dot{U}=пост$, и поэтому насыщение влияет только на реактивную составляющую тока.

2. $x_a=0$. В этом случае $\angle\gamma=\angle\Theta$, $h=\infty$ и $z=\infty$, $\frac{z}{h}=\infty$. Поэтому для определения ΔF уже нельзя пользоваться характеристикой холостого хода. Величина ΔF может быть определена по кривой $E=f(\Delta F)$. При этом, как было выше указано, по оси ординат надо отложить $\frac{x_a}{x_d}z$. В рассматриваемом случае $\frac{x_a}{x_d}z=0\infty$, что представляет выражение неопределенного вида. Для раскрытия неопределенности используем выражение (6), заменяя $h=\frac{x_\sigma}{x_a}F_в$:

$$\lim_{x_a\to 0}\left(\frac{x_a}{x_d}z\right)=$$

$$=\sqrt{\left(\frac{x_a}{x_d}U\right)^2+\left(\frac{x_a x_\sigma}{x_d x_a}\right)^2F_в^2+2\left(\frac{x_a}{x_d}\right)^2\frac{x_\sigma}{x_a}F_в U\cos\Theta}=F_в. \tag{20}$$

Угол β наклона прямой (2) определится:

$$\lim_{x_a\to 0}\operatorname{tg}\beta=\frac{x_\sigma}{x_d}=1. \tag{21}$$

Отложив по оси ординат (рис. 1) $\frac{x_a}{x_d}z=F_в=OS$ и проводя прямую под углом 45° к осям координат до пересечения с кривой $E=f(\Delta F)$ в точке e, определим $\Delta F=\Delta F_a=пост$.

Диаграмма для этого случая представлена на рис. 5 окружностью (пунктир). Наибольшее значение активной составляющей тока и критическое значение угла Θ определяются из (11) подстановкой $\sin\gamma=\sin\Theta$ с последующим приравниванием производной нулю:

$$x=(F_в-\Delta F_a)\sin\Theta, \tag{22}$$

$$\frac{dx}{d\Theta}=(F_в-\Delta F_a)\cos\Theta=0, \tag{23}$$

$$\Theta_к=\frac{\pi}{2}\ ;\quad x_к=F_в-\Delta F_a.$$

Таким образом, критическое значение угла Θ насыщенной компенсированной ($x_a=0$) неявнополюсной машины то же, что и у ненасыщенной машины, а наибольшее значение активной составляющей тока меньше на $\Delta F_в$ (предполагается, что x_d компенсированной насыщенной машины равно x_d ненасыщенной). Отсюда следует, что насыщение особенно влияет на уменьшение активной составляющей тока при $x_a=0$.

Физически работа компенсированной синхронной машины определяется тем, что результирующий поток есть не что иное, как поток возбуждения, постоянный по величине, а создающая его н. с. связана в пространстве с продольной осью ротора.

При изменении $\frac{x_\sigma}{x_a}$ от 0 до ∞ диаграмма тока изменяется от окружности радиуса $F_в$ к овалу и снова к окружности радиуса $F_в-\Delta F_a$. Это изменение обусловлено соотношением влияния реакции якоря и насыщения, которое при $\frac{x_\sigma}{x_a}=\infty$ и при $\frac{x_\sigma}{x_a}=0$ с изменением режима остается постоянным, а при $\infty>\frac{x_\sigma}{x_a}>0$ меняется. При $\infty>\frac{x_\sigma}{x_a}>0$ диаграмма тока имеет форму овала, симметричного относительно оси ординат и несимметричного относительно любой линии, параллельной оси абсцисс. Если провести такую линию через точку $C_к$, то кривая диаграммы тока в пределах $\Theta=0$ до $\Theta=\pm\Theta_к$ весьма близко совпадает в зависимости от формы характеристики холостого хода с эллипсообразным овалом (кривая четвертого порядка) или с эллипсом. Центр O_2 этого эллипса лежит на оси ординат между центрами O_1 и O (рис. 5). Полуоси этого эллипса соответственно равны: $a=O_2C_к$, $b=O_2C_0$.

В заключение этого анализа отметим еще универсальность диаграммы тока. Диаграмма, построенная для машины, имеющей параметры x_σ и x_a, и при заданном возбуждении и напряжении будет действительна для всех других машин с другими значениями параметров, если только отношение $\frac{x_\sigma}{x_a}$ то же, что у исходной машины, а также одинаковы характеристика холостого хода и возбуждение (изменяется только масштаб).

Рассмотрим теперь влияние возбуждения на диаграмму тока, полагая, что U, $\frac{x_\sigma}{x_a}$ и характеристика холостого хода неизменны. При увеличении возбуждения степень насыщения с увеличением угла Θ изменяется в более широких пределах, что должно вызвать более значительное изменение тока. Из (6) видно, что с увеличением возбуждения значение z для заданного угла Θ возрастает, а при изменении Θ — изменяется в более сильной степени. Это означает, что с увеличением $F_в$ форма диаграммы тока становится все более вытянутой в направлении абсцисс или, иначе, полуось a увеличивается быстрее, чем полуось b. При увеличении возбуждения величина ΔF в области критического значения Θ возрастает и особенно увеличивается производная

$$\frac{d(\Delta F\sin\gamma)}{d\Theta}, \tag{14}$$

что вытекает из (5) и (6) и означает, что угол $\Theta_к$ с увеличением $F_в$ возрастает. На рис. 2 и 3 представлено геометрическое место точки $C_к$ в зависимости от возбуждения $F_в$. Это геометрическое место представляет линию предела статической устойчивости.

При уменьшении возбуждения до нуля диаграмма тока обращается в точку, которая, однако, в отличие от ненасыщенной машины не совпадает с началом координат O. При отсутствии возбуждения синхронная неявнополюсная машина не может развивать мощности, и точка $O_к$ является теоретической. Работа неявнополюсной машины без возбуждения возможна от синхронного двигателя. Тогда для насыщенной машины $Ix_d=AO_к$, в то время как для ненасыщенной $I'x_d=AO<AO_к$ (рис. 2).

Рассмотрим влияние напряжения U. Напряжение определяет „основное насыщение". Если $\frac{x_\sigma}{x_a}=0$, то напряжение непосредственно влияет на смещение окружности диаграммы тока. При $\frac{x_\sigma}{x_a}>0$ понижение U должно привести к уменьшению диапазона изменения степени

насыщения и к приближению диаграммы к окружности. Наибольшее значение активной составляющей тока и критическое значение угла Θ приближаются к таковым у ненасыщенной машины. Обозначим значение результирующей э. д. с., соответствующее пределу устойчивости $E_к$. При малых углах $\Delta\Theta_к$ эта э. д. с. приблизительно та же, что и при $\Theta=\frac{\pi}{2}$. Из (6) и (2) при этом для ненасыщенной машины

$$E_к=\frac{x_a}{x_d}\sqrt{U^2+h^2}. \qquad (24)$$

При практических соотношениях $\frac{x_a}{x_d}$ и $\frac{x_э}{x_a}$ и при возбуждении, соответствующем номинальной нагрузке, правая часть (24) мало отличается от U. Поэтому насыщение не влияет на значение максимального активного тока при снижении напряжения до значений, лежащих на прямолинейной части характеристики холостого хода.

Практические выводы из анализа диаграммы тока. 1. Форма диаграммы тока при постоянном напряжении на зажимах приближается к окружности с центром, расположенным ниже центра диаграммы ненасыщенной машины. Приближение к окружности тем больше, чем меньше рассеяние, возбуждение и напряжение. Чем больше приближение к окружности, тем меньше влияет насыщение на максимум активного тока и угол $\Theta_к$.

2. При работе через внешнюю индуктивность при постоянстве напряжения в некоторой точке системы диаграмма тока близко совпадает с эллипсообразным овалом или эллипсом. Насыщение в области предела устойчивости влияет сильно и тем более, чем выше возбуждение и напряжение и суммарное значение $x_э+x_{вн}$.

3. В условиях динамической устойчивости, когда машина приближается к компенсированной, диаграмма тока приближается к окружности с центром, совпадающим с центром диаграммы ненасыщенной машины. Влияние насыщения в области предела устойчивости особенно велико и тем больше, чем выше возбуждение и напряжение.

4. Диаграмма тока может быть с практически достаточной точностью апроксимирована эллипсом. Аналитическую зависимость удобнее всего выразить в полярных координатах, принимая вектор тока I за радиус-вектор, а угол φ—за полярный угол. Для расчета в области $\cos\varphi$ от 0 до 1 при постоянстве напряжения на зажимах (рабочая диаграмма) допустима апроксимация окружностью радиуса $F_в$, проведенной через точку режима с номинальным $\cos\varphi$.

Геометрическое место конца векторов $\dot{E}$ и $\dot{U}_г$. При изменении угла Θ точка B описывает овальную кривую, подобную кривой диаграммы тока, что следует из соотношения

$$\frac{AB}{CB}=\frac{x_э}{x_a}=пост.$$

Это соотношение выражает принцип делительного циркуля и пантографа и может быть названо коэффициентом подобия. Точка A является центром подобия.

Проведем $\overline{B'O'}$ параллельно $\overline{AH}$. Из подобия треугольников AHO и $O'B'O$ следует:

$$\frac{AH}{B'O'}=\frac{HO}{B'O}=\frac{x_d}{x_a}=пост.$$

Следовательно, $B'O'=\frac{x_a}{x_d}AH=\frac{x_э}{x_d}F_в$ представляет радиус окружности, являющейся геометрическим местом конца вектора $\dot{E}'$ ненасыщенной машины; центр окружности лежит на оси ординат в точке O'. На рис. 4 окружность *1* представляет геометрическое место конца вектора $\dot{E}'$ и овал *2*—конца вектора $\dot{E}$ насыщенной машины. Овал *2* может быть назван „диаграммой внутренней э. д. с.".

Если постоянное напряжение поддерживается системы, с которой генератор связан через в индуктивное сопротивление $x_{вн}$, то очевидно, что вектора напряжения $\dot{U}_г$ на зажимах генератора вает кривую, подобную диаграмме тока с коэффиц подобия $\frac{x_{вн}}{x_d}$.

Методическое значение диаграммы. Графи построение диаграммы тока должно явиться тем машнего задания для студентов электроэнергети и электромеханических факультетов, а также фак тов электрификации промышленности. Диаграмма быть дополнена линией постоянных потерь и д применяться как для турбогенераторов, так и для хронных быстроходных двигателей неявнополюсного

Полагая, что при учете активного сопроти обмотки статора диаграмма не изменится, можно вить еще линию потерь в меди статора и добав потерь и придать диаграмме полную универсальност

Приложение. Пример расчета диаграммы тока. считаем диаграмму тока турбогенератора Т2 $\cos\varphi=0{,}9$, $x_э=0{,}1$, $x_a=1{,}3$, работающего через в нюю индуктивность 0,42 на шины с постоянным на жением $U=1$ при возбуждении $F_в=1{,}65$.

Учитывая внешнюю индуктивность, вычисляем:

$$x_э=0{,}1+0{,}42=0{,}52,$$

$$x_d=1{,}3+0{,}52=1{,}82,$$

$$\frac{x_э}{x_a}=\frac{0{,}52}{1{,}3}=0{,}4,$$

$$\operatorname{tg}\zeta=\frac{x_э}{x_d}=\frac{0{,}52}{1{,}82}=0{,}286,$$

$$\frac{x_a}{x_d}=0{,}715,$$

$$h=\frac{x_э}{x_a}F_в=0{,}4\cdot1{,}65=0{,}66.$$

Задаем, например, $\Theta=30°$, $\sin\Theta=0{,}500$, $\cos\Theta=$ и вычисляем z по (6):

$$z=\sqrt{U^2+h(h+2U\cos\Theta)}=$$

$$=\sqrt{1+0{,}66(0{,}66+2\cdot0{,}866)}=1{,}610,$$

$$\frac{x_a}{x_d}z=0{,}715\cdot1{,}610=1{,}150.$$

Откладываем по оси ординат рис. 1 $\frac{x_a}{x_d}z=1{,}15$ проводя прямую под углом $\operatorname{arc\,tg}\zeta=0{,}286$, получаем точки пересечения с кривой $E=f(\Delta F)$, $\Delta F=0{,}23$. Д вычисляем по (5):

$$\sin\gamma=\frac{h}{z}\sin\Theta=\frac{0{,}66\cdot0{,}5}{1{,}610}=0{,}205,$$

$$\cos\gamma=0{,}979.$$

Координаты точки кривой диаграммы для задан угла $\Theta=30°$ определяются по (3) и (4):

$$x=F_в\sin\Theta-\Delta F\sin\gamma=$$

$$=1{,}65\cdot0{,}5-0{,}28\cdot0{,}205=0{,}768,$$

$$y=F_в\cos\Theta-\Delta F\cos\gamma=$$

$$=1{,}65\cdot0{,}866-0{,}28\cdot0{,}979=1{,}155.$$

торяем эти расчеты для ряда значений Θ от 0 до дин добавочный расчет для $\Theta = \frac{\pi}{2} + 0{,}1$. Результасчета сведены в таблицу:

	0°	30°	60°	90°	$\frac{\pi}{2}+0{,}1$
	0,000	0,500	0,866	1,000	0,995
	1,000	0,866	0,500	0,000	0,100
	1,660	1,610	1,447	1,198	1,142
z	1,186	1,150	1,038	0,856	0,817
	0,325	0,280	0,182	0,086	0,072
	0,000	0,205	0,395	0,551	0,575
	1,000	0,979	0,919	0,835	—
	0,000	0,768	1,358	1,603	—
	1,325	1,155	0,658	—0,072	—

ычисляем критический угол $\Theta_к = \frac{\pi}{2} + \Delta\Theta_к$ по (14)), полагая $\Delta\Theta'' = 0{,}1$:

$$\operatorname{tg}\delta = -\frac{\Delta F'' \sin\gamma'' - \Delta F' \sin\gamma'}{\Delta\Theta''} =$$

$$= -\frac{0{,}086 \cdot 0{,}551 - 0{,}72 \cdot 0{,}575}{0{,}1} = 0{,}060,$$

$$\Delta\Theta_к = \frac{\operatorname{tg}\delta}{F_в} = \frac{0{,}060}{1{,}650} = 0{,}036,$$

$$\Theta_к = \frac{\pi}{2} + 0{,}036 \text{ или } 90° + 2{,}06° = 92{,}06°,$$

$$\sin\Delta\Theta_к = \sin 0{,}036 = 0{,}036,$$

$$\cos\Delta\Theta_к = \cos 0{,}036 - 0{,}999.$$

еличина $\sin\gamma_к$ определится по (5); заменяя $\sin\Theta_к = \Delta\Theta_к$:

$$\sin\gamma_к = \frac{h}{z_к}\cos\Delta\Theta_к = \frac{0{,}66}{1{,}178} \cdot 0{,}999 = 0{,}560.$$

$$\cos\gamma_к = 0{,}829.$$

ределяется по (6), заменяя $\cos\Theta_к = -\sin\Delta\Theta_к$:

$$z_к = \sqrt{U^2 + h(h - 2U\sin\Delta\Theta_к)} =$$

$$= \sqrt{1 + 0{,}66\,(0{,}66 - 2 \cdot 0{,}036)} = 1{,}178.$$

Для определения $\Delta F_к$ целесообразно применить линейное интерполирование:

$\Delta\Theta$	ΔF	d
0,000	0,086	—0,014
36	—5	

$$\Delta\Theta_к = 0{,}036 \quad \Delta F_к = 0{,}081$$

Координаты точки, соответствующей наибольшему значению активной составляющей тока, определятся по (16) и (17):

$$x_к = F_в \cos\Delta\Theta_к - \Delta F_к \sin\gamma_к =$$

$$= 1{,}65 \cdot 0{,}999 - 0{,}081 \cdot 0{,}56 = 1{,}603,$$

$$-y_к = F_в \sin\Delta\Theta_к + \Delta F_к \cos\gamma_к =$$

$$= 1{,}65 \cdot 0{,}036 + 0{,}081 \cdot 0{,}829 = 0{,}126.$$

Как видно из предыдущего, при расчете с тремя десятичными знаками $x_к = x_{\Theta=90°}$.

Если рассчитать с четырьмя десятичными знаками, то получим:

$$x_к = 1{,}6038 \text{ и } x_{\Theta=90°} = 1{,}6027.$$

Приведенный расчет произведен для возбуждения, соответствующего 50% номинальной нагрузки. При номинальном возбуждении, соответствующем 100% нагрузки, критический угол $\Theta_к$ будет около 93,5°, а при 1,5-кратном—свыше 97°.

Литература

1. М. П. Костенко. Электрические машины, специальная часть. Госэнергоиздат, 1949.

2. Г. Н. Петров. Электрические машины, ч. 1, Госэнергоиздат, 1940.

3. Рихтер. Синхронные машины, стр. 161, ОНТИ, 1936.

4. В. В. Енько. Обобщенная векторная диаграмма и ее применение. Электричество, № 4, 1951.

5. Д. Е. Трофименко. Новый метод определения реактивной мощности генератора с электрическим ротором. Электрические станции, № 6, 1942.

6. Расчет электрического режима турбогенератора, Госэнергоиздат, 1945.

7. Г. И. Шерман. Эксплуатационная диаграмма синхронного генератора. Электричество, № 3, 1940.

8. Г. И. Шерман. Определение эксплуатационных характеристик синхронных генераторов с учетом насыщения. Электричество, № 5, 1949.

[25. 6. 1951]

◇ ◇ ◇

Опытное определение коммутационной реакции в электромашинных усилителях с поперечным полем и в машинах постоянного тока

Кандидат техн. наук, доц. М. И. АЛЯБЬЕВ

Ленинград

Излагаются три метода определения н. с. по поперечной оси реакции коммутирующихся секций якоря, основанные на различии знаков у н. с. в генераторном и двигательном режимах. В методе 1 генераторный и двигательный режимы нормальные. В методе 2 якорь питается током от посторонней цепи при двух направлениях вращения. В методе 3 генераторный режим — нормальный, а двигательный тот же, что и в методе 2. Скорость вращения в методах 2 и 3 принудительно фиксируется как в генераторном, так и в двигательном режимах приводным двигателем, чем и обеспечивается устойчивость работы агрегата при ослабленном поле в двигательном режиме.

В электромашинном усилителе с поперечным полем, который мы ради краткости ниже будем называть усилителем, имеются две пары щеток — поперечные $q-q$ и продольные $d-d$ (рис. 1) и соответственно два тока в якоре — поперечный I_q и продольный или рабочий ток I_d. При нагрузке имеются поэтому две коммутационные зоны и две н. с. реакции коммутационных токов F_{kd} и F_{kq}, действующие соответственно по продольной и поперечной осям.

Для улучшения коммутации рабочих щеток $d-d$ обычно ставят добавочные полюса (рис. 1), которые, приближая коммутацию к прямолинейной, уменьшают абсолютную величину F_{kd}. Так как, кроме того, F_{kd} действует по одной (поперечной) оси с относительно большой н. с. поперечной реакции якоря, созданной током I_q, то и относительная величина F_{kd} будет небольшой. По этим причинам влиянием коммутационной реакции рабочего тока I_d на характеристики усилителя в большинстве нормальных случаев его работы можно пренебречь.

В противоположность этому влиянием на характеристики н. с. F_{kq} — реакции коммутирующихся секций, замкнутых поперечными щетками, пренебречь нельзя. Это объясняется тем, что для облегчения усилителя добавочных полюсов в поперечной оси обычно не ставят, а для уменьшения продольной реакции тока якоря I_q щетки $q-q$ располагают, по возможности, ближе к нейтрали. Коммутация на поперечных щетках обычно получается замедленной, что вследствие небольшой величины н. с. обмотки управления ведет к весьма сильному ослаблению потока управления [Л. 1] и, следовательно, к значительному изменению характеристик.

Поэтому задача определения н. с. F_{kq} — коммутационной реакции поперечного тока якоря I_q в усилителе приобретает большую практическую важность. В последние годы опубликовано несколько методов расчетного определения н. с. реакции коммутационных токов [Л. 1 ... 6] в усилителях и машинах постоянного тока, которые, однако, дают сильно отличающиеся результаты.

В то же время, насколько известно автору, сих пор не было опубликовано ни одного прямого метода опытного определения н. с. реакции коммутационных токов, который позволил бы надежным образом оценить и скорректировать расчетные методы. Ниже предлагаются методы, позволяющие при тщательном выполнении опыта достаточно точно определить значения н. с. коммутационно реакции поперечного тока.

Метод 1. Автор ранее [Л. 7, 8] изложил метод опытного определения реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока, который, теоретически говоря, может быть применен для той же цели в усилителях. Для этого, замкнув поперечную цепь, рассматривают усилитель, как машину постоянного тока, у которой обмоткой возбуждения служит обмотка управления, а ток якоря снимается или подводится к поперечным щеткам. Щетки $d-d$ на продольной оси во все время опыта остаются разомкнутыми. Далее поступают во всем, как описано в [Л. 7].

Практическое применение этого метода, однако, встречает затруднение в том, что в этом опыте усилитель должен работать в режиме двигателя. Работа же в режиме двигателя при сильно ослабленного поля очень неустойчива. Поэтому для определения н. с. реакции коммутационных токов в усилителе лучше пользоваться описанными ниже методами 2 и 3, свободными от вышеупомянутого недостатка.

Метод 2. Метод отличается от первого тем, что вместо нормальных генераторного и двигательного режимов используются два режима питания якоря усилителя (или машины постоянного тока) через поперечные щетки от посторонней сети (положение *Д* переключателя на рис. 2). В этих режимах должны быть одинаковы по величине и направлению токи в обмотках якоря и возбуждения, а скорости вращения должны быть одинаковы лишь по величине, по направлению же противоположны. В одном из этих режимов э. д. с., индуктирующаяся в обмотке якоря, совпадет по направ

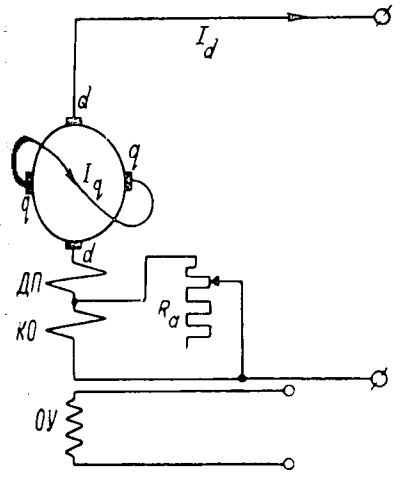


Рис. 1. Принципиальная схема электромашинного усилителя с поперечным полем.

ОУ — обмотка управления; *ДП* — обмотка добавочных полюсов; *КО* — компенсационная обмотка; R_a — реостат для регулирования степени компенсации.

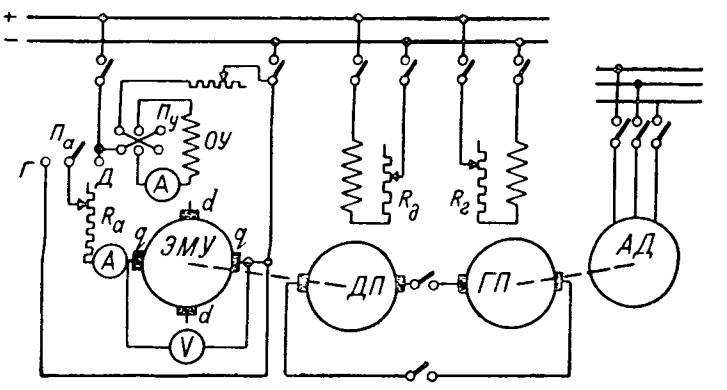


Рис. 2. Схема для определения реакции коммутационных токов в усилителе с поперечным полем.

ЭМУ — испытуемая машина; *ДП* — двигатель для вращения *ЭМУ*; *ГП* — генератор для питания двигателя *ЭМУ*; *АД* — асинхронный двигатель для вращения генератора *ГП*; *q* — *q* — щетки на поперечной оси; R_a — реостат для регулирования тока в якоре, положение *Г* переключателя $П_а$ соответствует генераторному режиму, положение *Д* — режиму питания якоря от сети; *ОУ* — обмотка управления; $П_у$ — переключатель направления тока в *ОУ*; $R_д$, $R_г$ — реостаты для регулирования скорости вращения усилителя.

с током. Испытуемая машина разовьет мозящий момент и будет работать, следовательно, в генераторном режиме. В другом ме э. д. с. и ток в якоре противоположно равлены, машина работает в двигательном ме и развивает вращающий момент. Скоти вращения испытуемой машины в обоих ах принудительно определятся током уждения и напряжением на якоре приводдвигателя *ДП* (рис. 2), который работает полном или близком к полному потоке тому может развивать момент, значительно восходящий момент испытуемой машины.

Опыт по определению н. с. F_{kq} по второму ду применительно к усилителю проводится едующей последовательности:

1. Собирается схема по рис. 2. Переключа$П_а$ ставится в положение *Д*. При разомкнупоперечной и продольной цепях и номинальскорости вращения с возможной тщательноо снимается восходящая ветвь характеристи холостого хода, представляющая зависиь напряжения на поперечных щетках $U_{q0}=E$ тока в обмотке управления *i*. Замеряется отивление обмотки якоря в начале и конце о опыта.

2. Вращают усилитель двигателем *ДП* (рис. 2) ой скоростью, при которой хотят определить F_{kq}. Включая и выключая токи возбуждеразличной величины и знака, размагничивают итель. От постороннего источника через ечные щетки *q* — *q* в якорь пропускают I_q, при котором хотят определить F_{kq}.

Включают ток возбуждения, соответствуюй прямолинейной части характеристики хотого хода. Для того чтобы при опыте не ить с восходящей ветви характеристики остого хода, при подрегулировке ток возждения следует изменять только в одном равлении, а именно увеличивая его. При ючении тока возбуждения следует наблюдать за изменением тока в якоре. Если при включении тока возбуждения ток в якоре уменьшится, значит усилитель работает в режиме двигателя и развивает вращающий момент, если же ток в якоре увеличится, тогда имеет место режим генератора и развивается тормозящий момент. После точной установки выбранного значения тока возбуждения *i* следует подрегулировать до заданных значений ток в якоре I_q и скорость вращения *n*, а затем произвести одновременный отсчет этих величин.

3. Вращая усилитель в обратном направлении, устанавливают ту скорость и те значения токов в обмотках якоря и управления, которые были в предыдущем режиме, и производят отсчеты показаний приборов. Если в предыдущем режиме усилитель развивал тормозящий момент, то в режиме этого пункта он будет развивать вращающий момент, т. е. будет работать в двигательном режиме, и наоборот.

4. Вычисляют э. д. с., индуктирующиеся в якоре в генераторном и двигательном режимах, соответственно по формулам:

$$\left.\begin{aligned} E_г &= U_г + I_q R_q + 2\Delta U, \\ E_д &= U_д - (I_q R_q + 2\Delta U), \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где $U_г$, $U_д$ — напряжения на щетках *q* — *q* соответственно в генераторном и двигательном режимах;

R_q — сопротивление обмотки якоря по поперечной оси при температуре опыта;

$2\Delta U$ — падение напряжения в переходном контакте щеток *q* — *q* разной полярности.

Для исключения из формул (1) величины $2\Delta U$, трудно поддающейся точному расчетному определению, лучше замерять напряжение U_k щупами

непосредственно на коллекторе, под серединой щеток $q-q$. Формулы (1) при этом примут вид:

$$\left.\begin{aligned} E_z &= U_k + I_q R_q, \\ E_\partial &= U_k - I_q R_q. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

5. Соответственно найденным значениям э. д. с. E_z и E_∂ по восходящей ветви характеристики холостого хода или внутренним нагрузочным (см. замечание 4) определяют токи возбуждения i_z и i_∂.

6. Намагничивающая сила реакции коммутационных токов на пару полюсов в ампервитках или в масштабе тока обмотки управления вычисляется соответственно по формулам

$$\left.\begin{aligned} F_{kq} &= 2w\,\frac{i_z - i_\partial}{2}, \\ i_{kq} &= \frac{i_z - i_\partial}{2}, \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

где w — число витков обмотки управления на одном полюсе.

Докажем справедливость формул (3).

В условиях данного опыта в генераторном и двигательном режимах будут одинаковы по величине и направлению следующие н. с.:

1. Намагничивающая сила обмотки возбуждения, так как в обоих режимах одинаковы токи возбуждения.

2. Намагничивающая сила продольной реакции якоря, так как в обоих режимах течет один ток в якоре I_q, практически одно положение щеток, а направления вращения в генераторном и двигательном режимах противоположны.

3. Намагничивающая сила, соответствующая размагничивающему действию поперечной реакции якоря на продольный поток, так как в обоих режимах одинаковы токи I_q в якоре и практически одно и то же насыщение.

4. Намагничивающая сила, соответствующая магнитному действию потерь в стали якоря на продольный поток, так как в обоих режимах одна скорость вращения, один поперечный ток I_q, один поперечный поток и, следовательно, одинаковы основные потери в стали, т. е. потери от поперечного потока.

Впрочем, потери в стали якоря от поперечного потока создают только поперечную размагничивающую н. с., которая не входит в баланс продольных н. с. Потери же в стали от продольного потока будут по абсолютной величине невелики, так как опыт ведется при пониженных значениях тока в обмотке управления. Кроме того, так как магнитное действие потерь в стали всегда размагничивающее, то в формулы (3) войдет лишь полуразность н. с. потерь в стали от продольных потоков обоих режимов, величиной которой, не делая большой погрешности, можно пренебречь.

В отличие от остальных н. с. машины, н. с. коммутационной реакции якоря при одной скорости вращения, одном токе якоря и одном положении щеток в двигательном и генер ном режимах, оставаясь одинаковыми по чине, противоположны по направлению. По н. с., определяемые по э. д. с. E_z и E_∂, р чаются на двойную величину н. с. реакци мутационных токов, что и доказывает спр ливость формул (3).

Получаемые обычно из формул (3) от тельные значения F_{kq} и i_{kq} говорят о то коммутация в усилителе с поперечным замедленная и F_{kq} ослабляет поток об управления.

Описанный второй метод определения помимо указанного преимущества в части у чивой работы и регулировании скорости вр ния, имеет еще и то достоинство, что он п ляет регулировать в широких пределах в якоре как в двигательном, так и в ге торном режимах независимо от величины возбуждения.

Недостатком второго метода является ходимость включения в генераторном ре в цепь якоря относительно большого сопр ления, что при испытании машин средней и шой мощности или с большим напряжени поперечных щетках не всегда легко осу вимо. От этого недостатка свободен опис мый ниже третий метод.

Метод 3. Метод является комбинацией дов 1 и 2. Генераторный режим усилителя машины постоянного тока осуществляется мальным путем, как в методе 1 (положен переключателя $П_a$), т. е. при нагрузке попе ной цепи на реостат R_a, а двигательный ре осуществляется, как в методе 2, при прин тельной скорости вращения, задаваемой при ным двигателем $ДП$, и питании обмотки я через реостат от сети постоянного тока.

Обработка результатов опыта в тре методе такая же, как и в первых двух.

Дополнительные замечания. 1. Регулирова скорости двигателя постоянного тока $ДП$ (рис вращающего испытуемую машину, в неболь пределах можно осуществлять реостатами в пях его обмоток возбуждения и якоря. Более устойчивые работа и регулирование в широ пределах скорости двигателя $ДП$ могут б получены только при питании его от отде ного генератора $ГП$ с регулируемым напря нием.

2. Для устранения неточностей, вызываем петлей гистерезиса, можно поступать двоя а) размагнитив в начале опыта машину, ве опыт так, чтобы результирующие поток маш и э. д. с. якоря все время увеличивались и то при определении токов возбуждения i_z и i_∂ по зоваться восходящей ветвью характеристи холостого хода; б) после производства оп и вычисления э. д. с. определить токи возб дения из специального опыта генератор холостого хода, изменяя напряжение на як в той последовательности, в которой изменял э. д. с. при опыте.

3. Для исключения случайной ошибки в опыте рекомендуется определить н. с. реакции коммутационных токов для различных I_q и различных скоростей вращения, т. е. следует снять и построить кривые $i_{kq}=f_1(I_q)$ при $n=пост$ и $i_{kq}=f_2(n)$ при $I_q=пост$.

4. В предложенных способах н. с. реакции коммутационных токов изменяет магнитный поток машины соответственно тому насыщению, которое имеет место при опыте. Поэтому для определения токов возбуждения $i_г$ и $i_д$, соответствующих э. д. с. в генераторном и двигательном режимах, в особенности в усилителе с большим насыщением, лучше пользоваться не характеристикой холостого хода, а внутренней нагрузочной характеристикой, производя опыт в следующей последовательности:

а) размагнитить машину;

б) снять восходящую ветвь нагрузочной характеристики в генераторном режиме при заданных токе якоря и скорости вращения;

в) построить внутреннюю нагрузочную характеристику $E_г=f(i)$ при $I_q=пост$;

г) снова размагнитить машину;

д) при направлении вращения, противоположном направлению вращения генераторного режима, пропускать в том же направлении, что и в генераторном режиме, токи в якоре и обмотке возбуждения; ток в якоре держать постоянным и равным току генераторного режима, ток в обмотке возбуждения увеличивать в одном направлении от нуля до $0{,}75 \div 1$ от номинального, снимая кривую $U_д=f(i)$;

е) построить внутреннюю нагрузочную характеристику $E_д=f(i)$ при $I_q=пост$;

ж) в точках, где внутренние нагрузочные характеристики генераторного и двигательного режимов, по возможности, прямолинейны и параллельны друг другу, соединить эти характеристики горизонтальным отрезком, который в масштабе абсцисс будет равен удвоенной величине н. с. реакции коммутационных токов.

Заключение. Все три метода могут быть применены как к усилителю с поперечным полем, так и к машинам постоянного тока с параллельным, последовательным или смешанным возбуждением, с добавочными и без добавочных полюсов, с компенсационной и без компенсационной обмоток и при любом, допустимом с точки зрения искрения, положении щеток.

Помимо универсальности применения и простоты изложенные методы теоретически достаточно точны, так как при их выводе не сделано сколько-либо грубых допущений.

В случаях, когда напряжение на щетках или мощность машины невелики, удобно пользоваться методом 2. Когда же напряжение на поперечных щетках или мощность большие, как это, например, может иметь место в машинах постоянного тока, то удобнее пользоваться методом 3.

Изложенные методы могут быть использованы для:

1) экспериментального исследования влияния различных параметров усилителя и машин постоянного тока на реакцию коммутационных токов;

2) для проверки и уточнения методов расчета н. с. реакции коммутационных токов;

3) для экспериментального определения влияния реакции коммутационных токов на характеристики усилителя и машин постоянного тока.

Литература

1. В. Т. Касьянов. Реакция якоря машин постоянного тока. ВЭП, № 2, 1940.

2. Я. С. Эпштейн. Особенности проектирования амплидинов. Электричество, № 12, 1945.

3. Ф. А. Горяинов и Г. К. Салгус. К расчету амплидинного генератора. Электричество, № 2, 1946.

4. Н. А. Моносзон. Некоторые особенности теории и проектирования электромашинного усилителя. Электричество, № 9, 1948.

5. И. М. Якименко. Электромашинный усилитель как элемент регулирующей системы. Электричество, № 9, 1948.

6. Н. Н. Ермолин. Расчет ампервитков токов коммутации в машинах постоянного тока. Электричество, № 3, 1949.

7. М. И. Алябьев. Опытное определение реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока. Электричество, № 5, 1950.

8. М. И. Алябьев. Авторское свидетельство № 89939 от 31/X 1950 г. на „Способ опытного определения реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока".

[20. 4. 1951]

◇ ◇ ◇

О наивыгоднейшей характеристике тягового двигателя

Кандидат техн. наук, доц. Г. Г. МАРКВАРДТ
и кандидат техн. наук, доц. П. Н. ШЛЯХТО

МЭМИИТ

Дается оценка качества характеристики тягового двигателя с точки зрения влияния ее на показатели электрической железной дороги и критикуются некоторые встречающиеся в литературе взгляды по этому вопросу. Печатается в порядке обсуждения.

Выбор наивыгоднейшей характеристики тягового двигателя является одним из важнейших вопросов теории и практики электрической тяги. Достаточно указать, что мощность электровоза, его скорость и использование в различных условиях, мощность системы энергоснабжения, к. п. д. всей установки и т. п. находятся в прямой зависимости от удачного выбора характеристики двигателя.

Этому вопросу уделяется значительное внимание, однако пока нет еще достаточной ясности. В литературе встречаются также ошибочные положения, приводящие к искажению представлений о рациональной характеристике двигателя для тяги. Например, в учебнике по электрической тяге [Л. 1, стр. 160] указано: «Локомотив с гиперболической характеристикой, примером которой в известной степени может служить характеристика тепловоза, резко снижал бы скорость на подъемах, что сказалось бы в уменьшении средней скорости движения. Снижение скорости на затяжных подъемах может повлечь за собой в известных случаях уменьшение пропускной способности дороги. Более высокие средние скорости можно реализовать, применяя двигатели с шунтовыми характеристиками, при которых поезд двигался бы все время с практически постоянной скоростью, близкой к максимально возможной». Эта книга издана в 1940 г.

В рецензии [Л. 2] на книгу К. Г. Марквардта [Л. 3] Е. В. Чеботарев поддерживает эту неправильную установку, высказываясь в том же духе: «...выдвигая требования к тяговым двигателям, автор рассматривает их только с точки зрения условий работы системы энергоснабжения и поэтому приходит к неправильному выводу, что наилучшей характеристикой двигателя должна явиться связь Fv =const».

Тяговая характеристика самого электровоза достигается не только путем выбора одной тяговой характеристики двигателя, но и применением тех или иных дополнительных устройств. Поэтому вопрос выбора характеристики электровоза, связанный со способами регулирования скорости, значительно шире поставленного в статье. Он не может быть рассмотрен безотносительно к соотношениям мощности преобразовательных устройств и тяговых двигателей, мощности системы энергоснабжения и проч. Выбор характеристики тягового двигателя при различных системах тяги поэтому также может рассматриваться изолированно от широкого круга других вопросов.

Основная цель статьи — выявить ошибочность некоторых суждений о качествах характеристик собственно тяговых двигателей. Без правильной оценки качества тяговых двигателей невозможна правильная ориентация конструкторов этих машин в выборе экономически выгодной характеристики. Такая постановка вопроса оправдана также и тем, что использование мощности тяговых двигателей будет во всех случаях наилучшим, когда характеристика локомотива совпадает с естественной характеристикой тяговых двигателей.

Следует отметить, что в свете изложенного вопрос об использовании мощности тяговых двигателей будет исследоваться нами в условиях неизменного напряжения на их зажимах.

Источником ошибочного представления о качествах характеристик тяговых двигателей является, по нашему мнению, непонимание того, что без единого основного критерия, позволяющего сравнивать двигатели с различными характеристиками, такое сопоставление становится беспредметным.

Существо этих ошибочных представлений сводится к следующему.

Если сопоставить электровозы с двигателями параллельного и последовательного возбуждения, то оказывается, что на наиболее тяжелых подъемах при двигателях с параллельным возбуждением электровоз идет с большей скоростью. Отсюда приходят к выводу, что двигатель «постоянной мощности» с характеристикой, удовлетворяющей уравнению $Fv = пост$, будет позволять давать меньшие скорости на тяжелых подъемах, что мол и является его недостатком. Так как нельзя сочетать два противоречивых качества — постоянную скорость и постоянную мощность, потребляемую двигателем, — нельзя, то идут на компромисс, применяя двигатели с последовательной характеристикой, которая занимает промежу

ложение между предельными $v = пост$ и
$пост$.

овершенно, однако, очевидно, что на одном
и же элементе профиля вне зависимости от
характеристики двигателя электровозу мож-
беспечить одну и ту же скорость, если мощ-
ь двигателей выбирать, исходя из этого
вия. Следовательно, сравнение тяговых двига-
й с различными характеристиками без пред-
ельного обусловливания их мощности теряет
, именно в таком сравнении заключается
ная ошибка.

тто подобное имело место и в другом важ-
опросе электрической тяги, в вопросе о
ипе жесткого нормирования потерь напря-
ия при расчете контактной сети. Защищая
ринцип, В. Е. Розенфельд и др. также аб-
ровались от мощности электровоза при рас-
ении влияния напряжения на скорость, тог-
к специальные кафедры МЭМИИТ показа-
что совместное рассмотрение степени исполь-
ия электровоза, его мощности, скорости дви-
ия и характера графика с условиями работы
емы энергоснабжения позволяет найти наи-
е экономичное решение и в ряде случаев
и на уменьшение (иногда почти в два раза)
ний проводов.

Не считая возможным решать вопрос о выбо-
выгоднейших характеристик реальных тя-
двигателей, тем более электровоза, без
отрения ряда чисто конструктивных сообра-
ний, и, как указывалось, не ставя в статье
задачи, покажем, к чему приводит при по-
ке задачи выбора характеристики отрыв
бы от основного фактора — мощности дви-

а рис. 1 даны характеристика двигателя
$пост$ (кривая *1*) и характеристика $Fv =$
$пост$ (кривая *2*). Может казаться, что в неко-
й обширной зоне тяговых усилий, превосхо-
их значение F_1 (рис. 1), скорости электровоза
игателями *типа* $Fv = пост$ *сравнительно ни-*
Однако тут же следует поставить вопрос о
нельзя ли при характеристике двигателей *2*
ить электровоз более быстроходным, нель-
поднять характеристику *2* выше. Очевидно,
жно поднять и в положение *2′* и в положе-
2″ (рис. 2), когда скорости по второй харак-
тике будут во всех точках выше, чем по
. Это может быть достигнуто путем увели-
мощности двигателя.

ершенно иные результаты получаются при
нии двигателей равной мощности.

ассмотрим при этом условии тяговые пока-
электровозов с двигателями, имеющими
ные характеристики. В практических усло-
работы электрической железной дороги
ость тягового двигателя, как правило, вы-
ется по руководящему подъему, где двига-
обычно нагревается до предельно допусти-
емпературы.

редположим сначала, что длительность ра-
электровоза на руководящем подъеме тако-
то двигатель нагревается до установившей-
мпературы. В этом случае следует исходить

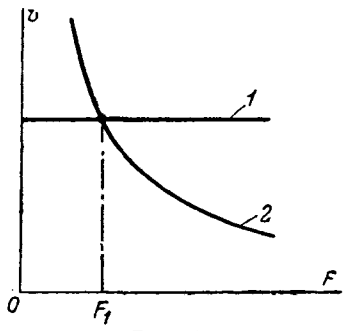


Рис. 1.

из длительной мощности двигателей. При заданном весе поезда мощность двигателя для одного и того же участка определяется только принятой скоростью движения на руководящем подъеме вне зависимости от вида его характеристики.

Следовательно, условившись сравнивать двигатели равной мощности, надо исходить при сопоставлении их характеристик из равных скоростей электровоза на руководящем подъеме.

Рассмотрим две уже упомянутые предельные характеристики тяговых двигателей (рис. 1): $v = пост$ и $Fv = пост$.

Мощность двигателя с характеристикой $v = пост$ полностью используется только на *руководящем подъеме, когда усилие тяги равно* F_1. На более легких участках профиля *при уменьшении* тягового усилия и сохранении той же низкой скорости, как и на руководящем подъеме, двигатель используется тем меньше, чем легче участок профиля. Совершенно иное положение будет при характеристике $Fv = пост$. На легких участках профиля с уменьшением тягового усилия F скорость поезда растет, так что мощность двигателя полностью используется. Если не учитывать ограничений по конструктивной скорости электровоза и условиям безопасности движения, то двигатели будут работать все время

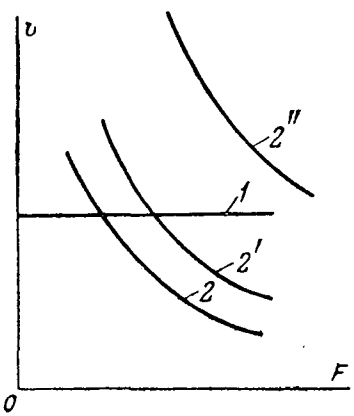


Рис. 2.

при установившейся температуре, равной номинальной.

Рассмотрим теперь условия работы двигателей с предельными характеристиками при относительно небольшом времени прохождения руководящего подъема.

Пусть двигатель с характеристикой $v = пост$ за это время не успевает нагреться до установившейся температуры, соответствующей мощности, развиваемой двигателем на руководящем подъеме. Пользуясь тем, что двигатель недоиспользуется по мощности на остальных участках, и, следовательно, подходит к руководящему подъему с температурой, ниже допустимой, его можно, очевидно, несколько перегрузить относительно длительной мощности. Другими словами, в данном случае такой двигатель можно для условий работы на руководящем подъеме выбирать не по длительной мощности, а по допускаемой мощности при работе в течение определенного времени, например, по часовой или получасовой мощности. В случае полного использования двигателя с характеристикой $Fv = пост$ на всем участке его мощность придется выбирать, исходя из длительной работы, так как двигатель, работая с полной мощностью на всех участках, будет иметь установившуюся температуру, равную допустимой.

На первый взгляд изложенное как будто говорит не в пользу двигателя с гиперболической характеристикой. Но ошибочность этого заключения тотчас же обнаружится, если вспомнить, что такое положение обусловлено более полным использованием двигателя с характеристикой $Fv = пост$, чем двигателя с постоянной скоростью.

Действительно, при двигателе с гиперболической характеристикой достаточно изменить режим ведения поезда на участках, непосредственно предшествующих руководящему подъему так, чтобы температура двигателя стала равной температуре двигателя постоянной скорости, как условия выбора их мощности станут одинаковыми. При этом двигатель с характеристикой $Fv = пост$ будет все же, как правило, значительно лучше использован, разовьет более высокую скорость. Только в предельном случае, когда температура двигателя к моменту подхода к руководящему подъему будет определяться средней мощностью за все время, предшествующее этому моменту, использование мощности, а следовательно, и средняя скорость движения при обоих двигателях равны.

Сравнивая двигатели с характеристиками параллельного и последовательного возбуждения, А. Б. Лебедев указывает [Л. 4], что первые имеют преимущества по скорости движения только на участках, где скорость электровоза достигает максимальной допустимой. В случае последовательных и тем более гиперболических характеристик такие участки пришлось бы проходить, чередуя тягу и выбег, что, естественно, несколько снизит скорость на данном участке. Однако А. Б. Лебедев тут же указывает, что это преимущество двигателей с постоянной скоростью теряет свое значение при увеличении длины участка.

Так как здесь не рассматривается регулировка скорости движения за счет изменения поля или схемы соединения двигателей, то к этому следует добавить, что преимущество двигателя с постоянной скоростью будет реализовано только в случае равенства ее максимально допуст скорости для рассматриваемого легкого эл та профиля. Но если сравниваемые двиг развивают одинаковую мощность и, следова но, скорость на тяжелых участках, то хар ристика $v = пост$ лежит ниже максима скорости на легком участке и, следовате двигатель с гиперболической характерис позволит поддерживать более высокую ско движения.

Таким образом, преимущество характери $v = пост$ может быть реализовано только в случае, когда мощность двигателей выбира исходя из максимальной скорости движени самом тяжелом для двигателя участке, что известно, нерационально.

На основании этих соображений можно новить, что при равных мощностях двух эле возов с характеристиками тяговых двига $v = пост$ и $Fv = пост$ они будут иметь ра скорости только на руководящем подъеме. всех же более легких участках, на большей ч пути, электровоз с тяговыми двигателями с рактеристикой $Fv = пост$ будет всегда разви более высокие скорости. Только на неболь части пути с подъемами выше, чем руков щий [1], скорость такого электровоза будет н

Из изложенного очевидно, что при характ стиках двигателей вида $Fv = пост$ электр имеет наилучшие эксплуатационные показат Что касается достоинств такой характерис двигателя по условиям работы системы эне снабжения, то они настолько очевидны, что у кого не вызывают сомнений.

Все другие возможные характеристики ле между рассмотренными предельными. Чем же характеристика реального двигателя к ха теристике $Fv = пост$, тем выше все показа электрической железной дороги.

Изложенное показывает, что только сра ние двух несопоставимых по мощности ма имеющих разные характеристики, дает возм ность говорить о снижении скорости на подъе машины с падающей характеристикой. При вильной же постановке вопроса при сравне машин равной мощности надо говорить не о жении скорости, а о повышении ее на легки средних участках профиля. Только неучетом го обстоятельства и можно объяснить позиц В. Е. Розенфельда и Е. В. Чеботарева в осн ном вопросе теории электрической тяги.

Выдвинутые нами положения имеют пра ческое значение не только для проектирова но и для эксплуатации машин.

В первую очередь это касается правилы выбора передаточного отношения зубчатой пе дачи. На некоторых электрифицированных уч ках считают целесообразным использовать ос ление поля двигателей при проходе руководя го подъема. На первый взгляд это, как будто, д увеличение скорости движения. В действитель сти же дело обстоит иначе. Путем изменения

[1] Следует учесть, что во многих случаях т подъемы проходят при использовании живой силы пое

точного отношения можно получить такую скорость и при нормальном поле, повысив всю актеристику электровоза. Сохранив, таким азом, высокую скорость на руководящем ъеме, мы вместе с тем увеличим резерв по рости для более легких участков профиля, где жет быть, кроме того, применено ослабление я. В этом случае, используя характеристики ового двигателя для полного и различных сте-ей ослабления поля, переходя с одной харак-стики на другую, можно приблизиться к ги-бодической характеристике. Когда повыше-скорости на руководящем подъеме достигает-ие соответствующим подбором передаточного ожения, а за счет ослабления поля, тогда возможности для увеличения скорости на их элементах профиля нет. Не меньшее зна-ение сказанное выше имеет для компаундных гателей, характеристики которых позволяют ь близко подойти к характеристике $Fv = \text{const}$.

Как ясно из изложенного, приняв, что на ру-одящем подъеме тяговые двигатели с различ-ми характеристиками развивают равную мощ-ь, мы получим и равные скорости электрово-на этом подъеме. Пусть остальные подъемы редъявляют повышенных требований к дви-лю с падающей характеристикой, и, следова-но, он их проходит с достаточной скоростью бы за счет большего запаса живой силы, ко-ый в ряде случаев будет иметь электровоз с ми двигателями. Очевидно, что двигатель адающей характеристикой будет тогда иметь ма большие преимущества по скорости элек-воза перед двигателем с характеристикой $Fv = \text{const}$. Часто, однако, эти преимущества не ется полностью использовать. Если к тому езначительное увеличение времени хода по елым подъемам не сказывается ни на пропу-скной способности дороги, ни на общем времени хода поезда, то возникает естественный вопрос, не следует ли, воспользовавшись нереализуемыми запасами скорости электровоза с двигателями, имеющими падающую характеристику, выбрать их меньшей мощности, повысив тем самым эффективность работы всей системы в целом. Может, следовательно, получиться, что описанное положительное качество двигателей с падающей характеристикой приведет к установлению пониженной скорости на тяжелых подъемах.

В. Е. Розенфельд и Е. В. Чеботарев, очевидно, опустив все эти соображения и «отвлекаясь» от соотношения мощностей тяговых двигателей, приходят к заключению, прямо противоположному нашему. Между тем изложенное нами в своей основе уже давно было высказано отечественными учеными—А. В. Вульфом [Л. 5] и В. А. Шевалиным [Л. 6], а также А. Б. Лебедевым [2] [Л. 4].

Литература

1. Электрическая тяга поездов. Под редакцией В. Е. Розенфельда. Трансжелдориздат, 1940.

2. Е. В. Чеботарев. Книга К. Г. Марквардта „Энергоснабжение электрифицированных железных дорог". Электричество, № 7, 1950.

3. К. Г. Марквардт. Энергоснабжение электрифицированных железных дорог. Трансжелдориздат, 1948.

4. А. Б. Лебедев. Основы электрической тяги, ОНТИ, 1937.

5. А. В. Вульф. Электрическая тяга. Ленинград, 1926.

6. В. А. Шевалин. Тяговые расчеты электрических железных дорог и трамваев. Ленинград, 1931.

---

[2] Правда, А. Б. Лебедев, придерживаясь, по сути, тех же взглядов на работу двигателей с различными характеристиками, что Шевалин и Вульф, сделал не вполне четкое, как будто противоречащее последним заключение.

[27. 6. 1951]

✧ ✧ ✧

Новый метод регулирования степени развития электрической дуги высокой интенсивности

Кандидат техн. наук **М. В. ВОРОПАНОВ**

НИИ Министерства промышленности средств связи

Экспериментально показана зависимость степени развития дуги высокой интенсивности от вида углерода фитиля. В качестве практического вывода из исследования предложен новый метод регулирования степени развития дуги посредством изменения вида углерода фитиля. Высказано предположение, что разная испаряемость отдельных модификаций углерода в кратере дуги объясняется неодинаковой дисперсной структурой последних.

Знание способов регулирования степени развития дуги высокой интенсивности является основной предпосылкой для правильной разработки углей новых типов. Систематическое изучение ряда способов, позволяющих воздействовать на ход развития дуги, дали возможность Н. А. Карякину [Л. 1] выделить существенные из них и на этой базе разработать положение о равноярких дугах. На основе этого положения можно спроектировать уголь нового типа, яркость которого практически должна быть равна яркости избранного образца при условии, что эти угли будут иметь: 1) одинаковые по составу и технологии оболочки; 2) одинаковую толщину стенки оболочек; 3) одинаковую расчетную плотность тока; 4) одинаковую объемную концентрацию редких земель в кратере.

Перечисленные четыре условия, соблюдение которых необходимо для получения равноярких углей, дают некоторое представление о методах, применяя которые, можно воздействовать на дугу высокой интенсивности в желаемом направлении.

В 1937 г. Н. А. Капцов [Л. 2], рассматривая дуговой разряд между угольными электродами, писал, что при давлениях порядка атмосферы и выше положительный столб дуги обладает свойствами отшнуровываться, а при больших токах температура газа в обычной электрической дуге может быть выше температуры анода вследствие явления отшнуровывания. К подобному выводу приходит и Н. А. Карякин [Л. 3] в 1944 г., рассматривая кратер дуги высокой интенсивности, как своеобразную газоразрядную трубку.

Существующие методы [Л. 1...3] регулирования развития дуги высокой интенсивности базируются на изменении условий отшнуровывания разряда в кратере.

Можно отметить три основных метода регулирования, а именно путем изменения: а) диаметра фитиля положительного угля; б) состава оболочки; в) взаимного расположения углей в лампе. Регулирование изменением количества и вида редких земель (фториды и окислы) в фитиле угля исключается из рассмотрения потому, что, во-первых, для сохранения нормальных световых характеристик дуги количество редких земель практически не изменяться лишь в ких пределах, а во рых, фитиль с доба нием тугоплавких окс не обладает свойст спокойного и равном го испарения.

При исследовании высокоинтенсивной малой мощности в 1941 г. автор обнаружил ление ускоренного развития дуги высокой ин сивности вместе с уменьшением диаметра фи положительного угля [Л. 4].

Позднее И. А. Карякин [Л. 1 и 5] отмеч что уменьшение диаметра фитиля и связа с этим увеличение толщины стенки обол значительно ускоряют выгорание кратера, т что толщина стенки оболочки является основ средством для воздействия на степень разви дуги высокой интенсивности. Действительно, менение диаметра фитиля положительного у или, что одно и то же, изменение толщины с ки оболочки в настоящее время служит глав средством для регулирования степени разви дуги высокой интенсивности при разработке вых углей интенсивного горения.

Изменение проводимости оболочки анода меной одной модификации углерода другой зывает перераспределение тока между оболоч и кратером и влияет на отшнуровывание раз да в кратере. Практически это может служ средством регулирования степени развития д высокой интенсивности.

То или иное расположение углей при горе дуги определяется конструкцией лампы. Изу ние работы углей при различной высоте распо жения отрицательного угля и при разной дл дуги показало, что снижение катода и умень ние длины дуги вызывают запаздывание нача процесса развития дуги высокой интенсивно т. е. оба указанных фактора влияют в одном н правлении. Их совместное действие приводи к резкому (скачкообразному) изменению эффе та высокой интенсивности.

Увеличение угла наклона отрицательно угля [Л. 1] вызывает лишь некоторое ускорени процесса развития дуги и несколько более б строе ухудшение постоянства режима горени

Автором исследовались две крайние модиф кации углерода: сажа и графит. Все виды угл рода имеют кристаллическую структуру, и кр

ллическая решетка сажи весьма близка к ре-ке графита. Характерная особенность сажи ют в мелкости ее кристаллитов. Кроме того, вые электроды характеризуются сравнитель-с графитовыми более высокой степенью ди-рсности структурных элементов [Л. 6].

Графит представляет собой одну из наиболее ых разновидностей углерода в отношении ржания водорода и кислорода с крупными мерами кристаллов. Необходимо отметить же, что процесс графитации, рассматривае-й как процесс роста кристаллов графита, про-ет очень медленно, так как скорость диффу-в твердых веществах довольно мала [Л. 7]. бенностью сажи является ее малая способ-ь к графитации при высоких температурах крытом пространстве.

Поэтому можно сделать вывод, что в кратере и, свободно горящей в воздухе, сажа не бу-полностью превращаться в графит. Отсюда но ожидать иного поведения в кратере дуги вого фитиля сравнительно с графитовым. ако среди исследователей электрической дуги пространено представление, что все модифи-ии углерода при высокой температуре анодно-кратера превращаются в графит и поэтому т себя одинаково [Л. 3, 8, 9]. Только Фин-ьбург [Л. 10] считает, что в интенсивной дуге ия нахождения каждого слоя угля в зоне вы-й температуры недостаточно для полной его фитации.

Работа автора с катодом дуги высокой интен-ности выявила следующие особенности пове-ия углерода различных модификаций в фити-ицательного угля. При одинаковой графи-й оболочке катода, но при разных фитилях — ем и графитовом — испаряемость сажевого ля оказалась значительно выше графитово-что характеризовалось большей глубиной ера угля с сажевым фитилем.

Этот факт, а также наблюдаемое резкое раз-ие в первичной дисперсности сажи и графита ичина кристаллитов 2 ... 10 *ммкм* и 100 ... 0 *ммкм* соответственно) [Л. 6] были исполь-ны автором в исследовании анода дуги вы-й интенсивности.

Для светотехнических исследований в дуге и изготовлены опытные 8-*мм* угли интенсив-горения типа проекционных киноуглей. Все ные угли имели вставной фитиль диаметром и одинаковую сажевую оболочку.

Фитиль исследуемых углей отличался только м углерода, именно в одном варианте фити-качестве углеродистого вещества была при-на сажа, в другом — обеззоленный ботоголь-графит, просеянный через сито 250 меш [1], ем — искусственная сажевая масса (смесь со смолой, подвергнутая перемешиванию, овке, обжигу, размолу и просеву через сито меш).

В качестве пламенного вещества в фитили вариантов были введены обычные фтористые инения редких земель в количестве 40%, т. е. на нижнем пределе для кинопроекционных углей интенсивного горения [Л. 11].

Светотехнические измерения опытных углей при работе их в дуге производились в макете дуговой лампы, представляющей собой измененную кинопроекционную лампу, снабженную усиленным (типа прожекторного) положительным радиатором, с вращением положительного угля и с большим диапазоном изменения скорости подачи анода.

При всех исследованиях установка углей в дуговой лампе была одна и та же, а именно: 1) вылет положительного угля из радиатора лампы $s=15$ *мм*; 2) угол наклона отрицательного угля к положительному $\beta = 25°$; 3) снижение оси отрицательного угля относительно оси положительного при сведенных углях $y = 0$ *мм*; 4) длина дуги $L = 10$ *мм*. Значение длины дуги в 10 *мм* было взято как оптимальное, полученное автором [Л. 12] при работе с 8-*мм* кинопроекционными углями высокой интенсивности. В качестве отрицательного угля был применен омедненный фитильный 7-*мм* кинопроекционный уголь марки «Экстра-К». Напряжение дуги измерялось на зажимах дуговой лампы.

Яркость положительного кратера характеризовалась яркостью центральной зоны кратера диаметром в 2 *мм*, измеренной под углом $\alpha = 10°$ к оси положительного угля в горизонтальной плоскости.

Исследования велись по методу характеристических кривых [Л. 1]. Одновременно снимались следующие характеристические кривые дуги: 1) глубина кратера $h(l)$; 2) скорость сгорания анода $v(l)$; 3) стильбамперная кривая $B(l)$; 4) вольтамперная $U(l)$. Все перечисленные кривые были сняты в большом диапазоне нагрузок от 35 до 125 *а*.

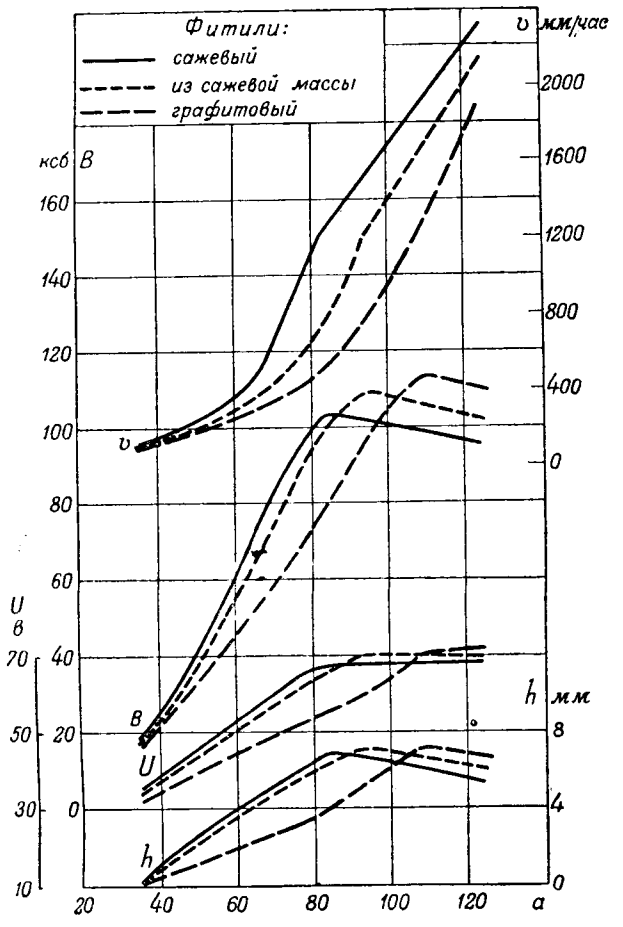
Одновременно со светотехническими измерениями производились наблюдения за особенностями светового и электрического режимов и за строением пламен дуги. Производились также замеры минимального диаметра конуса обгорания анода.

Результаты исследования представлены кривыми на рисунке. На основании этих кривых можно отметить следующее.

Все опытные угли с различными вариантами фитиля при $t = 35$ *а*, когда кратер отсутствует ($h = 0$) и дуга высокой интенсивности еще не начала развиваться, имеют одинаковые значения скорости сгорания и яркости кратера положительного угля. Некоторое различие в значениях напряжения дуги объясняется разной формой конуса обгорания анода.

По мере увеличения тока дуги анодный кратер углей с сажевым фитилем развивается значительно быстрее, чем углей с графитовым фитилем, что характеризуется также значительно бо́льшими значениями глубины кратера углей с сажевым фитилем при соответственно равных токах дуги. Более быстрое развитие анодного кратера углей с сажевым фитилем показывает, что сажевый фитиль обладает большей испаряемостью сравнительно с графитовым, чем обус-

[1] Меш — число отверстий на линейный дюйм.



Характеристики электрической дуги высокой интенсивности с опытными углями.

v — кривые расхода анода; *B* — стильбамперные кривые; *U* — вольтамперные кривые; *h* — кривые глубины кратера.

ловлено более быстрое развитие дуги высокой интенсивности. Это подтверждается наряду с ускоренным формированием анодного кратера и синдромным (приблизительно параллельным) [Л. 13] ходом кривых скорости сгорания положительного угля, яркости кратера и напряжения дуги.

При токе дуги $t = 85$ *а*, что соответствует плотности тока $\Delta t = 170$ *а/см²*, отшнуровывание разряда в кратере угля с сажевым фитилем заканчивается. В этом случае глубина кратера достигает своей предельной величины ($h = 6{,}9$ *мм*), яркость кратера также получает наибольшее значение ($B = 103$ *ксб*), кривая $v(t)$ резко меняет свой ход с нелинейного на линейный, а кривая $U(t)$ приближается к максимуму.

При дальнейшем увеличении тока электрический и световой режимы дуги резко ухудшаются, начинается перебрасывание разряда из кратера на оболочку и обратно, значения яркости и глубины кратера уменьшаются, напряжение дуги не возрастает, а скорость сгорания изменяется по прямой. Дуга с углями с сажевым фитилем при $\Delta t > 170$ *а/см²* технического интереса не представляет.

Угли с графитовым фитилем показывают весьма замедленное развитие дуги высокой интенсивности, связанное с малой испаряемостью графитового фитиля.

Развитие дуги высокой интенсивности углях с графитовым фитилем заканчивается токе $t = 110$ *а*, что соответствует плотности $\Delta t = 220$ *а/см²*. Такая большая плотность при углях с графитовым фитилем создает не устойчивый световой и электрический реж дуги. Угли с графитовым фитилем обеспечи равную яркость (103 *ксб*) с углями с сажев фитилем при большей плотности тока прим на 20%, но при меньшей примерно на 40% рости сгорания положительного угля. Вм с тем, угли с графитовым фитилем при ра скорости сгорания с углями с сажевым фити дают повышенную приблизительно на яркость кратера при повышении приблизите на 30% плотности тока.

Развитие дуги высокой интенсивности у о ных углей с фитилем из искусственной сажи массы заканчивается при $t = 95$ *а*. Эти угли ходу развития дуги занимают промежуто положение между углями с сажевым и граф вым фитилями. Они ближе к углям с сажев фитилем, от которых отличаются только вел ной частиц порошка, имея одинаковую велич кристаллитов. Эти угли обладают и несколь меньшей скоростью сгорания сравнительн углями с сажевым фитилем.

В итоге анализа условий развития дуги вы кой интенсивности при опытных углях прихо к выводу, что развитие дуги изменяется в за симости от модификации углерода фитиля. жевый фитиль ускоряет, а графитовый ре замедляет ход ее развития.

Установленная зависимость хода разви дуги высокой интенсивности от вида углер фитиля заставляет по-новому подойти к ус виям, соблюдение которых необходимо для по чения равноярких углей. Поэтому следует с лать необходимое уточнение, включив к пе численным четырем условиям в начале ста пятое, а именно, что в состав фитиля равноярк углей углерод должен вводиться одной и той модификации. Без этого уточнения зависимо между объемной концентрацией редких земе в кратере и их содержанием в составе фити не может быть рассчитана, так как расход ано не будет одинаковым.

В итоге исследования можно сделать следу щие выводы:

1. По мере увеличения тока и развития ду высокой интенсивности выгорание кратера уг с сажевым фитилем идет значительно быстр чем при тех же нагрузках углей с графитов фитилем, что указывает на бо́льшую испар мость сажевого фитиля, связанную с более вы кой дисперсностью его структурных поряд сравнительно с графитовым.

2. Для рационального решения вопроса о де углерода в фитиле проектируемого угля не ходимо учитывать, что сажевый фитиль след применять для углей с малой плотностью то наоборот, в мощных углях, рассчитываемых большую плотность тока, целесообразно испо зовать графитовый фитиль.

. Экспериментально опровергнута точка зре-
авторов, считающих, что все виды углерода
высокой температуре анодного кратера пре-
ются в графит и ведут себя одинаково.
Зависимость скорости развития дуги высо-
интенсивности от вида углерода фитиля
введения в его состав для равноярких
одной и той же модификации углерода.

Литература

1. Н. А. Карякин. Угольная дуга высокой интен-
сти, Госэнергоиздат, 1948.
2. Н. А. Капцов. Физические явления в вакууме
разреженных газах. ОНТИ НКТП СССР, стр. 348 и
1937.
3. Н. А. Карякин. Прожекторы. Госэнергоиздат,
365 и 319, 1944.
4. М. В. Воропанов. Высокоинтенсивная дуга
ой мощности. Кино-фототехника, № 3, стр. 27, 1941.
5. Н. А. Карякин. Эффект высокой интенсивности в вольтовой дуге постоянного тока между угольными электродами. Электричество, № 4, стр. 45, 1946.
6. В. С. Веселовский. Углерод. ОНТИ НКТП СССР, 1936.
7. М. Пирани. Электротермия, ГОНТИ, 1939.
8. P. R. Basset. Electrochemistry of the high intensity arc. Trans. Amer. Electroch. Soc., v. 44, p, 169, 1924.
9. Kohn und Guckel. Zeit. f. Phys., B. 27, стр. 305, 1924.
10. W. Finkelnburg. Hochstromkohlenbogen, стр. 158, München, 1948.
11. H. Schering. Handbuch der Lichttechnik, I, стр. 134. Berlin, 1938.
12. М. В. Воропанов. Высокоинтенсивная дуга малой мощности. Электричество, № 8, стр. 68, 1946.
13. М. В. Воропанов. Специальные осветительные угли, богатые ультрафиолетовой радиацией. Бюллетень ВЭИ, № 6, стр. 30 и 31, 1934.

[21. 6. 1951

рименение годографа затухания к исследованию линеаризованных регулируемых систем

Кандидат техн. наук, доц. Э. Г. УДЕРМАН

Москва

В исследованиях устойчивости линейных систем автоматического управления и регулирования с успехом применяются частотные методы. В статье эти методы прилагаются в одной из возможных форм для решения задач построения кривой переходного процесса в линейных системах с заданными значениями их параметров и для определения наивыгоднейших значений изменяемых параметров линейной системы авторегулирования. На примерах показано применение развиваемого метода.

Из многочисленных
тем автоматического
улирования и следя-
х систем можно вы-
ить обширный класс
называемых линеа-
ованных систем, по-
ение которых с до-
очным приближением
ывается линейными дифференциальными
внениями. Этот класс систем здесь рас-
тривается в известном аспекте.

При проектировании систем автоматического
авления и регулирования, как правило, сле-
обеспечить: 1) устойчивость системы; 2) за-
ную ее точность в установившемся состоянии.
ьма часто приходится считаться с заданными:
инимальной длительностью переходного про-
са при определенных возмущениях и началь-
условиях; 4) пределами допустимых значений
оты основного колебания[1] и перерегули-
ания.

Для оценки систем, подверженных действию
мущений, имеющих характер стационарных
чайных величин (помех и т. п.), в послед-
время применяют критерий качества в виде
имума среднеквадратичной ошибки. В на-

[1] Т. е. той из парциальных колебательных составляю
переходного процесса, которая имеет наименьшую
ту.

стоящей работе такие системы не рассматриваются.

В современных системах изложенные четыре требования обеспечиваются правильной структурной схемой системы, включающей необходимые дополнительные звенья (стабилизирующие жесткие и гибкие обратные связи), и правильным выбором тех из параметров системы, которые можно варьировать.

Вопросу устойчивости следящих и регулируемых систем посвящено весьма большое число работ. Однако обеспечение устойчивости системы, будучи необходимым, не является достаточным. Отсюда понятна актуальность проблем анализа и синтеза следящих и регулируемых систем, удовлетворяющих всем или основным показателям качества. В настоящей работе в разрезе этих проблем решаются две задачи: 1) построение кривой переходного процесса устойчивых линейных систем с заданными значениями параметров; 2) определение наивыгоднейших значений изменяемых параметров системы авторегулирования.

Для исследования устойчивости сложных линейных систем регулирования наиболее удобными оказались частотные методы, предложенные сравнительно недавно. Указанные выше

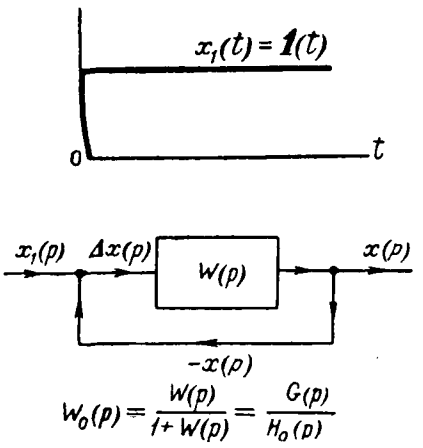


Рис. 1.

две задачи в настоящей работе решаются именно этими методами. При дальнейшем изложении предполагается, что с основными идеями частотных методов исследования устойчивости линейных систем (например, с годографом А. В. Михайлова) читатель знаком.

Рассмотрим линейную следящую или регулируемую систему (рис. 1), находящуюся в установившемся состоянии (или в покое), на вход которой действует единичное возмущение

$$x_1(t) = 1(t) \div \frac{1}{p}.$$

Выходная переменная системы

$$x(t) = L^{-1}\left[\frac{W_0(p)}{p}\right] = L^{-1}\left[\frac{G(p)}{pH_0(p)}\right], \qquad (1)$$

где $W_0(p) = \frac{G(p)}{H_0(p)}$ — оператор замкнутой системы;

$H_0 p$ — ее характеристический полином:

$$H_0(p) = p^n + a_1 n^{n-1} + \ldots + a_{n-1} p + a_n. \qquad (2)$$

Отобразим посредством функции $H_0(p)$ плоскость p корней полинома (2) на плоскость H_0 (рис. 2,*а*,*б*). Образом всех корней $H_0(p)$ является начало 0 плоскости H_0, а образом мнимой оси $j\omega$ плоскости p — кривая $H_0(j\omega)$ в плоскости H_0, называемая годографом Михайлова [Л. 1].

Расширим несколько смысл термина годограф по сравнению с тем, как он обычно применяется в теории регулирования. Будем называть вообще частотным годографом $\underset{\alpha=c}{H_0}(\omega)$ об всякой прямой $\alpha = c$ ($c = пост$), параллельн оси $j\omega$ плоскости p.

Назовем годографом затухания $\underset{\omega=c}{H_0}(\alpha)$ об всякой прямой $\omega = c$ ($c = пост$), параллельн действительной оси α плоскости p. Образы п мых $\omega = пост$ рассматривались также в [Л. 3, Частотные годографы применяются при оп делении степени устойчивости — понятия, введ ного Я. З. Цыпкиным и П. В. Бромбергом [Л.

Среди годографов затухания исключительн значение имеют те, которые являются образа прямых $\omega = пост$, проходящих через ко $H_0(p)$. В плоскости $W(p)$ имеем аналогичн годографы (рис. 2,*в*) $W(j\omega)$, $\underset{\alpha=c}{W}(\omega)$ и $\underset{\omega=c}{W}(\alpha)$, $W(p)$ — оператор разомкнутой системы.

Построение годографов затухания схо с построением кривых Михайлова или Н квиста.

Подстановкой $p = -\alpha + j\omega$ в функцию H_0 [аналогично для функции $W(p)$], получаем:

$$\underset{\omega=c}{H_0}(\alpha) = U + jV =$$

$$= \left[A(\alpha) - \frac{A''(\alpha)}{2!}\omega^2 + \frac{A^{IV}(\alpha)}{4!}\omega^4 - \ldots\right] +$$

$$+ j\omega\left[-A'(\alpha) + \frac{A'''(\alpha)}{3!}\omega^2 - \ldots\right],$$

где

$$A(\alpha) = a_n - a_{n-1}\alpha + a_{n-2}\alpha^2 - \ldots + (-1)^n \alpha^n$$

и $A'(\alpha)$, $A''(\alpha)$, ..., $A^{(n-1)}(\alpha)$ — последовательны производные $A(\alpha)$ по α.

Для построения кривой переходного п цесса для переменной $x(t)$ предложены разл ные приближенные способы [Л. 5, 6, 7, 8 и д не требующие знания корней[2] $H_0(p)$.

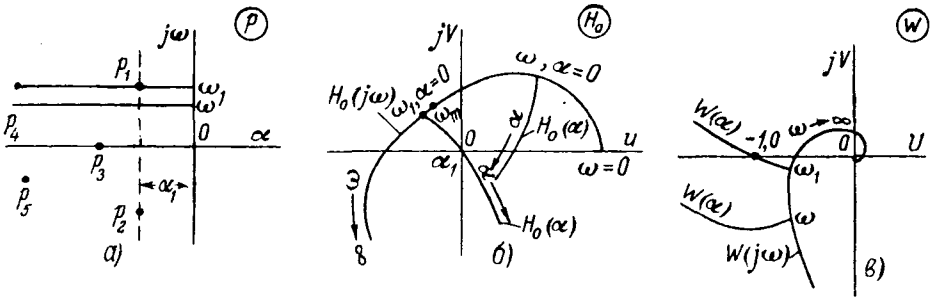


Рис. 2.

Ниже показано, как с помощью годогра затухания и результатов предварительн

[2] Существующие в настоящее время методы опр ления корней полиномов требуют утомительных вы лений.

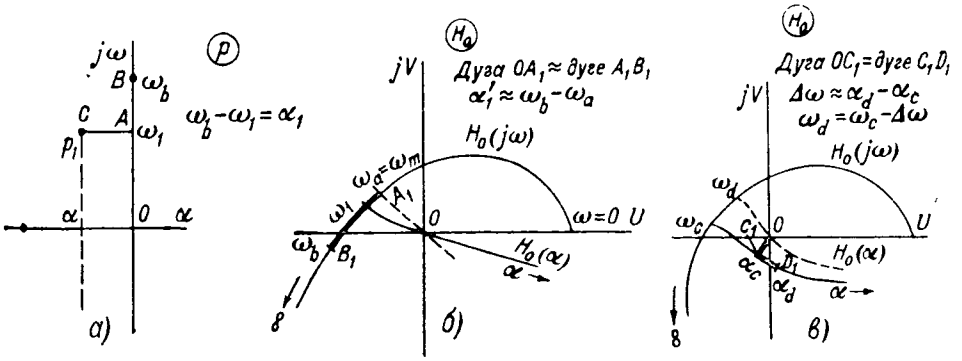


Рис. 3.

...дования устойчивости системы посред... ...годографа Михайлова такая задача ре... ...ся также достаточно просто.

...остроение кривой переходного процесса. ...ь известны коэффициенты (2) и имеется ...граф Михайлова некоторой устойчивой си... ...ы (рис. 3,*б*).

...одуль вектора $H_0(j\omega)$ часто обнаруживает ...мум в интервале низких частот (рис. 3,*б* ...=ω_m). Тогда мнимая часть ω_1 ближайшего ...$j\omega$ комплексного корня в первом прибли... ...нам известна (приложение I):

$$\omega_1 \approx \omega_m, \qquad (5)$$

...ительная его часть — коэффициент за... ...ния α_1 в этом случае будет:

$$\alpha_1 < \omega_1. \qquad (6)$$

...ение α_1 может быть, кроме того, оценено ...средственно по чертежу на основании сле... ...их соображений. Представим себе, что от ...A оси $j\omega$ (рис. 3,*а*) мы перейдем к точке B, ...ящейся от A на расстоянии α_1. Если бы α_1 ...бесконечно мало, то растяжения образов ...AB были бы также равны (в силу постоян... ...растяжений при конформном отображении ...исимо от направления). Допустим, что это ...тво равенства образов отрезков AB и AC ...изительно сохраняется и при конечном ...нии α_1 (в малом). Тогда неизвестная нам ...ина α_1 может быть в первом приближении ...оценена измерением длины дуги годографа ...) от точки A_1 с частотой $\omega_a = \omega_m \approx \omega_1$ до ...B_1 (отрезок A_1B_1 примерно равен от... ...OA_1) с параметром ω_b (рис. 3,*б*).

...ри этом $H_0(j\omega)$ является естествен... ...шкалой для оценки[3] α_1 и в силу вы... ...ных выше соображений

$$\alpha'_1 = \omega_b - \omega_a, \quad (\omega_a = \omega_m) \qquad (7)$$

(штрих обозначает первое приближение, два штриха — второе). Аналогично этому, если нами построен годограф $H_0(\alpha)$, проходящий достаточно близко от начала 0 плоскости H_0, и следует приближенно узнать, насколько нужно изменить ω, чтобы годограф затухания $H_0(\alpha)_{\omega=c}$ проходил вблизи точки O, то можно легко определить $\Delta\omega = \omega_d - \omega_c$ согласно рис. 3,*в*, как

$$\Delta\omega \approx \alpha_d - \alpha_c. \qquad (8)$$

Вообще, вблизи начала плоскости

$$\Delta\omega \approx \Delta\alpha \qquad (9а)$$

и, наоборот,

$$\Delta\alpha \approx \Delta\omega. \qquad (9б)$$

Приближенные равенства (9а) и (9б) тем меньше отличаются от точных равенств, чем меньше (по абсолютной величине) $\Delta\alpha$ и $\Delta\omega$. Таким образом, пользуясь (7), (3), (8) и (9), можно довольно быстро найти значения ближайших к мнимой оси $j\omega$ комплексных корней $p_{1,2} = -\alpha_1 \pm j\omega_1$. Ближайшие к оси $j\omega$ вещественные корни без труда находятся графически согласно (4) из уравнения $H_0(-\alpha) = A(\alpha) = 0$. При порядке уравнения $n = 5$ или 6 этих данных достаточно для определения и всех остальных корней $H_0(p)$.

Все сказанное выше, естественно, полностью применимо к оценке α_1 и ω_1 по диаграмме Найквиста $W(j\omega)$ и годографу затухания $W(\alpha)_{\omega=c}$. Ниже дается пример, из которого уясняется и вся несложная техника вычислений.

Пример. Пусть имеется система из трех инерционных и одного интегрирующего звеньев (рис. 4), оператор которой в замкнутом состоянии $W_0(p) = \frac{G(p)}{H_0(p)}$, где $G(p) = 206\,000$ и

$$H_0(p) = p^4 + 88p^3 + 2\,340p^2 + 23\,200p + 206\,000.$$

Для удобства вычислений положим $p = 10p_0$. Функция $H_0(p_0)$ будет:

$$H_0(p_0) = p_0^4 + 8{,}8p_0^3 + 23{,}4p_0^2 + 28{,}2p_0 + 20{,}6. \qquad (10)$$

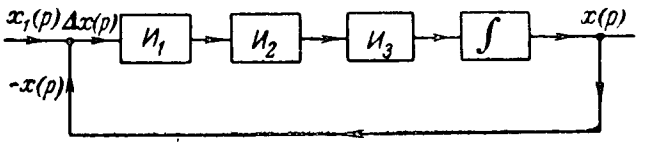


Рис. 4.

[3] Без возможности непосредственной — по годографу ...) — хотя бы и грубой оценки значения α_1 излагае... ...ниже способ определения корней $H_0(p)$ теряет смысл. ...м, между прочим, коренится основной дефект ра...

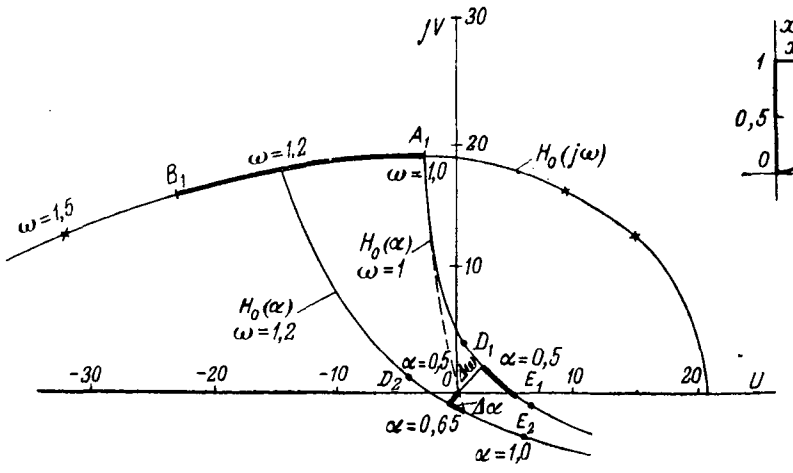


Рис. 5.

Годограф Михайлова, соответствующий (10), показан на рис. 5. Принимаем $\omega_1' = 1,0$ ($\omega_1' = \omega_a = \omega_m$), так как согласно рис. 5 $|H_0(j^1,0)|$ примерно является минимумом $H_0(j\omega)|$. Далее, проводим $A_1B_1 \approx OA_1$, откуда[4] $\omega_b = 1,5$. Следовательно, согласно (7)

$$\alpha_1' = \omega_b - \omega_a = 0,5.$$

Согласно (4) вычисляем $A(0,5)$, $A'(0,5)$ и т. д.:

$$A(0,5) = 20,6 - 28,2\cdot 0,5 + 23,4\cdot 0,5^2 - 8,8\cdot 0,5^3 + 0,5^4 = 11,2,$$

$$A'(0,5) = -10,8;\ A''(0,5) = 23,6 \text{ и } A'''(0,5) = -40,8.$$

Тогда координаты U и V точки D_1 годографа затухания $H_0(\alpha)_{\omega=1,0}$ при $\alpha_1 = 0,5$ согласно (3) будут: $U = 0,4$; $V = 4,0$.

Исходя из положения точки D_1, заключаем, что необходимо вычислить еще одну точку годографа $H_0(\alpha)_{\omega=1,0}$ при $\alpha_1'' > \alpha_1'$.

Полагая $\alpha_1'' = 1,0$ и определяя аналогично предыдущему коэффициенты (4) $A_1(1,0) = 8,0$; $A'(1,0) = -3,8$; $A''(1,0) = 6,0$ и $A'''(1,0) = 28,8$ и найдя (3): $U = 6,0$; $V = -1,0$ для точки E_1, наносим по трем точкам годограф $H_0(\alpha)_{\omega=1,0}$. Затем согласно (9а) находим поправку $\Delta\omega' = 0,2$. Отсюда второе приближение $\omega_1'' = 1,2$.

Вычисляем согласно (3) при тех же вычисленных ранее коэффициентах $A(0,5)$, $A'(0,5)$, ..., $A(1,0)$, $A'(1,0)$ и $A''(1,0)$ и т. д. при $\omega_1 = 1,2$ координаты точек D_2 и E_2 годографа $H_0(\alpha)_{\omega=1,2}$, который проходит достаточно близко от начала плоскости H_0, чтобы можно было воспользоваться (9а, б), что дает: $\Delta\omega'' = -0,05$ и $\Delta\alpha \approx 0,15$. Таким образом, получаем: $\alpha_1 \approx 0,65$ и $\omega_1 \approx 1,15$.

Возвратившись к истинному масштабу, имеем:

$$p_{1,2} \approx -6,5 \pm j11,5.$$

Остальные два корня нетрудно определить из уравнения

$$p^2 + b_1 p + b_2 = 0,$$

где $b_1 = a_1 - 2x_1$ и $p_4 = \frac{a_4}{p_1 p_2}$; получаем $p_3 = -21,9$ и $p_4 = -53,1$.

Оценка точности найденных значений корней $p_{1,2}$ легко производится согласно (11)

$$|\Delta p| \approx \frac{|H_0(\tilde{p}_1)|}{|H_0'(\tilde{p}_1)|}, \qquad (11)$$

[4] Берем $\omega_b = 1,5$, значение, несколько большее, чем для точки B_1.

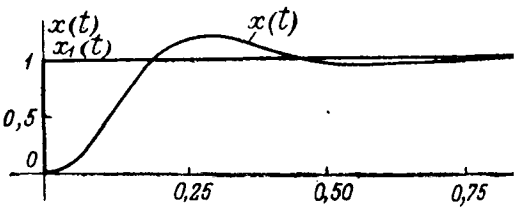


Рис. 6.

где Δp — ошибка в определении p_1 (пр ние III);
p_1 — найденное приближенное зна корня p_1.

Обратное преобразование Лапласа выражения в квадратных скобках (1) д дит при отсутствии кратных корней H_0 известному выражению

$$x(t) = \sum_{k=0}^{n} \frac{G(p_k)}{p_k H_0'(p_k)} e^{p_k t},$$

Выше было показано, что определение корней поли $H_0(p)$, входящих в (12), сравнительно несложно.

Производные $H_0'(p_k)$, как показано в приложе вычисляются попутно. Поэтому применение формул при рекомендуемом здесь способе расчета не встр никаких препятствий, в особенности, если принять во мание, что весьма часто для реальных систем $x(t)$ а симируется первыми двумя или тремя членами п части (12) (нумерация p_k — в порядке возрастания ленных значений p_k по модулю). В примере, приведе выше, имеем согласно (2,II)

$$H_0'(p_1) = \left[-A'(6,5) + \frac{A'''(6,5)}{2!}11,5^2\right] + j11,5\left[A''(6,5) - \frac{A^{(IV)}(6,5)}{3!}11,5^2\right] = -15\,400 + j151$$

$$H_0'(p_2) = -15\,400 - j15\,100;\ H_0'(p_3) = 12\,700;$$

$$H_0'(p_4) = -46\,400,$$

откуда согласно (12) при $G(p) = 206\,000$ после несло преобразований получаем

$$x(t) = 1 - 1,42e^{-6,5t}\sin(11,5t + 43,5°) - 0,03e^{-21,9t} + 0,008e^{-53,1t}.$$

Кривая $x(t)$ показана на рис. 6.

Развитый в данном разделе способ построения вой $x(t)$ показан на простом примере. Однако об вычислений незначительно возрастает и при более в ком порядке знаменателя $H_0(p)$, так как практич для реальных систем в правой части (12) существен значение имеет только небольшое число первых чл суммы.

Определение наивыгоднейших значений раметров стабилизирующих звеньев. Бу считать, что точность системы в установившем состоянии, которая зависит от общего ко фициента усиления разомкнутой системы, задана, и, разумеется, что система должна б устойчивой. Будем также считать, что степ важности каждого из остальных трех пок телей: времени переходного процес перерегулирования, частоты осн ной колебательной составляющ в кривой переходного процесса у навливается в зависимости от условий раб каждой конкретной системы авторегулирова Поставим задачу развить способ постро картины изменения значений вещественно

мой частей, ближайших к мнимой оси $j\omega$ юсов и нулей, передаточной функции системы p в области изменения одного параметра. Имея кривые изменения нулей и полюсов p) в указанной области, можно выбрать ие наивыгоднейшее значение изменяемого иметра, которое обеспечивает наиболее емлемое для нас значение того из показа-ей качества, который в данных конкретных овиях важнее всего. Очевидно, при измене-только одного из параметров системы не-ожно одновременно добиться наивыгодней-значений всех показателей качества.

Как показал Ю. И. Неймарк [Л. 9], можно елить область значений одного, а также к параметров системы, если они линейно не-имы, внутри которой система устойчива. актеристическое уравнение системы $H_0(p)=$ можно представить в виде:

$$H_0(p)=P(p)+lQ(p)=0, \qquad (2a)$$

l—интересующий нас изменяемый пара-р. Из (2а) имеем:

$$l=-\frac{P(p)}{Q(p)}.$$

значив $\frac{P(p)}{Q(p)}$ через $H_1(p)$, заменяя p на $j\omega$ и еняя ω от 0 до ∞, выделяем в плоскости H_1 ость устойчивости I (рис. 7), если таковая ествует и установлено, что хотя бы одна а внутри области I соответствует устой-й системе. Границей ее служит кривая $j\omega$)—годограф Неймарка.

Обычно l—вещественная положительная еменная. Поэтому[4] $l=-|H_1(p)|_D=-U_1$ $H_1(p)|_M=V_1=0$) равно абсолютному значе-абсциссы точек плоскости H_1, лежащих на и отрицательной полуоси этой плоскости, рая расположена в области устойчивости езок A_1A_2, рис. 7).

Представим себе, что из нескольких точек $B_к$ и годографа $H_1(j\omega)$ рис. 7, лежащего над езком A_1A_2, проведены годографы затуха-$H_1(\alpha)$ до пересечения с действительной осью $=\omega_к$

скости в точках $A_к$ (координаты которых ы $U_к$, 0), причем значения α в точках $A_к$ но $\alpha_к$. Тогда нам будут известны веще-ная $\alpha_к$ и мнимая $\omega_к$ части двух из группы айших к мнимой оси $j\omega$ плоскости p со-женных комплексных корней $p_{1,2к}=-\alpha_к\pm$ $\omega_к$ уравнения (2) при значении изменяемого аметра $l_к=-U_к$. Следовательно, откры-ся возможность построить кривые $\alpha_1=f_1(l)$ $\omega_1=f_2(l)$ (рис. 8). Фактически в большинстве чаев не требуется строить годографы зату-ия $H_1(\alpha)$, ибо нас интересуют только точки

[4] D, M—символы действительной и мнимой частей p).

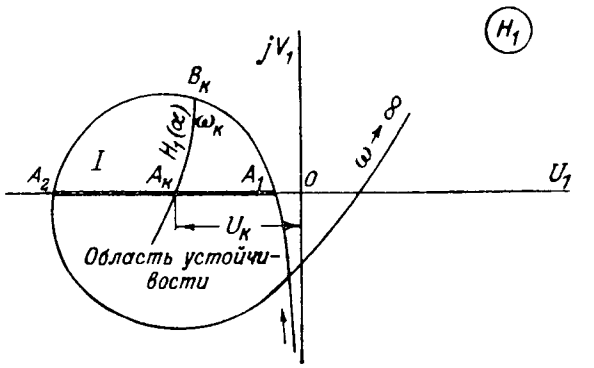


Рис. 7.

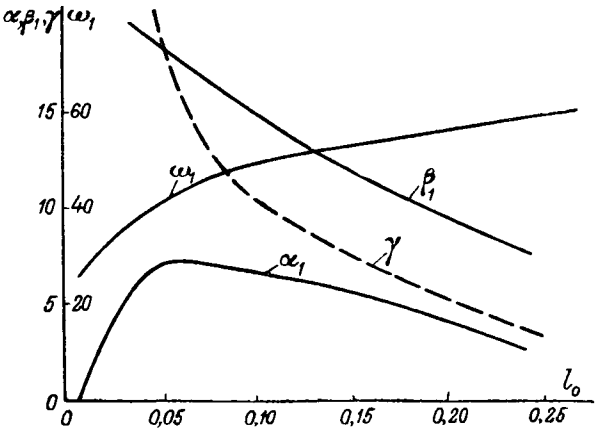


Рис. 8.

пересечения $A_к$ этих годографов с отрезком A_1A_2, которые находятся при помощи уравнения

$$[H_1(p)]_M=V_1=0. \qquad (13)$$

Например, если интересующий нас изменяемый параметр входит только в свободный член a_n уравнения (2), то при порядке системы $n\leqslant 6$ уравнение (13) относительно ω^2 является квадратным, а при $6\leqslant n\leqslant 8$—кубическим. Пусть $l=ba_n$ и $n=6$. Из (2) имеем $l=-H_1(p)=$ $=-b[p^6+a_1p^5+\ldots+a_5p]$;

$$H_1(\alpha)=U_1+jV_1=$$

$$=\left[A_1(\alpha)-\frac{A_1''(\alpha)}{2!}\omega^2+\frac{A_1^{(IV)}(\alpha)}{4!}\omega^4\right]+$$

$$+j\omega\left[-A_1'(\alpha)+\frac{A_1'''(\alpha)}{3!}\omega^2-\frac{A_1^{(V)}(\alpha)}{5!}\omega^4\right],$$

откуда $V_1=0$ является квадратным уравнением относительно ω^2. Кривые изменения нулей передаточной функции $W_0(p)$ в зависимости от l получить нетрудно, так как обычно числитель $W_0(p)=\frac{G(p)}{H_0(p)}$ является полиномом первого, второго и редко более высокого порядка. Поясним изложенное на конкретном примере.

Пример. *Следящая система с тахометрической стабилизацией* (рис. 9). Учитывая постоянные времени поперечной цепи электромашинного усилителя T_1, якорных

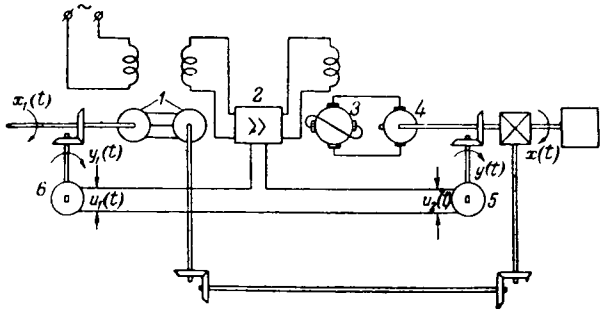


Рис. 9. Следящая система с тахометрической стабилизацией.

1 — сельсины; *2* — электронный усилитель; *3* — электромашинный усилитель; *4* — отрабатывающий серводвигатель; *5, 6* — тахогенераторы.

цепей машин T_2 и электромеханическую постоянную системы T_3, получаем структурную схему рис. 10, эквивалентную схеме рис. 9.

В этой схеме действие тахогенераторов учитывается звеном с оператором $l_0 p$. Если обозначить напряжение тахогенератора через $u(t)$, а скорость его через $\frac{dy}{dt}$, то $u(t) = l\frac{dy}{dt}$. Коэффициенты l_0 и l пропорциональны $\left(l_0 = \frac{l}{k_{00}}\right)$, и любой из них может быть принят за параметр, наивыгоднейшее значение которого требуется найти, имея в виду, что все остальные параметры заданы выбором элементов системы и значением общего коэффициента усиления k.

данных значениях остальных параметров: $k = 50$ [illegible] $T_1 = 0{,}03$ *сек*, $T_2 = 0{,}01$ *сек*, $T_3 = 0{,}05$ *сек* с целью в[illegible] „наивыгоднейшее" значение l_0. Обозначаем $H_1(p)$ [illegible]фициент при p в (14), взятый с обратным знаком, и [illegible]шим (14) относительно $H_1(p)$:

$$H_1(p) = \frac{p^4 + a_1 p + a_2 p + a_4}{p},$$

в (15)

$$a_1 = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} = 133;\ a_2 = \frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_2 T_3} = 5{,}3 \cdot 10[illegible]$$

$$a_4 = \frac{k}{T_1 T_2 T_3} = 33{,}10^6.$$

Заменив в (15) p на $j\omega$ и изменяя ω от 0 до ∞, с[illegible] годограф $H_1(j\omega)$. Отрезок A_1A_2 действительной оси (р[illegible] соответствует значениям H_1 (и l_0), при которых сн[illegible] устойчива. В самом деле, для любой точки отрезка [illegible] например, для точки с координатами $U = -20 \cdot 10^4$, [illegible] (которой соответствует $l_0 = 0{,}04$), замечаем, что ко[illegible]циенты a_k в (14), $a_1 = 133$; $a_2 = 5{,}3 \cdot 10^4$; $a_3 = 2 \cdot 10^5$ и [illegible] $= 3{,}3 \cdot 10^6$ удовлетворяют условию Гурвитца.

Уравнение годографов затухания $H_1(\alpha)$ получаетс[illegible] меной в (15) p на $(-\alpha + j\omega)$. После приведения выр[illegible]ния для $H_1(\alpha)$ к форме аналогичной (3), получаем:

$$H_1(\alpha) = U_1 + jV_1 =$$

$$= \frac{\left[A_1(\alpha) - \frac{A_1''(\alpha)}{2!}\omega^2 + \omega^4\right] + j\omega\left[-A_1'(\alpha) + \frac{A_1'''(\alpha)}{3!}\omega^2\right]}{-\alpha + j\omega},$$

$$(\omega = пост),$$

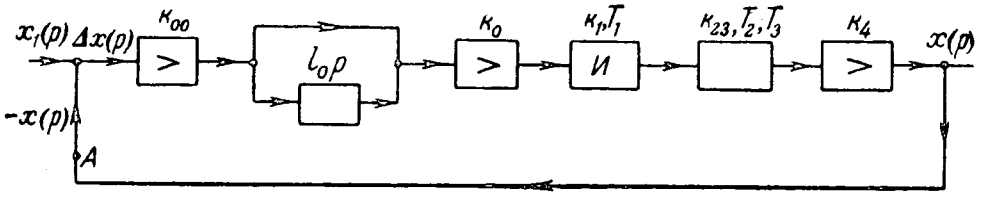


Рис. 10.

Согласно схеме рис. 10 оператор разомкнутой (в точке A) системы

$$W(p) = k_{00}(1 + l_0 p) \cdot k_0 \cdot \frac{k_1}{(T_1 p + 1)} \times$$

$$\times \frac{k_{23}}{[(T_2 p + 1) T_3 p + 1]} \cdot \frac{k_4}{p},$$

откуда оператор (передаточная функция) замкнутой системы

$$W_0(p) = \frac{G(p)}{H_0(p)} =$$

$$= \frac{k(1 + l_0 p)}{p(T_1 p + 1)[(T_2 p + 1) T_3 p + 1] + k(1 + l_0 p)},$$

где $k = k_{00} k_0 k_1 k_{23} k_4$ — общий коэффициент усиления. Характеристическое уравнение системы

$$H_0(p) = p^4 + \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)p^3 + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_2 T_3}\right)p^2 +$$

$$+ \frac{1 + k l_0}{T_1 T_2 T}\, p + \frac{k}{T_1 T_2 T_3} = 0. \qquad (14)$$

Построим кривые изменения полюсов и нуля $W_0(p)$ в области изменяемого параметра l_0 при следующих за-

где

$$\left.\begin{aligned} A_1(\alpha) &= a_4 - 0 + a_2\alpha^2 - a_1\alpha^3 + \alpha^4. \\ A_1'(\alpha) &= \frac{dA_1(\alpha)}{d\alpha} \text{ и т. д.} \end{aligned}\right\}$$

Нас интересуют только точки пересечения нескол[illegible] (4...5) годографов затухания $H_1(\alpha)$ с отрицательной [illegible]луосью (в пределах отрезка A_1A_2, рис. 11), поэт[illegible] в данном случае годографы $H_1(\alpha)$ не строим. Для о[illegible]скания искомых точек пересечения годографов H_1 с отрезком A_1A_2 воспользуемся уравнением $[H_1(p)]$ [illegible] $= V_1 = 0$, которое, как это видно из (3а), является к[illegible]ратным относительно ω^2:

$$\omega^4 - b_1\omega^2 + b_2 = 0, \qquad ([illegible]$$

где

$$b_1 = \frac{A_1''(\alpha)}{2} - \frac{\alpha A_1'''(\alpha)}{6}$$

и

$$b_2 = A_1(\alpha) - \alpha A_1'(\alpha).$$

Здесь $A_1(\alpha)$, $A_1'(\alpha)$ и т. д. те же коэффициенты, что [illegible] (16) и (3а). Они, очевидно, зависят только от извест[illegible] нам коэффициентов a_1, a_2, a_4 и переменной α, значени[illegible] которой задаемся на основании следующих соображе[illegible]

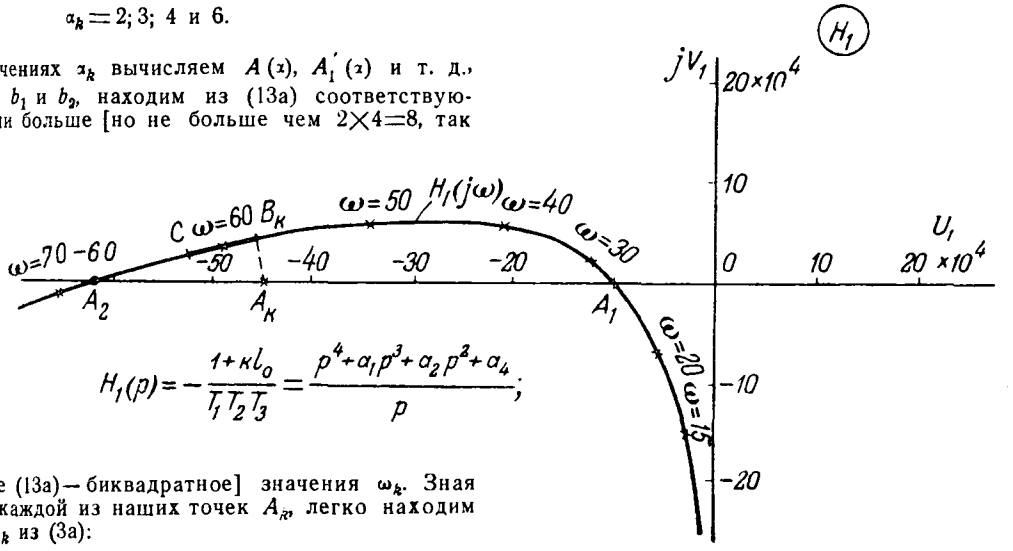
Значения α на годографе $H_1(j\omega)$ во всех его точ[illegible] равны нулю. Очевидно, и в точках A_1 и A_2, $\alpha = 0$. Для [illegible]чек A_k отрезка A_1A_2 левее A_1 и правее A_2 значения α возр[illegible]

модулю. Для точек A_k, близких к A_1 и A_2, зна- легко оценить в первом приближении, пользу- одографом $H_1(j\omega)$ как естественной й, аналогично тому, как это было показано

, для точки A_k ((рис 11). устанавливаем[5] $\omega_k \approx 57{,}5$; Таким образом, можно задаться для нашего кон- о случая, например, следующими четырьмя значе- α_k:

$$\alpha_k = 2;\ 3;\ 4 \text{ и } 6.$$

ких значениях α_k вычисляем $A(\alpha)$, $A_1'(\alpha)$ и т. д., ициенты b_1 и b_2, находим из (13а) соответствую- тыре или больше [но не больше чем $2\times4=8$, так



к. 11.

$$H_1(p) = -\frac{1+\kappa l_0}{T_1T_2T_3} = \frac{p^4+\alpha_1p^3+\alpha_2p^2+\alpha_4}{p};$$

равнение (13а)— биквадратное] значения ω_k. Зная ω_k для каждой из наших точек A_k, легко находим инаты U_{1k} из (3а):

$$U_{1k} = \frac{\left[A_1(\alpha_k) - \frac{A_1''(\alpha_k)}{2!}\omega_k^2 + \omega_k^4\right] - \omega_k^2\left[-A_1'(\alpha_k) + \frac{A_1'''(\alpha_k^2)}{3!}\omega_k^2\right]}{\alpha_k^2+\omega_k^2}.$$

Итоги указанных вычислений представлены в виде α_1 и ω_1 в функции интересующего нас параметра

$$l_0 = \frac{-U_1T_1T_2T_3 - 1}{k}.$$

На же рисунке показана кривая изменения ближай- к оси $j\omega$ чисто вещественного корня β_1 уравнения функции l_0, которая получается, если в (3а) поло- $\omega=0$. Кроме того, на рис. 8 показана кривая γ — ения единственного нуля $W_0(p)$, уравнение которого

$$|\gamma| = \frac{1}{l_0}.$$

Располагая кривыми α_1, ω_1, β_1 и γ в функции l_0, можно ть наивыгоднейшее значение $l_{0н}$. Например, если но, что система не подвергается действию перио- кого возмущения с частотой, близкой к $f = \frac{42}{2\pi} \approx 7$, ецелесообразно выбрать такое значение $l_0 = 0{,}05$, при ом наименьший (по абсолютной величине) из коэф- ициентов затухания α_1 имеет максимум: $\alpha_{1m} = 7$ *сек*$^{-1}$ $\omega_1=7$; $\omega_1=42$). Конечно, следует обращать внима- на отношение $\left|\frac{G(p_1)}{G(0)}\right|$, от которого, хотя и в мень- ере, чем от величины α_1, зависит длительность про- ия переходного процесса. Время переходного про- в нашем случае от последних двух членов суммы не зависит.

В нашем случае

$$\left|\frac{G(p_1)}{G(0)}\right| = \left|\frac{k[1+0{,}05(-7+j42)]}{k}\right| \approx 2{,}3.$$

Так как это отношение $\left|\frac{G(p_1)}{G(0)}\right|$ оказалось сравнительно невелико, останавливаемся на значении $l_0 = 0{,}05$ *сек*$^{-1}$.

Автор в другом месте показал, что нули $W_0(p)$, близко расположенные к началу O плоскости p, увеличивают перерегулирование, а близкие к началу полюсы $W_0(p)$ уменьшают перерегулирование. С этой точки зрения видно, что почти по всех значениях $l_0 \geqslant 0{,}05$ положительное влияние полюса $-\beta_1$ на перерегулирование менее сильное, чем нуля $-\gamma$, что указывает на нецелесообразность увеличения l_0 сверх значения $l_0 = 0{,}05$ также и с точки зрения величины перерегулирования (которое, вообще говоря, в данной системе трудно изменить, варьируя l_0). Итак, останавливаемся на наивыгоднейшем значении $l_0 = 0{,}05$, при котором ближайшие к оси $j\omega$ корни $H_0(p)$; $p_{1,2} = -7 \pm j42$; $p_3 = -\beta_1 = -17{,}5$. Тогда нетрудно определить и корень $p_4 = -101{,}5$. При $x_1(t) = 1(t)$ при этом получается такой переходный процесс:

$$x(t) = 1 - 0{,}9e^{-7t}\sin(42t + 56°) - 0{,}1e^{-17{,}5t} - 0{,}16e^{101{,}5t}.$$

В заключение данного раздела отметим два момента:

1. При выборе согласно характеру кривых изменения полюсов и нулей передаточной функции в области изменяемого параметра некоторого „наивыгоднейшего" значения этого параметра мы при этом получаем также все данные для построения кривой переходного процесса $x(t)$ согласно (12).

2. Если в системе имеется больше, чем один изменяемый параметр, то, найдя указанным способом наивыгоднейшее значение одного из этих параметров (при фиксированных значениях остальных), можно аналогичным путем поочередно исследовать влияние каждого из остальных изменяемых параметров[7].

Как и выше, проводим из точки A нормаль A_kB_k ($j\omega$), откладываем $B_kC \approx A_kB_k$ и полагаем $\alpha \approx \omega_c$ —

Легко заметить, что приближенно кривые α_1 и ω_1 ции l_0 могут быть получены без всяких вычисле- непосредственно по виду рис. 11 использованием й $H_1(j\omega)$, как шкалы для оценки α_1.

ртричество, № 2.

[7] Применение развитого выше метода в плоскости D-разбиения по двум параметрам, нам кажется, нерациональным не только потому, что очень редко характеристический полином $H_0(p)$ содержит два линейных независимых параметра (полагаем, что коэффициент усиления k задается по условию статической точности), но и ввиду громоздкости необходимых при этом вычислений.

Приложение I. *Минимум модуля вектора* $H_0(p)$. Прежде всего отметим, что современные следящие и регулируемые системы характеризуются высокими значениями общего коэффициента усиления, при которых эти системы при отсутствии специальных стабилизирующих средств (звеньев) оказываются неустойчивыми.

Стабилизирующие звенья системы помогают перевести корни полинома $H_0(p)$, находящиеся при отсутствии стабилизирующего звена в правой полуплоскости, в левую. Даже при очень хорошей стабилизации при настройке системы изменением варьируемого параметра вблизи оси слева от нее остается часть корней. Другая часть корней, наоборот, весьма удалена от оси. В самом деле, при изменении варьируемого параметра стабилизирующего звена все корни $H_0(p)$ не могут неограниченно перемещаться влево от оси $j\omega$ плоскости корней, так как тогда получилась бы безинерционная система. Иначе говоря, область устойчивости по изменяемому параметру реальных систем ограничена [например, отрезком A_1A_2 (рис. 11)]. Поэтому вещественная часть ближайших к мнимой оси корней обычно имеет экстремум [максимум| α_1], который сравнительно невелик. Это связано также с тем обстоятельством, что системы регулирования являются системами низкой частоты. „Малым" корням неизбежно сопутствуют очень большие, относительно отдаленные от оси $j\omega$ корни, так как произведение всех корней полинома равно свободному члену $a_n = \frac{k}{\Pi T_i}$, который обычно представляет большое число, по крайней мере в системах, содержащих электрические элементы с относительно малыми значениями постоянных времени T_i. Покажем, что для таких систем годограф $H_0(j\omega)$ часто обнаруживает минимум модуля вектора $H_0(j\omega)$ в точке ω_m, находящейся в окрестности точки ω_1 этого годографа (см. обозначения рис. 3,*а* и *в*).

Интересующие нас системы—низкочастотные, поэтому мы ограничимся рассмотрением существенного для нас интервала частот в окрестности $\omega = 0$. Для простоты предположим, что в плоскости p в рассматриваемом интервале частот имеется одна пара комплексных корней $p_{1,2} = -\alpha_1 \pm j\omega_1$, s корней вещественных $p_i = -\beta_i (i = 1, 2, \ldots s)$, остальные $n - (s+2)$ корней полинома полагаем достаточно удаленными от начала плоскости p.

Модуль вектора $H_0(j\omega)$ тогда приближенно пропорционален в интервале низких частот произведению двух функций частоты:

$$H_1(\omega) = \sqrt{(\omega_{01}^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha_1^2\omega^2}, \qquad (\omega_{01}^2 = \alpha_1^2 + \omega_1^2),$$

$$H_2(\omega) = \sqrt{\prod_{i=1}^{s} (\beta_i^2 + \omega^2)}.$$

Функция $H_1(\omega)$ является инверсной резонансной кривой, имеющей минимум при частоте $\Omega_m = \sqrt{\omega_{01}^2 - 2\alpha_1^2} < \omega_1$, если $\frac{\omega_1}{\alpha_1} > 1$.

Функция $H_2(\omega)$ монотонно возрастает с частотой (рис 12).

Функция $|H_1(\omega) H_2(\omega)|$ имеет минимум, если уравнение

$$\frac{d}{d\omega}[H_1(\omega) \cdot H_2(\omega)] = 0 \qquad (I,1)$$

имеет одним из корней неотрицательное число ω_m. Из (I,1) следует:

$$\frac{dH_1(\omega)}{d\omega} = -\frac{H_1(\omega)}{H_2(\omega)} \cdot \frac{dH_2(\omega)}{d\omega}. \qquad (I,2)$$

При этом $\omega = \omega_m$. Правая часть всегда меньше нуля, так как

$$H_1(\omega) > 0;\ H_2(\omega) > 0 \text{ и } \frac{dH_2}{d\omega} > 0.$$

Следовательно, частота ω_m, при которой возможен минимум функции $H_1(\omega) \cdot H_2(\omega)$, расположена в той области частот ω, где находится левая ветвь кривой $H_1(\omega)$, для которой $\frac{dH_1(\omega)}{d\omega} < 0$. Итак $\omega_m < \Omega_m = \sqrt{\omega_{01}^2 - 2\alpha_1^2}$, причем и подавно $\omega_m < \omega_1$. Частота ω_m тем меньше отличается от ω_1, чем α_1 меньше отличается от нуля.

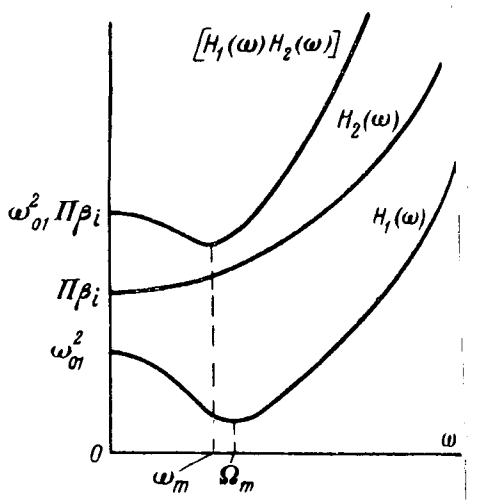


Рис. 12.

Аналогичными рассуждениями можно показать, что при наличии в рассматриваемом интервале частот пар комплексных корней $p_{1,2} = -\alpha_1 \pm j\omega_2$ и $p_{3,4} = -\alpha_2 \pm j\omega_2$ функция $H_1(\omega) \cdot H_2(\omega)$ может иметь до двух минимумов при частотах ω_{1m} и ω_{2m}, причем ω_{1m} может быть как больше, так и больше ω_1, а ω_{m2} всегда меньше ω_2. Можно также показать, что функция $H_1(\omega) \cdot H_2(\omega)$ (при наличии комплексных корней $H_0(p)$ перестает обнаруживать минимум, если среди корней $p_i = -\beta_i (i = 1, 2, \ldots s)$ есть два или больше корней таких, которые находятся достаточно близко к мнимой оси $j\omega$.

Приложение II. *Вычисление производной* H_0'. Если вычислены указанным в основном тексте способом комплексные корни, например $p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_1$, то вычисление производной $H_0'(p_1)$ при $p = p_1$ получается на основании следующего. Для аналитической функции, которой является $H_0(p)$, можно записать:

$$\frac{dH_0}{dp}_{(p=p_1)} = \left(\frac{dH_0(p)}{d(-\alpha)}\right)_{(\alpha=\alpha_1)} = \left(\frac{dH_0(p)}{d(j\omega)}\right)_{(\omega=\omega_1)}.$$

Воспользовавшись выражением (3) для годографа и дифференцируя

$$H_0(\alpha) = \left[A(\alpha) - \frac{A''(\alpha)}{2!}\omega^2 + \frac{A^{(IV)}(\alpha)}{4!}\omega^4 - \ldots\right] + j\omega\left[-A'_{(\alpha)} + \frac{A'''(\alpha)}{3!}\omega^2 - \ldots\right],$$

продифференцировав (3) по $(j\omega)$ и учтя (II,1), получим

$$H_0'(p)_{(p=p_1)} = \frac{dH_0(p)}{d(j\omega)_{(\omega=\omega_1)}} = \left[-A'(\alpha_1) + \frac{A'''(\alpha_1)}{2!}\omega^2 - \ldots\right] + j\omega_1\left[A''(\alpha_1) - \frac{A^{IV}(\alpha_1)}{3!}\omega_1^2 \ldots\right].$$

Для вычисления $H_0'(p_1)$ согласно (II,2) требуется знать коэффициенты $A'(\alpha)$, $A''(\alpha)$ . . . при $\alpha = \alpha_1$. Эти коэф-

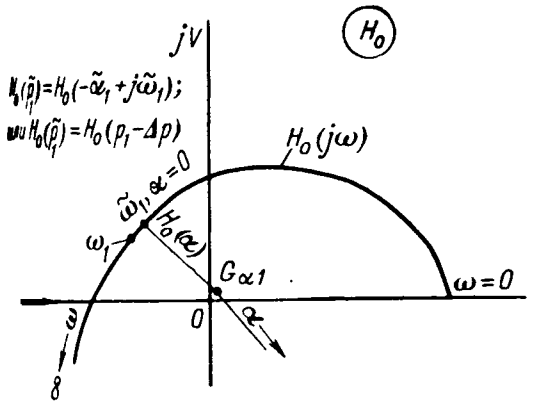


Рис. 13.

менты приближенно легко получить интерполирова-ем данных

$$A'(\alpha_1'),\ A''(\alpha_1'),\ \ldots,\ A'(\alpha_1''),\ A''(\alpha_1'')\ \text{и т. д.},$$

орые вычислялись при определении корней $p_{1,2}$ или можно точно вычислить согласно (4). Напомним, что α_1' и α_1'' — первое и второе приближения к α_1.

Приложение III. *Оценка ошибки в определении кор-*. Определение корней приближенным методом является полным, если нет возможности оценить получившуюся этом погрешность. Допустим, что вычисление иско-го корня изложенным выше способом заканчивается строением годографа $H(\alpha)$, проходящего вблизи начала O кости H_0 (рис. 13) и выбором точки G этого годо-фа с координатой $\tilde{H}_0(\tilde{p}_1)$, где $\tilde{p}_1 = -\tilde{\alpha}_1 + j\tilde{\omega}_1$ — при-ближенное значение корня $p_1 = -\alpha_1 + j\omega_1$. Ошибка в опре-делении искомого корня

$$\Delta p = p_1 - \tilde{p}_1.$$

или

$$\tilde{H}_0(\tilde{p}_1) = H_0(p_1 - \Delta p). \qquad \text{(III,1)}$$

Разлагая (III,1) в ряд Тейлора и отбрасывая члены, содержащие степени Δp выше первой, получаем:

$$\tilde{H}_0(\tilde{p}_1) \approx H_0(p_1) - \Delta p H_0'(p_1),$$

но

$$H_0(p_1) = 0,$$

откуда

$$|\Delta p| \cong \left| \frac{\tilde{H}_0(\tilde{p}_1)}{H_0'(p_1)} \right|.$$

Полагая

$$H_0'(p_1) \approx \tilde{H}_0'(\tilde{p}_1),$$

получаем (11)

$$|\Delta p| \approx \left| \frac{\tilde{H}_0(\tilde{p}_1)}{\tilde{H}_0'(\tilde{p}_1)} \right|. \qquad \text{(11)}$$

Литература

1. А. В. Михайлов. Автоматика и телемеханика, № 3, 1948.

2. Я. З. Цыпкин и П. В. Бромберг. Изв. ОТН, № 12, 1945.

3. W. R. Tvans. Transact. AIEE, т. 67, ч. I, 1948.

4. Н. Т. Кузовков. Сборник № 1 НИИ МПСС, 1949.

5. П. К. Акульшин и др. Теория связи по проводам. Связьиздат, М., 1940.

6. Bedford and Fredendall. Proc. IRE, 30, 10, 1946.

7. Koizumi. Phil. Mag. and Journ. of Sc., June 1935.

8. G. Broun and D. Campbell. Princ. of Servomech., J. Willey, N. Y., 1948.

9. Ю. И. Неймарк. Автоматика и телемеханика, № 3, 1948.

[12. 7. 1951

◇ ◇ ◇

Исследование процессов в электрических цепях с изменяющимися параметрами

Доктор техн. наук, проф. В. Н. МИЛЬШТЕЙН и инж. А. Д. РАБИНОВИЧ

Московский государственный институт мер и измерительных приборов

Предлагается общий метод анализа с помощью эквивалентных схем процессов в сложных линейных цепях при любых изменениях одного из омических сопротивлений цепи, при условии, что все омические сопротивления цепи положительны.

Ряд статей посвящен рассмотрению процессов в линейных электрических цепях при периодических изменениях параметров цепи [Л. 1...3].

Представляет практический интерес общий метод анализа процессов в сложных цепях при произвольных изменениях омического сопротивления одной ветви.

Рассмотрим электрическую цепь (рис. 1), одним из элементов которой является омическое сопротивление $R(t)$, изменяющееся по периодическому закону

$$\left.\begin{aligned} R(t) &= R_0 + \Delta R(t), \\ \text{где} \quad R_0 &= \frac{R(t)_{макс} + R(t)_{мин}}{2}, \\ \frac{\Delta R(t)}{R_0} &< 1 \text{ и } R(t+T) = R(t). \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

На основании принципа компенсации установившееся значение тока i в сопротивлении $R(t)$ цепи рис. 1 можно представить в виде суммы установившихся токов эквивалентных схем (рис. 2 и 3)

$$i = i_0 + i'_1. \quad (2)$$

Схема рис. 3 представляет собой также цепь с изменяющимся сопротивлением. Повторно используя принцип компенсации, можем определить ток i'_1 этой схемы как сумму токов i_1 и i'_2 схем рис. 4 и 5:

$$i'_1 = i_1 + i'_2. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получим:

$$i = i_0 + i_1 + i'_2. \quad (4)$$

Действуя таким образом, после каждой операции получаем замену одной из эквивалентных схем двумя схемами вида, показанного на рис. 6 и 7.

Ток в исходной цепи (рис. 1) определяется суммой

$$i = \sum_0^N i_n + i'_{N+1}. \quad (5)$$

Покажем, что ря равномерно сход Предположим, что т является суммой m си идальных составляю

$$i_0 = I_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + I_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + \\ + \ldots I_m \sin(\omega_m t + \varphi_m).$$

Обозначим сумму амплитуд всех состав щих через

$$\sum_{k=1}^{m} I_k = I_1 + I_2 + \ldots I_m;$$

э. д. с. e'_1, действующая в цепи рис. 3, р

$$e'_1 = -i_0 \Delta R = -\Delta R [I_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \\ + I_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + \\ + \ldots + I_m \sin(\omega_m t + \varphi_m)].$$

Ее максимальное значение меньше велич

$$\Delta R \sum_{k=1}^{m} I_k.$$

Для всех гармонических составляющих e'_1 дуль сопротивления цепи больше R_0. Поэт максимальное значение тока i в цепи рис меньше величины

$$\frac{\Delta R \sum_{k=1}^{m} I_k}{R_0}.$$

Повторяя эти рассуждения, приходим к воду, что максимальное значение тока i_n в рис. 6 оказывается во всяком случае мень величины $\left(\frac{|\Delta R(t)|_{макс}}{R_0}\right)^n \sum_{k=1}^{m} I_k$; следовател сумма $\sum_0^N i_n$, фигурирующая в (5), при любо меньше суммы геометрической прогре $\left(\sum_{k=1}^{m} I_k\right) \sum_0^N \left(\frac{|\Delta R(t)|_{макс}}{R_0}\right)^n$, в которой согласно знаменатель меньше единицы.

При $N \to \infty$ $i_N \to 0$ и ряд равномерно дится. Наличие остаточного члена i'_{N+1} ряда

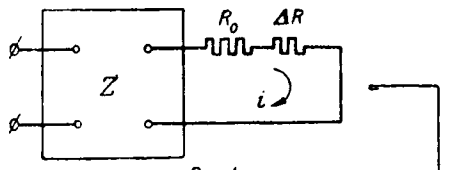


Рис. 1

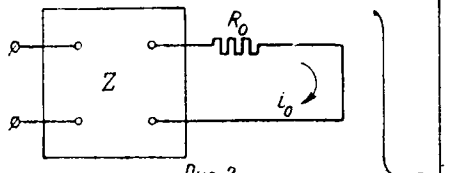


Рис. 2

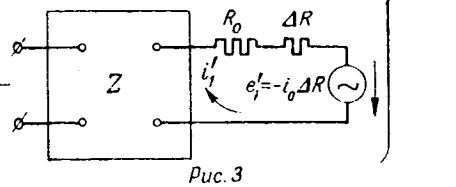


Рис. 3

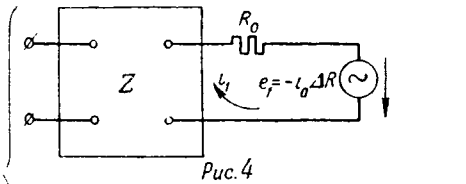


Рис. 4

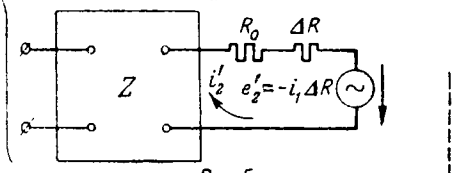


Рис. 5

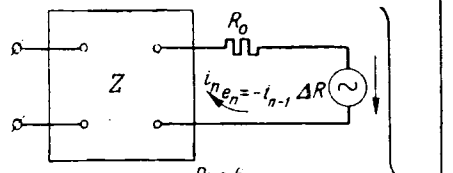


Рис. 6

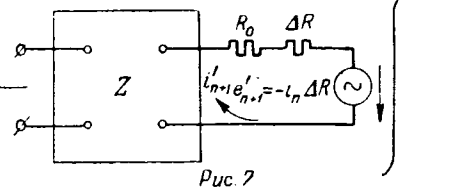


Рис. 7

жет служить причиной нарушения его равной сходимости, так как э. д. с., вызыя появление этого тока, равна $i_N\Delta R$ и ее альное значение при N, стремящемся онечности, стремится к нулю.

вномерная сходимость ряда (5) дает возсть использовать изложенный метод для о определения тока в электрической цепи одически изменяющимся сопротивлением щью линейных эквивалентных схем с поыми параметрами. Определив ток в ветви ощегося сопротивления, мы можем обычтем найти распределение токов и напряво всех остальных ветвях цепи.

казанные соображения остаются справедли для любых значений периода изменения $R(t)$. Это дает основания рекомендовать метод и в тех случаях, когда $R(t)$ изменяется по непериодическому закону ($T=\infty$). Метод может быть использован и при анализе цепей с изменяющимися индуктивностями и емкостями, однако только тогда, когда может быть доказана сходимость соответствующих рядов.

Следует заметить, что изложенный метод анализа можно рассматривать как метод, основанный на идее повторного применения общего принципа оценки малых изменений в электрических цепях с помощью эквивалентных схем [Л. 4]. Действительно, непосредственное использование этого принципа в предположении достаточной малости ΔR приводит нас к эквивалентной схеме рис. 4.

Желая уточнить полученный результат, заменяем элемент ΔR схемы (рис. 5) соответствующей э. д. с. и приходим к следующей эквивалентной схеме и т. д.

Пример. Применим данный метод к анализу цепей, описываемых дифференциальными уравнениями вида:

$$\frac{dy}{dx}+a(1+\lambda\sin x)y=a. \qquad (8)$$

$$(\lambda<1).$$

Уравнение (8), характеризующее процессы в цепях с последовательно соединенными омическим сопротивлением и индуктивностью или омическим сопротивлением и емкостью при соответствующем изменении любого из параметров, можем рассматривать как уравнение некоторой эквивалентной цепи с безразмерными параметрами, показанной на рис. 8.

Здесь

$$I_{бр}=1,\ R_{бр}=a(1+\lambda\sin x)\ \text{и}\ E_{бр}=a.$$

Составляя систему эквивалентных схем и используя четыре первые схемы (рис. 9—12), приходим к приближенным формулам для постоянной составляющей $y-Y_0$ и для коэффициентов A при $\cos x$ и B при $\sin x$:

$$Y_0=1+\frac{\lambda^2\cos\varphi_1}{2\sqrt{1+\frac{1}{a^2}}}+\frac{\lambda_4}{4}\left[\frac{\cos^2\varphi_1}{1+\frac{1}{a^2}}+\right.$$

$$\left.+\frac{\cos(2\varphi_1+\varphi_2)}{2\left(1+\frac{1}{a^2}\right)\sqrt{1+\left(\frac{2}{a}\right)^2}}\right],$$

$$A_1=\frac{\lambda\sin\varphi_1}{\sqrt{1+\frac{1}{a^2}}}+\frac{\lambda^3}{2}\left[\frac{\cos\varphi_1\sin\varphi_1}{1+\frac{1}{a^2}}+\right.$$

$$\left.+\frac{\sin(2\varphi_1+\varphi_2)}{2\left(1+\frac{1}{a^2}\right)\sqrt{1+\left(\frac{2}{a}\right)^2}}\right],$$

$$B_1=\frac{2}{\lambda}(1-Y_0),$$

где

$$\varphi_n=\operatorname{arctg}\frac{n}{a}.$$

С помощью излагаемого метода мы получили выражения для Y_0, A_1 и B_1 в элементарных функциях. Сопоставление величин Y_0, A_1 и B_1 при разных значениях параметров a

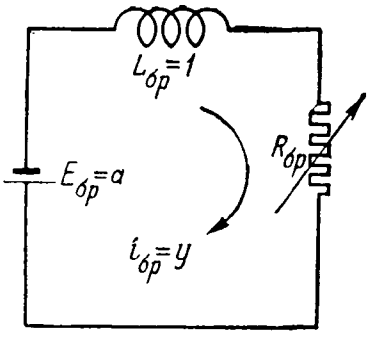


Рис. 8. $R_{бр}=a(1+\lambda \sin x)$.

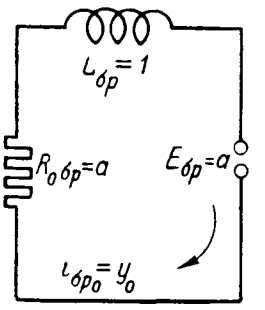


Рис. 9.

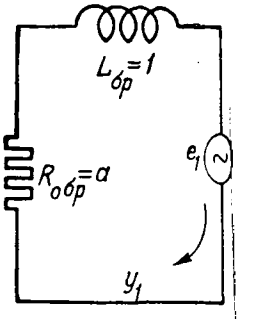


Рис. 10.
$e_1=-y_0\Delta R=-R_0\lambda \sin x$

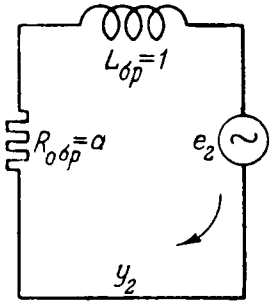


Рис. 11.

$$e_2=-y_1\Delta R=$$
$$=-\frac{\lambda^2 a\cos\varphi_1}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{a}\right)^2}}\sin^2 x-$$
$$-\frac{\lambda^2 a\sin\varphi_1}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{a}\right)^2}}\sin x\cos x.$$

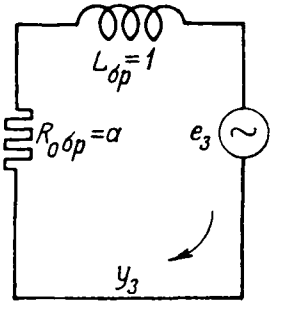


Рис. 12. $e_3=-y_2\Delta R$.

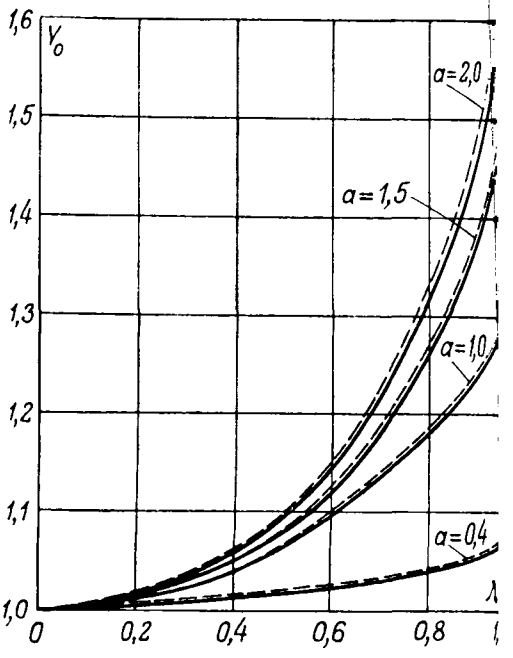


Рис. 13.

и λ с соответствующими величинами, найденными проф. Я. З. Цыпкиным с помощью специальных функций, указывает на хорошее совпадение результатов. Обратимся к рис. 13, на котором показано значение Y_0 в функции λ при различных a (пунктир—кривые, полученные Я. З. Цыпкиным).

Пользуясь такими же приемами, можно получить расчетные формулы для токов и напряжений сколь угодно сложных цепей с омическими сопротивлениями, изменяющимися во времени по любому заданному закону.

Литература

1. П. В. Азбукин. Микрофон как генератор. тричество, № 2, 1924.

2. А. И. Яковлев. Доклады АН СССР, т. IX, № 1948.

3. Я. З. Цыпкин. Нерезонансные электрич цепи с переменным параметром. Электричество, № 1946.

4. В. Н. Мильштейн. Общий метод оценки ма изменений в электрических цепях с помощью эквива ных схем. Электричество, № 5, 1950.

[17. II.

◇ ◇ ◇

Метод получения развертывающего напряжения для электронных осциллографов

Кандидат техн. наук, доц. Л. А. ГОНЧАРСКИЙ

Москва

Описывается метод получения в колебательном контуре пилообразных колебаний напряжения на его емкости для развертки пучка электронов осциллографов и других электронно-лучевых приборов короткими периодическими импульсами, частота которых значительно больше удвоенной резонансной частоты контура. Особенностью описываемого метода получения пилообразных колебаний является эффективное использование источника постоянного тока, позволяющее получать много бо́льшие амплитуды пилообразных колебаний, по отношению к напряжению источника тока.

В отличие от других генераторов пилообразного напряжения для развертки, использующих электронные или реостатные ограничители тока, ограничивающие емкость генератора, в описываемом методе используются пилообразные колебания напряжения, получающиеся на емкости колебательного контура [1].

Существенной особенностью описываемого метода получения пилообразных колебаний является эффективное использование энергии источника постоянного тока, позволяющее получить амплитуды колебаний для линейной развертки пучка электронов, много большие по отношению к напряжению источника постоянного тока, питающего генератор, чем в других генераторах пилообразных колебаний.

Другой существенной особенностью описываемого метода получения колебаний напряжения для развертки является равенство скоростей изменения напряжения в конце и начале каждого пилообразного колебания, обеспечивающее одинаковые скорости развертки в начале и конце времени, причем скорости движения пучка электронов в середине оси оказываются больше, чем на концах оси.

Такой характер нелинейности осциллограммы менее симметричной относительно оси времени является во многих случаях более благоприятным по сравнению с монотонным изменением скорости развертки от одного конца оси времени к другому, характерным для применяемых в настоящее время схем развертки с электронными и реостатными ограничителями.

Сущность описываемого метода получения пилообразных колебаний для развертки сводится к возбуждению в колебательном контуре колебаний особого типа, существенно отличающихся обычных для колебательного контура гармонических колебаний тока и напряжения.

На рис. 1 показана графически типичная форма колебаний тока в индуктивности контура, на рис. 2—типичная форма колебаний напряжения на его емкости, характерных для описываемого колебательного режима. Пилообразные колебания напряжения на емкости контура возникают при питании его кратковременными импульсами тока, пауза между которыми много больше длительности импульсов, а частота импульсов значительно выше собственной частоты контура.

Если импульсы тока поступают извне, пилообразные колебания оказываются вынужденными, если же в схему, содержащую колебательный контур, включен разрядник, позволяющий получать короткие периодические импульсы тока, то пилообразные колебания могут возникнуть самопроизвольно.

Механизм возбуждения пилообразных колебаний в колебательном контуре сводится к отсечке части периода гармонических электрических колебаний короткими периодическими импульсами тока. Переход от гармонических электрических колебаний к рассеченным и постепенный процесс перехода гармонических колебаний в типичные пилообразные, наблюдаемый при

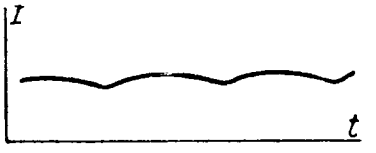


Рис. 1.

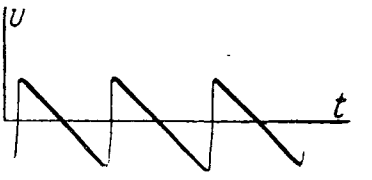


Рис. 2.

увеличении частоты импульсов, питающих колебательный контур, начиная с его резонансной частоты, довольно наглядно изображается на фазовой плоскости. На рис. 3 изображен на фазовой плоскости ряд кривых, сравнение которых ясно показывает постепенную деформацию окруж-

[1] Л. А. Гончарский. Способ использования колебательного контура для получения пилообразных колебаний. Авторское свидетельство № 48583 от 16 июля 1935 г. № 52957 от 3 июля 1938 г.

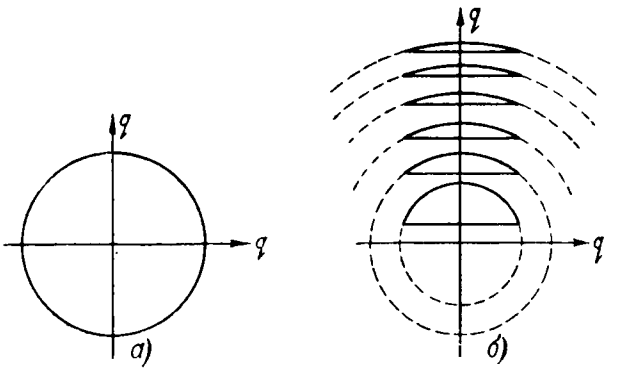


Рис. 3.

ности, соответствующую потере все большей части кривой гармонических электрических колебаний с увеличением частоты импульсов. Приведенные кривые наглядно показывают типичную особенность данного колебательного процесса; чем больше отношение частоты импульсов тока к резонансной частоте контура, тем больше отсекаемый фазный угол колебаний в контуре. При достаточно большой частоте импульсов тока оставшаяся неотсеченной часть колебания оказывается уже очень малой частью периода гармонического электрического колебания. Чем меньше часть периода полной синусоиды гармонического колебания оказывается повторяющейся кривой изменения напряжения на емкости при пилообразных колебаниях, тем меньше относительные колебания скорости изменения напряжения заряжаемой емкости в течение периода колебания. Форма кривой пилообразных колебаний напряжения на емкости контура близка к прямолинейной еще и потому, что перегиб отрезка синусоиды приходится примерно на середину пологой части кривой пилообразного изменения напряжения на емкости контура.

Механизм отсечки части колебания короткими импульсами тока сводится к скачкообразному изменению заряда емкости по величине, а иногда даже и по знаку, при сохранении энергии самоиндуктивности в течение промежутка времени, затрачиваемого на коммутацию, остающуюся практически неизменной. Скачкообразное изменение соотношения энергий, заключенных в емкости и индуктивности, приводит к периодическому скачкообразному изменению фазы колебания, сопровождающегося потерей части периода.

Периодическое скачкообразное изменение фазы гармонических электрических колебаний, приводящее к возникновению пилообразных колебаний, осуществляется двумя принципиально отличными методами.

Сущность первого метода заключается в периодическом кратковременном подключении емкости колебательного контура на источник постоянного тока, как это схематически показано на рис. 4, где периодическое подключение осуществляется при помощи механического вращающегося коммутатора. Сущность второго метода заключается в периодическом кратковременном замыкании накоротко емкости колебательного

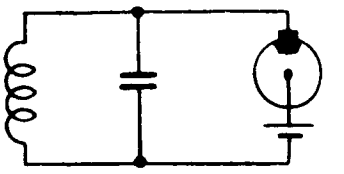


Рис. 4.

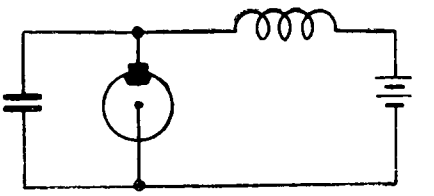


Рис. 5.

контура, приключенного к источнику постоя тока. На рис. 5 показана схема этого тип закорачивание производится также вращая ся коммутатором.

Обе схемы представляют практический рес, связанный с возможностью применени в устройствах, используемых при осциллогр ческом контроле работы некоторых механи

При осциллографировании процессов, на дающихся в испытуемых механизмах, их ч жают часто контактными устройствами, со ненными кинематически с машиной и служ ми для получения коротких периодических пульсов тока, синхронизирующих генера развертывающего напряжения. Включая т коммутатор по одной из двух приведенных в схем, можно получить непосредственно с кол тельного контура пилообразные колебания пряжения для развертки, избавляясь от нео димости использования отдельного генера, развертывающего напряжения. В этих схе при относительно малом затухании можно (мать с емкости колебательного контура ам туду пилообразных колебаний, почти вдвое бо шую, чем напряжение источника тока.

С точки зрения практического использова наибольший интерес представляют, конечно, схемы с механическими, а с электронными и и ными коммутаторами. Разнообразие типов, особенно параметров современных электрон и ионных приборов, дает возможность широ разнообразить схемы генераторов пилообраз колебаний, основанных на импульсном возбу дении колебательного контура. Не вдаваясь особенности построения этих схем, остановим на нескольких наиболее простых схемах, им щих электронные и ионные коммутаторы.

На рис. 6 и 7 показаны схемы с пентода коммутирующими емкость колебательного к тура обоими описанными выше способа В этих схемах пентоды заперты значительн отрицательным смещением, поданным на управляющие сетки. Кратковременные импуль тока, поступающие на управляющую сетку п тода, периодически отпирают его, и в анодн цепи возникают кратковременные импульсы то вызывающие, в свою очередь, появление пил образных колебаний в колебательном конту

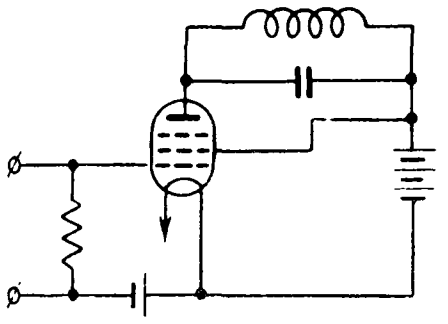


Рис. 6.

рис. 8 и 9 показаны схемы, в которых тация емкости контура осуществляется мощи тиратрона. В обеих схемах тиратро- запираются значительным отрицательным нем, поданным на их управляющие сетки. на смещения подбирается из такого рас- тобы и при амплитуде положительного жения на аноде тиратрона он не мог бы ся самопроизвольно. Тиратроны периоди- зажигаются импульсами или полуволнами ительного напряжения, поступающими на яющую сетку с входного сопротивления. ой из этих двух схем при каждом зажи- тиратрона конденсатор контура разряжает- напряжения $U_б$—$U_г$, где $U_б$ —напряжение ка тока, а $U_г$ —напряжение на тиратро- котором он гаснет. Во второй схеме при зажигании тиратрона конденсатор кон- разряжается до напряжения $U_г$. .

итуда пилообразных колебаний напря- получаемых в обеих схемах, оказывается разности между напряжениями зажига- гашения тиратрона. Следует отметить, что рах с малым затуханием амплитуда пило- их колебаний может намного превосхо- напряжение источника тока и приблизиться сти между удвоенным напряжением бата- удвоенным напряжением гашения тиратро- как напряжение гашения обычно бывает по сравнению с напряжением батареи, то да пилообразных колебаний может ока- порядка удвоенного напряжения батареи. ффективное использование источника по- о тока без ухудшения формы колебаний, емых для развертки, совершенно невозможно для других генераторов развертывающего ния, основанных на использовании огра- ой тока.

и случае, если использованные для ком- электронные и ионные приборы обла- дающей характеристикой благоприятной позволяя самопроизвольно давать крат- ные импульсы тока, схема, служащая учения вынужденных пилообразных коле- может быть использована для генерации извольных пилообразных колебаний.

вод каждого из этих генераторов из ре- ынужденных колебаний в режим генера- юпроизвольных колебаний сводится к нию запирающего смещения на управ- сетке тиратрона до того момента, пока

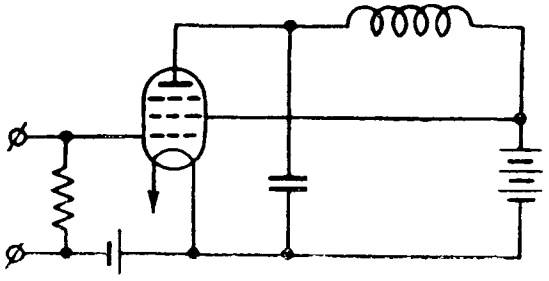


Рис. 7.

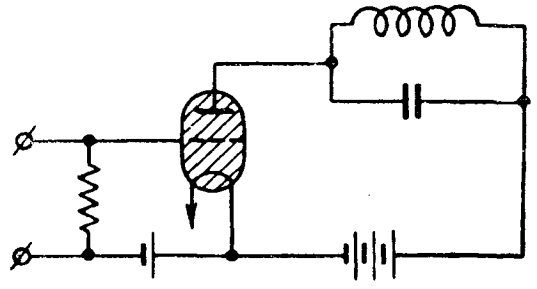


Рис. 8.

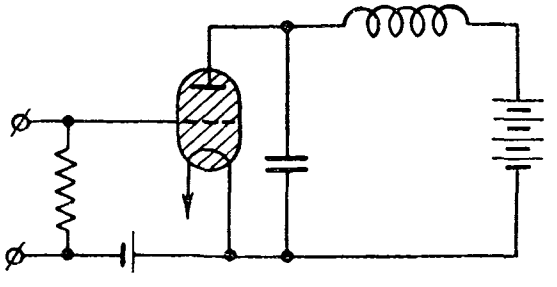


Рис. 9.

он не получит возможности самостоятельно зажигаться. Регулируя величину смещения, можно в широких пределах изменять режим, а с ним и частоту пилообразных колебаний.

Применение тиратронов в качестве разрядников в схемах с самостоятельным возбуждением обусловлено рядом достоинств этих приборов, из которых в первую очередь следует упомянуть: легкость регулирования напряжения зажигания при помощи управляющей сетки, возможность пропускания значительных импульсов тока, относительно небольшое падение напряжения на горящем тиратроне, позволяющее эффективно использовать энергию источника тока и легкую синхронизацию пилообразных колебаний периодическим напряжением, подаваемым на сетку тиратрона. Режим отсечки гармонических электрических колебаний контура разрядника, а стало быть, и частота самопроизвольных колебаний определяются соотношением между напряжением $U_б$ источника тока, напряжением зажигания $U_з$ и гашения $U_г$ разрядника, емкостью контура и его омическим сопротивлением. Пренебрегая излучением энергии контуром и приравнивая подводимую энергию потребляемой в нем, можно получить следующую приближенную

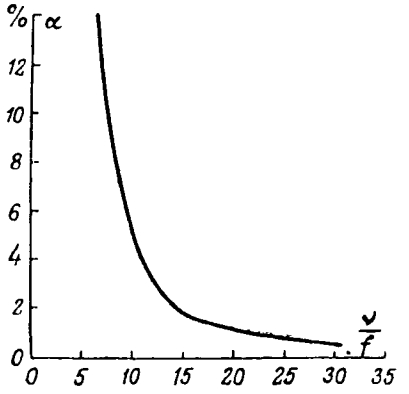


Рис. 10.

зависимость частоты пилообразных колебаний от упомянутых выше параметров:

$$\nu \approx \frac{2U_б - U_з - U_г}{2R\,(U_з - U_г)\,C}.$$

Нетрудно показать, что найденная частота соответствует установившемуся и притом устойчивому колебательному режиму.

Приведенное выше соотношение было получено из условий равенства потребляемой энергии — энергии, подводимой к колебательному контуру. Но так как мощность, потребляемая контуром, прямо пропорциональна квадрату тока в индуктивности, а подводимая к контуру мощность только первой степени этого тока, то случайное отклонение колебательного режима от состояния, удовлетворяющего приведенному соотношению, в сторону более высоких частот, приведет одновременно к нарушению соответствия между подводимой и потребляемой энергиями. Изменение энергии колебательного контура, обусловленное неравенством подводимой к нему энергии — энергии, потребляемой внутри его, возвращает энергетическое состояние, а стало быть, и колебательный режим к первоначальному в случае отклонения частоты его колебаний от заданной условием равновесия. Таким образом, мы видим, что приведенное выражение для определения частоты пилообразных колебаний характеризует устойчивое состояние схемы, а стало быть, и устойчивый колебательный режим.

Пользуясь изложенным выше представлением о пилообразных колебаниях как о преобразованных гармонических колебаниях, полученных в результате отсечки большей части периода, можно дать очень простой прием приближенной оценки

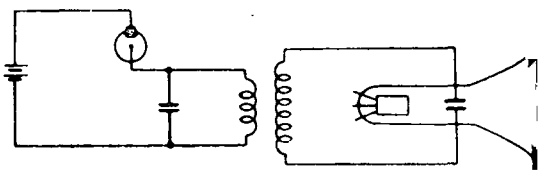


Рис. 11.

нелинейности хода изменения напряжения на
кости колебательного контура с относитель
большим затуханием.

Рассматривая пилообразные колебания
отрезки синусоидальных колебаний, получи
ражение для относительной нелинейности к
баний в форме отношения разности между
ксимальным и минимальным значением
заряжающего емкость контура, к его ма
мальному значению

$$\alpha = \frac{I_{макс} - I_{мин}}{I_{макс}} = 1 - \cos\frac{\pi}{\nu} f,$$

где ν — частота пилообразных колебаний;
f — резонансная частота колебательного
тура. График рис. 10 наглядно пок
вает, как быстро увеличивается ли
ность колебаний с возрастанием отно
ния $\frac{\nu}{f}$.

Нетрудно показать, что возрастание от
шения $\frac{\nu}{f}$ приводит к характеристике нели
ности колебаний, приближенно выражаемой
ратно пропорциональной квадрату этого отно
ния,

$$\alpha \approx \frac{\pi^2}{\nu^2} f^2.$$

Небезинтересно отметить, что особенности ф
мирования пилообразного напряжения, как отр
ков синусоидального, облегчают трансформац
полученного напряжения без заметного ухуд
ния формы колебания. Для этого в качест
индуктивности колебательного контура испо
зуется первичная обмотка повышающего тра
форматора, как это показано на рис. 11. При
няя трансформатор с коэффициентом трансфо
мации около 6 и используя контур с малым зат
ханием, можно получить при напряжении исто
ника в 5 *в* амплитуду пилообразных колебан
для развертки порядка 50 *в*.

[16. 3. 1

◇ ◇ ◇

Правила устройства электротехнических установок[1]

Инж. В. К. БАЛУЕВ
Москва

В изданной 2-й части Правил, несмотря на наличие ...ьного раздела «Определение терминов», значитель...исло определений «разбросаны» в различных разде...например, они даны в разделах «Защита от пере...жений», стр. 49—50, «Электрические сети внутри ..., стр. 61—62, «Уличное освещение», стр. 97, «Тор... электроустановки», стр. 102 и т. д. Так, вопросы ...ения затронуты уже в первом разделе «Общая ... (стр. 13), а определения терминов даны в разделе ...а от перенапряжений» (стр. 49); термины, касаю... зануления, в одних и тех же выражениях повторя...ажды на стр. 11 и 61; определения временных установ...личны в «Правилах» — 1 и 2-го выпуска; кроме ... разделе «Торфяные электроустановки» дается ...определение временных воздушных линий, причем ...желых условий торфяного дела допускается срок (стр. 102), а для более легких условий временных ...ок, находящихся снаружи или внутри помещений, ... они обслуживают предприятия или же здания, нахо...ся в эксплуатации, указывается срок не более ... (стр. 8) и т. д.

Необходимо все определения собрать в одном разде... «Общая часть». Могут быть возражения, что «Пра...» предполагается издавать в виде отдельных оттисков ...лов, но это невозможно. В каждом разделе есть ...ки на другие разделы и, таким образом, надо иметь ...ько оттисков по каждому вопросу. При таком по... вещей лучше издать «Правила» в одном сбор... уничтожив все повторения, неясности и неточности. В «Правилах» совершенно не затрагиваются вопросы ...ных электрических станций и подстанций, электри...ованных механизмов и пр. В последнее время эта ... электротехники получила очень широкое распро...ение. На великих сталинских стройках коммунизма применяется большое количество передвижных электрических станций различной мощности, на шагающем экскаваторе типа ЭШ-14/65 установлено 48 электрических двигателей с общей мощностью до 7 000 *квт*, в лесной промышленности работают тысячи передвижных станций повышенной частоты для питания облегченных электрических пил.

Все большее количество механизмов подвижной энергетики поступает в сельское хозяйство СССР. Заводы отечественной промышленности выпускают в широком ассортименте различные электрифицированные механизмы и инструменты. Поэтому своевременно включить в «Правила» специальный раздел «Подвижная энергетика».

Имеются и ряд небольших замечаний. Пользование «Правилами» затрудняется ссылками на различные «Руководящие указания» (см., например, стр. 115)., которых нет в приложении. Нужно основные «Руководящие указания», не отмененные с введением «Правил», дать в приложении. Пункт «Испытания электроустановок при сдаче в эксплуатацию» имеется только в одном разделе «Торфяные установки» (стр. 112). В этом пункте есть много общих указаний, действительных для многих разделов «Правил» и которые было бы целесообразно перенести в общий раздел по приемным испытаниям. Непонятно отсутствие среди авторов и членов междуведомственных комиссий представителей научно-исследовательских институтов и Академии наук СССР. Такой фундаментальный документ для широких масс электриков, как «Правила», должен быть безупречен по форме и содержанию и должен составляться в тесном содружестве людей науки и практики.

Правила следует снабдить пояснениями, комментарием в виде приложения или отдельной книги для вполне сознательного применения «Правил». Часто надо знать обоснование тех или иных цифровых данных или требований, а также необходимо разъяснение отдельных требований более подробное, чем в тексте «Правил». Современное состояние советской электротехнической науки и наличие многочисленных высококвалифицированных кадров позволяют решить задачу разработки пояснений к «Правилам» быстро и на высоком техническом уровне.

[1] См. Электричество, № 11 и 12, 1949; № 3, 4, 6, 8, 9 и 10, 1950; ..., 1951; № 1, 1952.

Тарифные мероприятия в борьбе за повышение $\cos\varphi$*

Кандидат техн. наук, доц. С. Е. КУЗИН
Ленинградский институт инженеров ...изнодорожного транспорта им. Образцова

Основным методом повышения коэффициента мощности ... уменьшение потребления реактивной энергии. ... этой цели предприятия обязаны улучшать загрузку ...ленного оборудования, уменьшать установленную ...ность трансформаторов и электродвигателей. Кроме ... на предприятия также возлагается устройство уста... для выработки реактивной энергии для уменьшения ...ления ее от электрических станций. Такие установки ...ются либо в виде компенсированных асинхронных ...телей, либо в виде конденсаторных батарей.

Однако по существующему положению выработка ...ятием реактивной энергии не освобождает его ...ию от уплаты надбавок за низкий коэффициент ...ности. Поэтому у предприятия нет возможности осво...ться от снятия штрафов и окупить, таким образом, ...ку, компенсирующую коэффициент мощности.

Представляется естественным, чтобы энергосистемы ...ли потребителей в необходимом размере обоими видами энергии: активной и реактивной. Расход реактивной энергии можно так же нормировать, как и активной. При такой постановке энергоснабжающая организация сама будет обязана следить за выработкой и распределением реактивной энергии в своей системе. Если нужно, то она будет устанавливать компенсирующие устройства там, где в них имеется необходимость, в частности и на предприятиях. Затраты устройства должны покрываться за счет оплаты потребленной предприятиями реактивной энергии.

Тарифная политика имеет еще один коренной дефект. В каждом предприятии соотношение между потреблением активной и реактивной энергии специфично. Также индивидуален и коэффициент мощности предприятий.

Коэффициент мощности также колеблется в течение года — зимой он выше, а летом ниже, что обусловлено сезонным изменением соотношения между потреблением реактивной и активной энергии. Сезонные колебания расхода активной энергии значительно выше: для активной энергии они составляют от +26 до —22,5%, а для реактивной от +12 до —14%, почти в два раза меньше. Очевидно, что изменением в расходе активной энергии обусловлены колебания коэффициента мощности в течение года.

Бывают случаи, когда предприятия в целях повыше-

* Электричество, № 7 и 11, 1950; № 6 и 11, 1951; № 1, 1952

ния cos φ в летние месяцы, когда он ниже, искусственно увеличивают расход активной энергии. Если, например, израсходовать ее на 25% больше, то cos φ останется и летом равным 0,75, что освобождает от штрафов. Энергия обойдется в этом случае дешевле: штраф составляет $0{,}75 \cdot 0{,}5 = 37{,}5\%$ от стоимости энергии, а перерасход энергии на 25% увеличит затраты лишь на $\frac{25}{75} 100 = 30\%$.

Таким образом, получается экономия в стоимости энергии в размере 7,5%. По существу за такое «улучшение» коэффициента мощности с абонента следует взять штраф, как за перерасход энергии на 30%.

Установление одного общего для всех пре нормального коэффициента мощности ведет к то одни из предприятий обречены на вечную уплат фов, а другие на постоянное получение скидок, без к тому оснований.

По всем изложенным соображениям считаем, обходимо передать заботу о выработке реактивно гии для улучшения коэффициента мощности энер жающим организациям, освободив потребителей несвойственной им обязанности. Нужно установить расхода и тариф на реактивную энергию каждог приятия.

О несимметричных режимах работы генераторов[1]

Кандидат техн. наук
И. А. СЫРОМЯТНИКОВ

Еще до войны в Советском Союзе велись научно-исследовательские работы большого практического значения о несимметричных режимах синхронных генераторов. В этих работах были подвергнуты сомнению существующие заводские рекомендации о допустимой несимметрии. Постановка этих работ была вызвана требованиями эксплуатации энергосистем. Особенно остро встал этот вопрос в годы Великой Отечественной войны, после того как был разработан и внедрен в практику эксплуатации метод пофазного ремонта и пофазного автоматического повторного включения линии электропередачи. В этих случаях работа при несимметричных режимах может продолжаться несколько часов, пока производится ремонт. В особых случаях, например при повреждении или обрыве одной фазы трансформаторной группы, работа при несимметричном режиме может длиться несколько суток.

В практике эксплуатации возможны несимметричные режимы также при нарушении контакта в выключателях, в случаях обрыва провода в петле анкерных опор и т. д. Во всех этих случаях работа в несимметричных режимах, особенно в период максимума нагрузки, может быть очень продолжительной. Есть все основания предполагать, что несимметричные режимы работы будут применяться и на дальних линиях электропередачи 400 *кв*.

Естественно, что этой проблемой занимались в ряде организаций. В частности, после войны Тбилисский научно-исследовательский строительный гидроэнергетический институт (ТНИСГЭИ) сумел за весьма короткий срок провести большую экспериментальную работу по исследованию несимметричных режимов гидрогенераторов. Первые результаты этой работы были опубликованы в журнале Электричество, № 8, 1950 г.

После опубликования этой статьи ТНИСГЭИ провел испытания гидрогенераторов мощностью 4 700 *ква*, 60 000 *ква* и 90 000 *ква*. При этом полностью подтвердились основные выводы обсуждаемой статьи.

Работа, проведенная ТНИСГЭИ, конечно, не может дать ответа на все неясные вопросы, но она совершенно четко показала несостоятельность установленных заводами норм на допустимую несимметрию для гидрогенераторов. Результаты этой работы были практически использованы в системе Грузэнерго во время одной аварии на двухцепной линии электропередачи.

Однако электромашиностроительные заводы, в том числе ведущий завод «Электросила» не приняли участия в научно-исследовательских работах по несимметричным режимам генераторов, не оказали квалифицированной технической помощи научно-исследовательским институтам и эксплуатационному персоналу.

Такая позиция в значительной мере задержала внедрение в практику эксплуатации несимметричных режимов и ставит в весьма тяжелые условия работников, проводящих эти работы, так как в случае повреждения машины во время и даже после испытаний с несимметричной нагрузкой причина повреждения всегда может быть от за счет несимметричной нагрузки.

Характерно выступление главного инженера «Электросила», Ф. К. Архангельского по поводу Г. Н. Тер-Газаряна (Электричество, № 8, 1950). В (Электричество, № 4, 1951) Ф. К. Архангельский щает внимание на опасность вибрации двойной ч на ошибку при определении потерь из-за вытеснен и т. п. Но существо письма заключается не в эти ных замечаниях, а в категорическом нежелании до увеличение норм на несимметричную нагрузку гене

Одно время наметился некоторый сдвиг в отно работников завода «Электросила» к этому вопрос Всесоюзном совещании по электрическим машинам ябре 1946 г. Д. В. Ефремов в своем выступлении на возможность повышения допустимой несимметрии ше чем на 5%. К сожалению, это осталось только гим пожеланием.

Вследствие пренебрежения испытаниями в пр разработки, у некоторых машин дефекты были выя только в процессе эксплуатации. Завод недостаточ чает опыт эксплуатации и не проводит исследовани вых образцов нового типа машин в эксплуатации, например, при выпуске крупных машин нового типа «Электросила», внося ряд конструктивных изме в целях борьбы с вибрациями, вызываемых двойной костью, не измерил величины этих вибраций на таки эксплуатируемых машинах.

Следует отметить, что на заводе «Электросила» ляется иногда косность и консерватизм также в неко других вопросах. Так, например, обстоит дело с су генераторов в неподвижном состоянии. Этот метод, р ботанный советскими инженерами, широко приме в энергосистемах. Десятки крупных машин успешно ли сушку новым методом. Завод, между тем, возра против применения этого метода сушки в эксплуат

После этих общих замечаний рассмотрим замеч Ф. К. Архангельского по статье Г. Н. Тер-Газаряна.

1. Из статьи Г. Н. Тер-Газаряна вовсе не сле что принятая в настоящее время величина допуст токовой нагрузки для системы обратного вращения в 5% обусловлена преимущественно соображениями пустимых электрических нагрузках. В статье лишь о чаются особенности, отличающие гидрогенератор от богенераторов в части дополнительного нагрева от обратной последовательности, а также то, что пере обмотки возбуждения гидрогенераторов в нормальном жиме меньше, чем у турбогенераторов. Данные таб приведенные в статье, весьма убедительно это показыв

2. Неизвестно, почему Ф. К. Архангельский голос но принимает, что увеличение вибрации вследствие нес метричной нагрузки произошло в результате вибра 100 *гц*. Это заблуждение лишний раз указывает на не ходимость участия завода в испытаниях.

3. Следует остановиться на вопросе о дополнитель механических усилиях в швах, которые возникают вибрации 100 *гц*. Ф. К. Архангельский заявляет, что пытания, проведенные на одной крупной гидростанц подтверждают недопустимость увеличения несимметрич нагрузки более чем на 5%. Прежде всего следует у

[1] Электричество, № 8, 1950; № 4, 1951; № 1, 1952.

что гидрогенератор, на котором производились из-
, изготовленный заводом «Электросила», имел ряд
ых заводских дефектов. Ротор этого гидрогенера-
— неправильной эллиптической формы, вследствие
размеры зазоров различны, что привело к задева-
ротора о статор. Произведенная заводом сборка
атора — низкого качества. На этом генераторе, имею-
более 700 швов, измерения были произведены всего
на трех швах. Измерения показали, что при нор-
ой работе напряжения в швах в 5 раз больше рас-
. Это свидетельствует либо об ошибке в измерениях,
о недопустимо низком качестве сварки, но никак не
служить доказательством недопустимости несиммет-
ой нагрузки. Вероятнее всего дело в качестве сварки,
учшение которой заводу следует обратить самое
ное внимание в связи с тяжелыми повреждениями
ах сварки на некоторых генераторах завода «Элек-
ла» при нормальной и вполне симметричной нагрузке.
ьма странно, что заводом не используются дости-
и советской металлургии в части получения каче-
ых сварных швов, прочность которых не ниже проч-
металла свариваемых деталей. Известны способы
шения прочности сварных швов путем наклепа и др.
Таким образом, в этом вопросе Ф. К. Архангельский
тся скрыть истинную причину ограничения несим-
.

Замечание Ф. К. Архангельского о необходимости
вытеснения тока в обмотке возбуждения теоретиче-
совершенно правильно. Но недоучет этого фактора
Тер-Газаряном не имеет практического значения, так
перегревы обмотки возбуждения определялись по
ениям, а не расчетным путем.

Ф. К. Архангельского поддерживает проф. А. Е. Алек-
замечания которого также умозрительны. Подобно
К. Архангельскому А. Е. Алексеев, не располагая
ыми данными, голословно возражает Г. Н. Тер-
, собравшему обширный экспериментальный мате-
А. Е. Алексееву, как видному ученому, следовало бы
ть активное участие в работах по исследованию
имеричных режимов и своевременно оказать помощь
роведении этих работ другими организациями.

Е. Алексеев в своем письме указывает, что для
ных сварных гидрогенераторов ограничение не-
рии нагрузки в 5%, введенное заводом «Электро-
вызвано недостаточной усталостной прочностью
тов крепления сердечника статора вследствие ви-
100 *гц*. Совершенно очевидно, что такое ограни-
ло быть введено только после проведения спе-
ых исследований. Однако такие исследования ни-
опубликованы и, повидимому, вообще отсутствуют.
письма А. Е. Алексеева следует, что вибрация
представляет большую опасность для целости
х швов. Эти вибрации имеют место и при симмет-
нагрузке, поэтому им следовало бы уделить вни-
в таком обширном труде А. Е. Алексеева, каким
тся его книга «Конструкции электрических машин»,
1949 г. Однако этим вибрациям в ней не уделено
го внимания.

Учитывая большую важность и актуальность проводи-
работ по несимметричным режимам генераторов и
ность проведения дальнейшего углубленного и
рочного исследования этих режимов, электромаши-
ительным заводам и заводу «Электросила» в пер-
очередь следует принять самое активное участие
ледованиях по этому вопросу, производящихся экс-
ционными работниками совместно с научно-иссле-
ьскими организациями (ТНИСГЭИ, ЦНИЭЛ).

Кандидат техн. наук Л. Г. МАМИКОНЯНЦ

Дискуссия, развернувшаяся по статье Г. Н. Тер-Га-
«Экспериментальное исследование несимметричного
гидрогенераторов», опубликованной в журнале
ичество, № 8, 1950), представляет значительный
.

Основные положения по определению допустимой не-
рии нагрузки синхронных генераторов, в особенно-
сти турбогенераторов, были изложены И. А. Сыромятниковым в его книгах «Определение допустимой нагрузки синхронных машин при несимметричных режимах» (ГЭИ, 1944) и «Вопросы эксплуатации турбогенераторов» (ГЭИ, 1948). Большая работа по исследованию допустимой несимметрии нагрузки гидрогенераторов проведена ТНИСГЭИ МЭС. Частично результаты этой работы опубликованы в статье Г. Н. Тер-Газаряна, являющейся предметом дискуссии.

Казалось бы, что работники электропромышленности, в частности завода «Электросила», не менее, чем работники эксплуатации, заинтересованы в разрешении этого вопроса. Однако завод «Электросила» долго не только оставался в стороне от работы, но и возражал против проведения испытаний на машинах, находящихся в эксплуатации, что естественно, задержало решение этого важного практического вопроса. Лишь в 1950 г. представители завода «Электросила» приняли участие в испытании одного гидрогенератора, проведенном Мосэнерго совместно с ТНИСГЭИ.

На результаты этих испытаний и ссылается Ф. К. Архангельский в своих замечаниях к статье Г. Н. Тер-Газаряна, забывая о том, что испытуемый генератор был совершенно неудовлетворительно выполнен, так что эти испытания не показательны. При решении такого вопроса как определение величины допустимой несимметрии нагрузки синхронных машин, нельзя к тому же делать какие-либо обобщающие выводы по результатам испытаний одного генератора.

Естественно было ожидать, что такие специалисты по электрическим машинам, какими являются А. Е. Алексеев и главный инженер завода «Электросила» Ф. К. Архангельский, приславшие в редакцию журнала письма по поводу обсуждаемой статьи, выскажутся по существу работы — ее значению, основным выводам. Однако они ограничились отдельными замечаниями, не подкрепленными опытными данными, имеющими, видимо, целью оправдать существующие ограничения допустимой несимметрии нагрузки гидрогенераторов, а также заставить автора, как об этом прямо пишет А. Е. Алексеев (Электричество, № 1, 1952) (а вместе с ним и читателей — и это главное), отойти «от позиций обсуждаемой статьи».

Рассмотрим замечания специалистов завода «Электросила» по существу.

1. Ф. К. Архангельский и А. Е. Алексеев оба несправедливо приписывают автору то мнение, что ограничение величины токов обратной последовательности у гидрогенераторов обусловлено в основном нагревом ротора. Такое утверждение неправильно. В тексте и в выводах статьи рассматриваются не только вопросы нагрева, но также указывается на возможность увеличения вибрации гидрогенераторов за счет составляющей, имеющей частоту 100 *гц* (Электричество, № 8, 1950). и при оценке величины допустимой несимметрии нагрузки учитываются оба фактора.

В своем первом ответе (Электричество, № 4, 1951) автор справедливо указывает, что неправильно было бы считать, как это делают Ф. К. Архангельский и позднее А. Е. Алексеев, что единственным фактором, определяющим величину допустимой несимметрии нагрузки гидрогенераторов, является увеличение составляющей вибрации с частотой 100 *гц*. Разнообразие конструктивных выполнений гидрогенераторов заставляет оценивать оба эти фактора опытным путем и ограничивать допустимую несимметрию по тому из них, который имеет преимущественное значение.

2. Ф. К. Архангельский указывает, как на недостаток, что в статье приведены лишь данные по суммарной вибрации гидрогенераторов, без выделения составляющей частоты 100 *гц*. Этот упрек формально справедлив, однако он не меняет существа. Как указывает автор в своем первом ответе (Электричество, № 4, 1951), абсолютное увеличение вибрации настолько мало, что если принять его целиком обусловленным составляющей 100 *гц*, то и в этом случае для большинства испытанных генераторов может быть допущена несимметрия нагрузки, значительно больше чем 5%.

3. Ф. К. Архангельский указывает, что для правильного суждения о допустимой вибрации в 100 *гц* и кратных ей необходимо измерять (например, с помощью тензометров сопротивления) те дополнительные механические

напряжения в швах, которые возникают при несимметричных нагрузках. Положение совершенно правильное, но не опровергающее результаты работы. Его скорее надо отнести к тому «что еще надо сделать» в дальнейшем (можно указать и ряд других вопросов и методов исследования, которые будет целесообразно рассмотреть и применить при дальнейшем изучении вопроса о допустимой несимметрии нагрузки электрических машин). Тензометрические методы исследования только недавно стали применять для определения усилий, возникающих в электрических машинах при различных режимах. Безусловно, они дадут много нового и ценного для обоснования и изменения существующих норм вибраций и допустимых механических нагрузок отдельных узлов крепления электрических машин. Но пока еще опытные данные, накопленные этими методами, совершенно недостаточны. Поэтому было бы совершенно неправильно, ссылаясь на наличие этих методов, опорачивать выводы, полученные на основании ранее проведенных экспериментальных исследований другими методами.

4. Четвертое замечание Ф. К. Архангельского о необходимости учета вытеснения периодической составляющей тока при определении потерь от поля обратной последовательности в обмотке возбуждения справедливо, это признает и автор в своем ответе А. Е. Алексееву (Электричество, № 1, 1952). Однако оно ничего не меняет по существу: выводы автора базировались на результатах испытаний.

В связи со всем изложенным непонятно утверждение А. Е. Алексеева о том, что ответы автора на замечания Ф. К. Архангельского являются «умозрительными»» и «не дают автору права делать вид, что он остается на позициях обсуждаемой статьи».

Естественно, что автор, базируясь на большом числе опытных данных, описанных в статье и полученных позже, остался на своих принципиальных позициях, не изменил своего мнения и считает, что у многих гидрогенераторов допустимая несимметрия нагрузки может быть значительно больше 5%.

Правильнее считать умозрительными замечания Ф. К. Архангельского и А. Е. Алексеева, не подкрепленные серьезными опытными данными или аналитическими исследованиями.

Остановимся на имеющемся в обоих письмах утверждении о том, что ограничение несимметрии нагрузки величиной 5% для гидрогенераторов «обусловлено исключительно соображениями о механических напряжениях в сварных швах от вибраций с частотой 100 *гц* и выше» (Электричество, № 4, 1951). Это утверждение может создать впечатление, что завод имеет какие-то расчетные или экспериментальные работы, которые положены в основу ограничения несимметрии нагрузки именно 5%. Нам такие работы неизвестны (в печати они не были опубликованы). Едва ли вообще можно серьезно говорить о том, что для всех гидрогенераторов, имеющих различные конструкции, мощности и скорости вращения, получается одна и та же «магическая» цифра в 5%. Более того, ведь та же цифра, совсем из других условий, дается заводом и для турбогенераторов (а также и для других машин).

Скорее следует признать, что сначала была выбрана эта цифра и лишь позже появились попытки ее обосновать.

В заключение следует отметить, что работы по определению допустимой несимметрии нагрузки, конечно, еще далеко не закончены и они *будут* продолжаться. Следует надеяться, что научно-исследовательские организации и электромашиностроительные заводы примут в них активное участие.

Кандидат техн. наук Э. Г. ФАЙНШТЕЙН

Обширный опытный материал, собранный Г. Н. Тер-Газаряном (Электричество, № 8, 1950), может служить базой для некоторых обобщающих выводов по дискусируемому вопросу и отправным пунктом для дальнейших исследований. В работе ТНИСГЭИ экспериментально обследовано большое число гидрогенераторов при работе на несимметричную нагрузку и сделан правильный вывод, что в отношении нагрева роторной обмотки гидрогене выгодно отличаются от турбогенераторов по услови тиляции, наличию теплового запаса и т. п. Нагрев ной обмотки гидрогенераторов обычно не препя увеличить ток обратной последовательности более 5% (табл. 6 статьи). На числовых результатах изм приведенных в табл. 6, ни в какой мере не ск неточность в соображениях автора, связанная с не мостью аналитического учета эффекта вытеснения

Не требует доказательства, что нагрев статори мотки и активной стали при номинальном токе в на нагруженной фазе не превзойдет допустимых значен как практически останутся неизменными составляющи вышения нагрева от потерь в меди статора, ротора, и др.

Правильно отмечает Ф. К. Архангельский (Элек ство, № 4, 1951), что для суждений о вибрациях с швов крепления активной стали проведенные изм недостаточны. Эти измерения лишь косвенно (и по составляющей 100 *гц*) могут характеризовать от пульсаций вращающего момента. Однако больш испытанных генераторов, описанных в статье, имели корпуса без сварных швов; поэтому замечание Ф. хангельского, сделанное без соответствующей оговор объективно.

Сварные швы генераторов должны быть выпо с большим запасом уже потому, что при коротких з ниях на них воздействует значительная ударная на в несколько, иногда в 5 ... 7, раз превышающую мальную.

Допустимые напряжения в сварных швах при сивной нагрузке в два раза больше, чем при ус (см. А. Е. Алексеев «Конструкция электрических ма ГЭИ, 1949 г.). Конечно, переход от усилий к напряж в отдельных узлах, связанный с инерцией масс и нансными явлениями, приводит к тому, что отно напряжений в сварных швах генератора при ко замыканиях и несимметричной нагрузке отличается ношения моментов на валу генератора, вызывающи напряжения. Однако легко представить, как велико но быть это отличие, чтобы полагать недопустимой метрию больше чем в 5% тока обратной последов ности. Следовательно, сварные швы, если только дефектны, не должны ограничивать ток обратной по вательности величиной 5%. Подтверждением этому с проведенные после опубликования статьи опыты бе рийной работы гидрогенератора СВ-750/60-40 на несим ричную нагрузку при номинальной активной нагруз $\frac{I_2}{I_1} = 25\%$ и др.

Кроме срезывающих усилий от пульсаций мом в сварных швах действуют радиальные разрывные ус от сил магнитного тяжения. Эти усилия имеют место при симметричной нагрузке, так и при холостом ход бужденного генератора, если активная сталь статора статочно плотно спрессована. В них имеются состав щая 100 *гц*, вследствие неоднородности магнитного в расточке и низкие частоты, обусловленные дефе сборки генератора, неравенством воздушных зазоров Только в том случае, если жесткость цилиндра акт стали мала вследствие ослабления прессовки, сварные воспринимают усилия, могущие привести к их об Этим обстоятельством, повидимому, объясняются нере случаи обрыва сварных швов в эксплуатации при нор ной симметричной нагрузке.

При несимметричной нагрузке в расточке ста кроме потока положительной последовательности, им поток, компенсирующий падение напряжения от тока рицательной последовательности в сопротивлении x_2, и ток третьей гармонической. Величина первого, даже машин без успокоительной обмотки, обычно не бо $0{,}4\,\frac{I_2}{I_н}$, а второго — $0{,}1\,\frac{I_2}{I_н}$ потока положительной по довательности.

Амплитуды магнитного потока при величинах I_2, чительно превосходящих 5%, будут еще соизмерим значениями, получающимися при неравенстве зазоров, торые имеют место на эксплуатируемых машинах. ким образом, и это обстоятельство не может слу оправданием ограничению допустимой несимметрии

братной последовательности. Здесь уместно подчеркнение успокоительных обмоток в отношении уменьзбраций сварных швов.

ывает никакого сомнения, что измерение напряв швах весьма полезно. Однако тензометрические ки пока еще редки и массовое их применение зательно. Отсутствие этих измерений не должно быть ием постановке опытов работы генераторов с нетной нагрузкой.

ед постановкой опытов работы генераторов на нетную нагрузку необходимо только произвести тщаосмотр, обращая внимание на плотность активной наличие других дефектов. В том случае, если обпризнаки ослабления прессовки, например в виной коррозии, опыты несимметричной нагрузки производить только после устранения явных де-

ает указать на дефектность сварных швов неконераторов завода «Электросила». Например, на ах СВ-750/75-40 и других были оборваны почти ные швы креплений статора, хотя эти генераторы не несли несимметричной нагрузки. Из этого нужно вывод о необходимости улучшения качества ения, но не о недопустимости несимметричной Всем эксплуатирующим организациям нужно проусиление сварных швов работающих генераторов оступных местах в соответствии с рекомендациякуляра № 40 Сборника директивных материалов Технического управления МЭС. Предлагаемый в этом циркуляре способ крепления активной стали обеспечивает значительно более высокую прочность, чем способ, применяемый заводом.

Электромашиностроительные заводы должны изучать опыт эксплуатации генераторов, накопленный энергосистемами Советского Союза, и учесть его в новых конструкциях, а также оказывать поддержку постановке опытов, преследующих цель повышения надежности эксплуатации оборудования и бесперебойности энергоснабжения.

Можно полностью согласиться с основными выводами работы Г. Н. Тер-Газаряна и в первую очередь с заключением о необходимости постановки опытов работы генераторов при несимметричной нагрузке. Бесспорно, что, как правило, ток обратной последовательности в 5% не является пределом допустимой несимметрии для гидрогенераторов и он во многих случаях может быть увеличен. Бесспорно также и то, что указания о допустимой несимметрии нагрузки не выше 5% синхронных генераторов вошли в директивные документы без должного обоснования.

Работа Г. Н. Тер-Газаряна является первой попыткой обобщения исследования работы гидрогенераторов при несимметричной нагрузке, правильно ориентирующей исследователей и эксплуатацию. Необходимо дальнейшее всестороннее экспериментальное и аналитическое исследование режимов работы генераторов при несимметричной нагрузке для широкого их внедрения в практику эксплуатации.

К статье Г. И. Штурмана „Разомкнутые беличьи клетки в короткозамкнутых асинхронных двигателях“ [1]

Инж. А. Д. ИМАС

ользование специфических свойств литой алюми- короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных лей для придания им новых механических характеи улучшения добротности пуска, несомненно, ое вопросом, заслуживающим внимания. Дело, коключается не в том, насколько то или иное частприменение разрезания торцевых колец беличьей казалось целесообразным. Статья Г. И. Штурмана тем, что она весьма четко сформулировала кена учитываемое то положение, что в короткоутых роторах с литыми клетками ток проводит не клетка, но и магнитопровод ротора. В работах ого научно-исследовательского угольного института НУГИ) это обстоятельство весьма тщательно исслеось. Именно этой особенностью в токораспределении объяснить наблюдаемый в эксплуатации двигатес литыми клетками широкий разброс механических ристик. Во-вторых, литые клетки оказались зна- более сложными по конфигурации путей циркуих в них токов, чем это предполагает конструк- гателей.

Разборка ряда роторов, предпринятая ДОНУГИ, показ, что в результате неплотностей в пакете роторной между его листами при заливе образуются тонкие евые кольца. Помимо этого плотный контакт алюсталью ротора также обусловливает своеобразределение тока в пакете роторной стали и алюклетке. Г. И. Штурман правильно указывает, рез торцевого кольца не приводит к полному разцепи ротора, как это имело бы место при изоих стержнях медной клетки.

Однако влияние этих разрезов очень велико. Напри- испытании двигателя к распространенной вру-бовой машине ГТК-3 было установлено, что максимальный момент двигателя едва достигал 50% номинального значения. В зоне полусинхронной скорости двигателя имел место глубокий провал в кривой моментов, характерный для роторов с несимметричной обмоткой. Клетка ротора была изъята из пакета роторной стали и в ней была обнаружена трещина, почти целиком отделившая 3 рядом лежащих стержня от торцевого кольца. Несмотря на плотный контакт алюминия со сталью, трещина незначительной ширины оказалась достаточной для сильного изменения параметров двигателя.

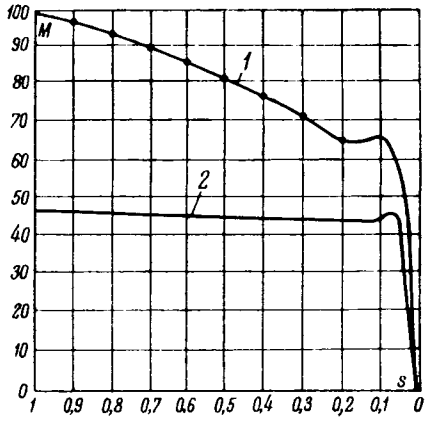


Рис. 1. Момент в зависимости от скольжения двигателя угольного комбайна „Донбасс“.

1—включение двигателя в сеть бесконечной мощности; *2* — в шахтную сеть с трансформатором 100 *ква*.

[1] Электричество, № 9 и 12, 1951.

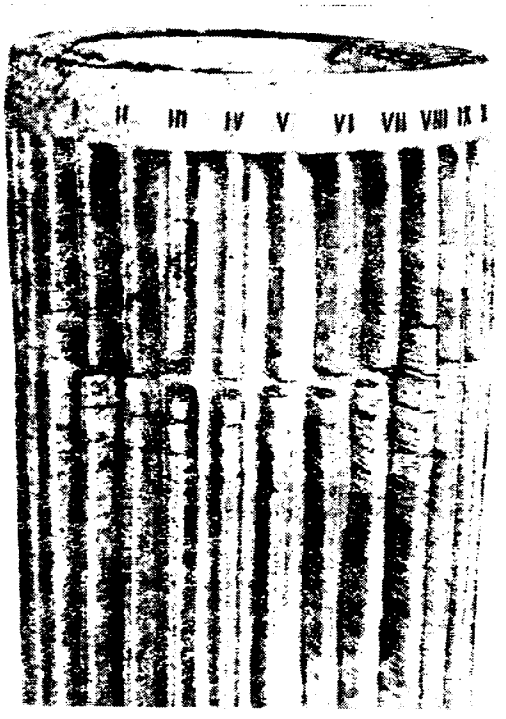


Рис. 2. Беличья клетка ротора электродвигателя врубовой машины с обрывами стержней *1—10*.

Рис. 3. Беличья клетка электродвигателя врубовой машины с разрушенными стержнями.

Следует считать, что теоретические установленные связи для литой клетки, пригодные для принципиальной оценки свойств двигателей, вероятно, существенно расходятся с действительными. Нам кажется, что необходимо расширить экспериментальные работы по исследованию влияния разрезов торцевых колец короткозамкнутой обмотки. В угольной промышленности некоторые вопросы эксплуатации вызывают специфический интерес к этой задаче.

Кабельная сеть выемочного участка угольной шахты характеризуется большой удаленностью потребителей от маломощных источников питания, что осложняет пуск приводных двигателей забойных механизмов — комбайнов, врубовых машин и пр. В этих машинах применены двигатели с двойными роторными клетками, однако пусковые токи весьма значительны и при большой протяженности кабельной сети потеря напряжения, обусловленная этим обстоятельством, совершенно искажает кривую моментов двигателя. На рис. 1 сопоставлены кривые моментов для двигателя МАД191/11 к угольному комбайну «Донбасс» при включении в «жесткую» сеть бесконечной мощности (кривая *1*) и в шахтную сеть, ограниченную мощностью участкового трансформатора (кривая *2*). Общее снижение кривой моментов ограничивало производительность комбайна, и мы попытались снизить пусковой ток.

На двойной короткозамкнутой клетке ротора МАД191/11 было отделено торцевое кольцо рабочей клетки от пусковой и нанесены разрезы на торцевое кольцо только рабочей клетки[2]. Это вызвало увеличение пускового момента на 10% при снижении пускового тока на 7,5%. Испытание проводилось в условиях лаборатории при неизменном напряжении на зажимах двигателя. Очевидно, что в условиях шахтной сети снижение номинального пускового тока должно еще в большей мере улучшить пусковой момент. Следовало бы экспериментально подобрать необходимые соотношения в размерах разрезов, однако мы были ограничены в этих опытах вследствие отсутствия роторов. Осуществление разрезов не оказало ощутимого влияния на рабочие характеристики двигателя, что в частном случае двигателей врубовых машин и комбайнов существенно.

[2] Авторское свидетельство № 84142 на имя А. Д. Имаса.

По изложенным соображениям и на основе с автор целиком присоединяется к мнению Г. В. Моле (Гипронефтемаш) (Электричество, № 9) и полагает модернизация двигателей путем разреза торцевых может в ряде случаев оказаться ценной. Необходимо нейшее углубленное исследование роторов с разрез клетками и отыскание оптимальных вариантов. того, необходимо также провести тщательное изу литых алюминиевых клеток, которые, насколько нам стно, еще исследованы недостаточно.

Явления в литых алюминиевых клетках, повто существенно отличаются от тех, которые наблюд в роторах с медной клеткой, что очень остро ощущ эксплуатацией.

На рис. 2, 3 даны фотоснимки роторных клеток, ятых нами из машин, находящихся в эксплуатации. К чество изымаемых в таком виде роторов машин сос ляет весьма высокий процент от общего парка раб щих двигателей. Вид клеток, вероятно, является вес достаточной аргументацией необходимости уделить мн больше внимания исследованию работы двигателей с а миниевыми клетками.

Всякая же попытка использования возможностей у шения пусковых характеристик двигателей с алюминие клетками будет всячески приветствоваться эксплуата

Кандидат техн. наук Л. И. ШТУРМАН

Длительное время станки-качалки отечественных н тепромыслов оснащались электродвигателями серий МА и АД. Резкое несоответствие пусковых свойств электро гателей этих серий условиям пуска глубиннонасос установок привело к вынужденному завышению уста ленных мощностей на станках-качалках со всеми вытек щими из этого последствиями. Полная замена всех э тродвигателей старых серий новыми электродвигателя с требуемыми пусковыми свойствами потребует знач тельного времени. Нами, как временное мероприя тие, была предложена модернизация наличного пар двигателей методом раскрытия их роторных клеток и ответствующая перестановка двигателей на станках.

Исследованием было установлено, что наиболее выг ной схемой модернизации является такая, при кото

число разрезов торцевых колец равно утроенному пар полюсов, а разрезы располагаются на обоих в шахматном порядке, разделяя роторные стержни симметричные группы.

При такой схеме коэффициент эффективности пуска — ние пускового момента к пусковому току — увеличивается в 2...2,5 раза, «провалы» на участке механической характеристики от $s=1$ до $s_{макс}$ практически исчезают, а наклон рабочего участка характеристики изменяется незначительно.

Предложенная модернизация приводит к некоторому ю номинальной мощности двигателей (на 10... а также номинальных энергетических показателей на 2...5%, $\cos\varphi$ на 0,05...0,15).

Однако реальные эксплуатационные значения к. п. д. модернизированных двигателей увеличиваются по ю с к. п. д. и $\cos\varphi$ двигателей завышенных мощ- если модернизация позволяет существенно уменьшить установленные мощности. Официальные промыслоиспытания показали, что при снижении установленной электродвигателей серии МА-200 в 1,7 раза по- е активной мощности практически не изменяется, атационное значение $\cos\varphi$ возрастает на 12%.

Таким образом, модернизация электродвигателей станков-качалок дает:

учшее использование установленных мощностей двигателей с плохими пусковыми свойствами;

иженне потребления глубиннонасосными установ- ктивной и реактивной мощностей;

меньшение пусковых мощностей и падений напря- системе, что важно при автоматическом само- электродвигателей.

Предложенное мероприятие успешно проводится на льном числе установок ряда нефтепромыслов 947 г.

Возражения Н. К. Архангельского, А. А. Минина и А. Чефранова (Электричество, № 9) показывают недо- но ясное понимание ими основных факторов и про- происходящих при пуске и работе глубиннонасос- установок, и базируются на результатах испытаний ИИ МЭП случайного (не каталожного) двигателя, низированного к тому же не по той схеме, которая ендуется и применяется в приводе станков-качалок. Такую оценку их возражений нетрудно обосновать.

Кинематическая схема станка-качалки, как четырех- , обусловливает резко пульсирующий нагрузочный двигателя, даже при правильном уравновешивании балансирными или вращающимися контргрузами. пульсаций нагрузки вдвое больше числа качания ту. Естественное нарушение уравновешенности во время остановки всегда определяет такое ис- положение кривошипного вала, при котором контр- или, что то же, система штанг находится в край- нем или в крайнем нижнем положениях. Этим ется пуск станка при минимальном, но нарастаю- по мере разгона нагрузочном моменте. Выбранный ий по номинальной мощности двигатель должен потери напряжения в подводящей линии иметь льный момент, превышающий максимальный на- ый момент неуравновешенного станка. Во избежа- жных пусков и возможных отключений тепловой выход на устойчивую часть механической харак- двигателя должен произойти раньше, чем на- ий момент достигнет максимума, т. е. раньше чем ип сделает четверть оборота. Поэтому существенное имеет форма неустойчивого участка механиче- характеристики от пускового момента до максималь- , которая лишь частично определяется начальным пус- моментом. Как уже ранее указывалось, раскрытие клеток двигателей по рекомендованной схеме механической характеристике наиболее выгодные ния наряду с повышением коэффициента эффектив- пуска в 2...2,5 раза. Именно эти обстоятельства ют пусковые свойства модернизированного дви- приводе станка-качалки, а не только увеличение ного пускового момента.

Н. К. Архангельский, А. А. Минин и К. А. Чеф- оценивают энергетические показатели глубиннона- установок по номинальным значениям к. п. д. электродвигателей, что неверно, так как нагрузка электродвигателей — переменная. При резко пульсирующей нагрузке действительные, средневзвешенные значения к. п. д. и $\cos\varphi$ существенно отличаются от номинальных или от значений, соответствующих среднеквадратичной мощности.

Как нами было показано [Л. 3], реальные эксплуатационные значения к. п. д. и $\cos\varphi$ могут быть вычислены по формулам

$$\eta_э = \frac{\eta_x}{\eta_x + (1-\eta_x)k}, \tag{1}$$

$$\cos\varphi_э = \cos\varphi_x\left(\frac{\eta_x}{k} + 1 - \eta_x\right), \tag{2}$$

где η_x и $\cos\varphi_x$ — к. п. д. и коэффициент мощности, взятые из кривых или рассчитанные для нагрузки, равной среднеквадратичной мощности двигателя P_x;

k — коэффициент формы нагрузочной диаграммы — отношение среднеквадратичной мощности P_x к средней на валу двигателя $P_д$.

Выгодность замены электродвигателя завышенной мощности определяется следующими двумя факторами:

1. Изменением активных потерь в самом двигателе (или изменением потребления активной мощности) согласно соотношению

$$\Delta P_э = \frac{P_э}{\eta_{э1}}\left(1 - \frac{\eta_{э1}}{\eta_{э2}}\right), \tag{3}$$

где $P_д$ — нагрузка на валу двигателя, остающаяся неизменной, *квт*;

$\eta_{э1}$ — эксплуатационный к. п. д. заменяемого двигателя;

$\eta_{э2}$ — эксплуатационный к. п. д. меньшего, модернизированного двигателя.

2. Изменением активных потерь в сети от генератора до двигателя. Расчет изменения активных потерь в сети может быть наиболее просто произведен, пользуясь экономическим эквивалентом реактивной мощности[1]

$$\Delta P_c = k_э\,\Delta Q, \tag{4}$$

где k — экономический эквивалент, обычно равный для двигателей станков-качалок 0,15...0,25 *квт/квар*,

ΔQ — изменение реактивной мощности у станка в результате замены двигателя, причем

$$\Delta Q = \frac{P_д}{\eta_{э1}}\operatorname{tg}\varphi_{э1} - \frac{P_д}{\eta_{э2}}\operatorname{tg}\varphi_{э2}. \tag{5}$$

Таким образом, принятые Н. К. Архангельским А. А. Мининым и К. А. Чефрановым упрощенные „критерии" никак не могут служить основанием для оценки экономической эффективности модернизации.

3. Сведение модернизации „к вопросу о том, применять или не применять электродвигатели с повышенным скольжением" (Электричество, № 9, 1951), неправильно, так как модернизация по рекомендованной схеме, как показали исследования [Л. 2], не увеличивают заметно среднего скольжения за цикл. Кстати, утверждение Н. К. Архангельского, А. А. Минина и К. А. Чефранова о том, что в современной глубиннонасосной эксплуатации со станками типа СКН имеются тенденции уменьшать числа качаний в минуту, не соответствует действительности и противоречит идее создания основных типов станков указанной серии.

4. Расчет механической прочности разрезанной роторной клетки в самом неблагоприятном случае показывает коэффициент запаса около 400, довод об ослаблении клетки разрезами не имеет практического смысла.

Выводы. 1. Возражения и опасения Н. К. Архангельского, А. А. Минина и К. А. Чефранова не обоснованы.

[1] Полагается, что экономический эквивалент численно равен активной мощности, затрачиваемой на передачу реактивной мощности до той или иной точки электрической сети.

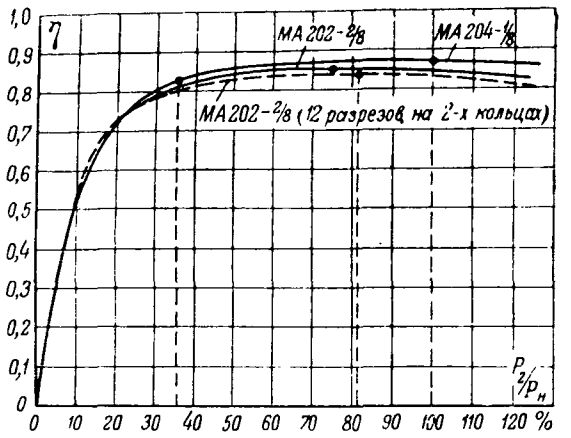


Рис. 1.

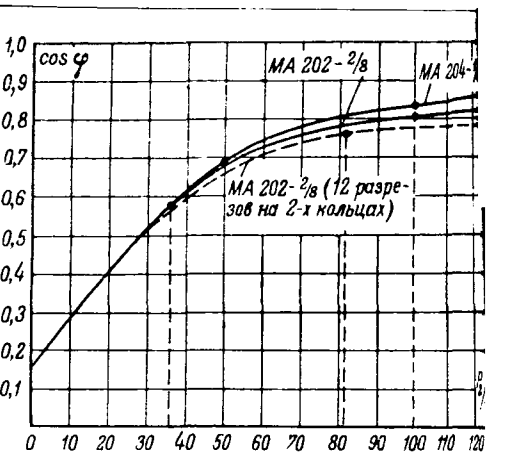


Рис. 2.

2. Рекомендованная модернизация электродвигателей старых серий станков-качалок, как временное мероприятие, реализуемое по специальной инструкции, способствует улучшению энергетических показателей глубиннонасосных установок.

3. Разработанные новые схемы модернизации асинхронных электродвигателей могут быть использованы в приводе различных механизмов для приведения характеристик нормальных или имеющихся в наличии двигателей в соответствии с конкретными требованиями.

Пример. Расчет экономического эффекта от модернизации двигателей правильнее всего произвести, ориентируясь на глубиннонасосную установку, типичную по своему оборудованию и режиму помпирования для большинства эксплуатирующихся установок, а именно для установки со станком-качалкой СНК-5.

По данным о наиболее распространенных режимах помпирования примем усредненную потребную мощность на валу двигателя $P_д = 5$ *квт*, а коэффициент формы пульсирующей нагрузки $k = \frac{P_x}{P_д} = 1{,}3$.

Рассматриваем двигатели серии МА-200 (самые неблагоприятные по своим пусковым свойствам), которыми нефтепромыслы оснащались последние годы.

Полагаем, что промысловые сети рассчитаны по нормам на действительно необходимые мощности двигателей, а не на двигатели вынужденно завышенных установленных мощностей. Тогда на основании расчетных и опытных данных вынужденное завышение установленной мощности двигателей серии МА-200 для обеспечения устойчивого пуска станков будет в среднем трехкратное или по отношению к среднеквадратичной мощности $3 : 1{,}3 = 2{,}3$-кратное.

Полагаем, что модернизация двигателей той же серии МА-200 производится по оптимальной схеме раскрытия роторных клеток, и число разрезов торцевых колец равно утроенному числу пар полюсов. Кроме того, полагаем, что не преследуется цель смягчения механических характеристик двигателей, в связи с чем разрезы наносятся на обоих кольцах и коэффициент эффективности пуска $\frac{M_п}{I_п}$ увеличивается не менее чем в 2 раза.

При указанных условиях, модернизация двигателей позволяет уменьшить установленную мощность в 2 раза, т. е. довести завышение по отношению с средней мощности в 1,5 раза, а по отношению к среднеквадратичной в 1,15 раза, что допустимо, так как согласуется со снижением номинальной мощности, вызванной разрезами.

Учитывая, что увеличенные пусковые мощности двигателей завышенных мощностей потребовали соответствующего увеличения мощностей трансформаторов 6 000/380 *в* киосков и что средний $\cos\varphi \leqslant 0{,}75$, принимаем экономический эквивалент $k_э = 0{,}2$.

Для количественной оценки мероприятия принимаем следующие ближайшие каталожные типы двигателей: установленный для обеспечения устойчивого
МА-204-1/8, 18,1 *квт*; после нанесения общего чи
резов $3 \cdot p = 3 \cdot 4 = 12$ — МА-202-2/8, 8,0 *квт*.

Изменения к. п. д. (рис. 1) и $\cos\varphi$ (рис. 2)
ваемых двигателей в зависимости от нагрузки при
по заводским данным ХЭМЗ. На этих же рисун
строены опытные кривые к. п. д. и $\cos\varphi$ дви
МА-202-2/8 после нанесения на кольцах 12 ра

Энергетические показатели двигателей. Заме
го — МА-204-1/8 — 18,1 *квт*

$$P_{x1} = 5 \cdot 1{,}3 = 6{,}5 \text{ квт, при этом } \frac{P_{x1}}{P_{уст_1}} = \frac{6{,}5}{18{,}1} =$$

Из кривых рис. 1 и 2 $\eta_{x1} = 83\%$, $\cos\varphi_{x1} = 0{,}57$.

По формулам (1) и (2)

$\eta_{э1} = 79\%$, $\cos\varphi_{э1} = 0{,}462$, $\cos\varphi_{э1}\,\eta_{э1} = 0{,}36$

Для заменяющего двигателя МА-202-2/8 — 8,0 *квт* на

$$P_{x2} = 5 \cdot 1{,}3 = 6{,}5 \text{ квт}, \quad \frac{P_{x2}}{P_{уст}} = \frac{6{,}5}{8{,}0} = 0{,}815.$$

Из кривых рис. 1 и 2 $\eta_{x2} = 84\%$, $\cos\varphi_{x2} = 0{,}762$.

По формулам (1) и (2)

$\eta_{э2} = 80{,}5$, $\cos\varphi_{э2} = 0{,}615$, $\cos\varphi_{э2}\eta_{э2} = 0{,}495 \cdot \eta_{э2}$

и $\cos\varphi_{э2} > \cos\varphi_{э1}$ и очевидно, что имеет место сни
потерь как в двигателе, так и в сети.

Экономия расхода активной мощности. Эко
за счет снижения потерь у двигателя установки по
муле (3)

$$\Delta P_д = \frac{5}{0{,}79}\left(1 - \frac{0{,}79}{0{,}805}\right) = 0{,}114 \text{ квт}.$$

Экономия за счет снижения потерь в сети от
ратора до двигателя по формулам (4) и (5)

$$\Delta P_с = 0{,}2 \cdot 5\left(\frac{1{,}921}{0{,}79} - \frac{1{,}282}{0{,}805}\right) = 0{,}840 \text{ квт}.$$

Суммарная экономия в системе на один двигатель

$$\Sigma\Delta P = 0{,}114 + 0{,}840 = 0{,}954 \text{ квт}.$$

Экономия активной мощности в системе за год сост

$$0{,}954 \cdot 8\,750 = 8\,350 \text{ квтч}.$$

Литература

1. Г. И. Штурман. Разомкнутые беличьи кл
в короткозамкнутых асинхронных двигателях. Элек
чество, № 9, 1951.

2. Л. И. Штурман. Опыт применения нормал
двигателей с разрезными обмотками короткозамкн
роторов. Новости нефтяной техники, № 6, 1948.

3. Л. И. Штурман и О. И. Золотарев. Эне
тические показатели асинхронных электродвигателей
переменной нагрузке. Электричество, № 8, 1951.

◇ ◇ ◇

Заметки и письма

О РУКОВОДСТВЕ К ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Проф. В. Ю. Ломоносов в своем отзыве на нашу [1] (Электричество, № 10, 1951) совершенно правильно отметил, что учебные пособия к практическим занятиям должны способствовать проявлению инициативы учащихся при выполнении тех или иных практических заданий. К достижению именно этой цели и подчинено построение составленного мной руководства. В предисловии к руководству указано, что целью занятий в лаборатории является не только углубление знаний, полученных студентами в теоретическом курсе, но и привитие студентам максимально возможной мере навыков самостоятельного проведения исследования, и в связи с этим предлагаемое руководство не содержит готовых рецептов в виде форм протоколов, примерных кривых и перечислений по пунктам порядка выполнения работ. Студенту предлагается самостоятельно разработать порядок выполнения работы, форму протоколов и характер графиков в зависимости от конкретной при исследовании задачи. С этой же целью в описаниях работ обращено внимание на методы устранения мешающих влияний, могущих исказить результаты производимых исследований. Почти во всех работах наряду с экспериментальным исследованием требуется произвести теоретические расчеты и результаты их сопоставить с результатами опыта. Предлагается критически проанализировать причины возможных расхождений результатов опыта и расчета.

В действительно, в руководстве не дано ни примерных кривых тех полей, которые должны быть получены в ходе исследования, ни примерных кривых, выражающих характер искомых зависимостей. Студентам предлагается выполнить довольно сложные исследования и выяснить факторы, могущие привести к искажениям результатов исследования. Таким образом, в руководстве нет ответов в готовом виде, и студентам предоставлено широкое поле для самостоятельных исканий. Однако студенты еще не располагают опытом исследовательской работы, и в руководстве должно быть указано, на что им необходимо обратить внимание при выполнении того или иного исследования. Руководство должно содержать ясные указания о цели и задачах исследования и об основных путях его выполнения, а также должно научить студентов критически относиться к получаемым ими результатам. Именно такие указания и содержатся в рассматриваемом руководстве.

Опыт проведения занятий в лаборатории электромагнитного поля ЛПИ после выхода из печати руководства показал, что остается еще весьма большое количество вопросов, ответы на которые студенты должны искать самостоятельно.

Я позволил себе привести вышеизложенные соображения потому, что поднятый В. Ю. Ломоносовым вопрос имеет весьма большое значение для организации всех практических занятий в вузах. Чрезвычайно важно в каждом отдельном случае найти разумный и вместе с тем необходимый минимум сведений, сообщаемых студентам в помощь им при выполнении практических работ.

Доктор техн. наук, проф. Л. Р. НЕЙМАН

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛОСТОГО ХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

По-видимому, данный вопрос привлекает внимание ряда электротехников (Электричество, № 3, 1950, статья Б. И. Архангельского; № 10, 1951, статья В. В. Енько). В связи с этим считаю полезным напомнить читателям аналитическом выражении характеристики холостого хода, которое дает бо́льшую точность, чем все известные мне выражения, и которое было предложено мной ранее [1] (Электричество, № 7, 1932).

Это выражение имеет вид:

$$u = \frac{i^{1,5}}{0,39 + 0,61 i^{1,5}}$$

Дробная степень берется на логарифмической линейке также просто, как вторая (число — на квадратичной шкале, результат — на кубичной), а поэтому расчет по данной формуле не представляет труда. Несложно и выражение производной $\frac{du}{dt}$:

$$\frac{du}{dt} = \frac{0,585\sqrt{i}}{(0,39 + 0,61 i^{1,5})^2}.$$

В статье Б. И. Архангельского сравнивается точность различных выражений характеристики холостого хода. Автор находит, что наибольшую точность дает формула

$$u = \operatorname{arc\,tg} Bi.$$

По его расчетам наибольшее отклонение расчетного напряжения от величины, даваемой стандартной кривой (кстати, приведенной у него недостаточно точно; точнее дана эта кривая у В. В. Енько), составляет 2,6%, а среднее отклонение — 1,0%. Вышеприведенная моя формула дает наибольшее отклонение, равное 1,0% и среднее — 0,5%. Если не требуется особая точность, можно пользоваться более простым выражением

$$u = \frac{1,86i}{i + 0,82},$$

пригодным при $i \geqslant 1$.

Доктор техн. наук, проф. А. М. ЗАЛЕССКИЙ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

◇ ◇ ◇

По страницам технических журналов

ПОДВИЖНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ

Подвижная электрическая станция Д-202А входит в состав автотермос-ремонтера Д-187А, предназначенного для комплексного текущего и среднего ремонта асфальто-бетонных покрытий на городских проездах, улицах, площадях и автомобильных дорогах и выпущенного Министерством строительного и дорожного машиностроения на базе автомобиля ЗИС-150 с набором специального электрифицированного инструмента. Конструкторы установки — лауреаты Сталинской премии инженеры В. Г. Федоров и А. А. Васильев.

Подвижная электрическая станция выполнена на специальном одноосном прицепе с колесами от автомобиля ЗИС-150. Рама прицепа сварена из швеллеров с поперечными связями. Передняя часть рамы образует дышло со сцепным устройством. В состав электростанции входит преобразователь высокой частоты И-75 для работы высокочастотных электроломов и трансформатор ТС-0,75 для работы электровибратора. Станция имеет бензиновый двигатель мощностью 40 *л. с.* при 1 500 *об/мин* и генератор типа ДГС-82 Д — 30 *квт* при напряжении 230 *в* и той же скорости вращения. Преобразователь частоты тока И-75 с первичным напряжением 320/220 *в*, 50 *гц*, вторичным напряжением 36 *в* и частотой 200 *гц* имеет мощность 3,5 *квт*. Распределительный щит на текстолитовой панели прикреплен к стойкам на специальных амортизаторах для предотвращения толчков, вредно отражающихся на контрольно-измерительных приборах.

Электростанция имеет пять съемных металлических катушек с кабелями и распределительную коробку для присоединения электроинструментов. Топливный бак имеет емкость 60 *л*. Габаритные размеры подвижной электрической станции 3 970 × 1 930 × 2 380 *мм* и общий вес 2 195 *кг*.

Подвижная электрическая станция снабжает электрической энергией входящие в состав установки электрифицированные инструменты — электрофрезы, электроломы, электрощетки, электроутюги или электрогладилки, электровибраторы.

(Механизация строительства, № 10, 1951. А. А. Васильев, Т. Г. Гаджинский)

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НЕФТЯНЫХ ПРОМЫСЛОВ

Опыт эксплуатации показал целесообразность установки АПВ не только на воздушных линиях 35...110 *кв*, но также на линиях 3...10 *кв*. Высокая эффективность действия устройств АПВ поставила вопрос о применении их в сетях 2...6 *кв* нефтепромыслов для автоматического включения линий электропередачи.

Электрические нагрузки нефтяной промышленности (компрессоры, бурение, глубинно-насосная добыча) по степени ответственности являются нагрузками I категории. Указанные нагрузки не допускают перерывов электроснабжения более 1 *сек*.

Применяемая система отключения части так называемых неответственных потребителей как средство, необходимое для ликвидации аварийных режимов в энергосистеме с целью обеспечения бесперебойности снабжения других потребителей, не оправдывается. Взамен следует рекомендовать широкое внедрение устройств АПВ во всех узлах электронагрузок нефтяной промышленности.

Для обеспечения самозапуска электродвигателей компрессоров при аварийных режимах в системе рекомендуется на компрессорных станциях выделить группу электродвигателей (3...5), предназначенных для отключения от защиты минимального напряжения с целью обеспечения успешного самозапуска остальных оставшихся в работе электродвигателей, и применить метод автоматического повторного включения их с помощью грузовых приводов однократного действия.

На всех воздушных линиях 2...6 *кв* с одност питанием, протяженностью более 1,5...2 *км*, пи трансформаторы глубинных насосов, электродвига рильных станков и насосы перекачки техническ для охлаждения компрессоров, рекомендуется пр автоматическое повторное включение мгновенно кратного действия.

Признается целесообразным применение АПВ случаях, когда такое устройство дает возможность чить селективную защиту линий. Рекомендуется широкое резервирование основных нагрузок н промышленности.

(Энергетический бюллетень Мин. Н. П., № 5, 1951. А. А. Х

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛА ПУСКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Для ограничения пусковых токов в цепях т двигателей мотор-вагонных секций электрических же дорог включаются пусковые сопротивления — ре которые при достижении определенной скорости авт чески отключаются. При каждом пуске электрово пусковых сопротивлениях моторного вагона затрач около 2,5 *квтч* электрической энергии. Так, толь электрифицированном участке Московско-Казанской ной дороги в пусковых сопротивлениях затрачи в сутки до 20 000 *квтч*.

В зимнее время на отопление электропоездов на же участке расходуется в сутки такое же колич энергии, что привело к мысли использовать для от ния тепло пусковых сопротивлений. Для этой цели вые сопротивления заключаются в кожух из двух кровельной стали с прокладкой листового асбеста то ной 4 *мм*. Из такого же материала были сделаны короба для подачи в вагон подогретого и отсоса от денного воздуха.

Эксплуатация описанного устройства в отопите сезон 1949—1950 гг. вполне себя оправдала, показав отопление вагонов с использованием тепла сопротив более надежно, чем электропечами, а пусковые сопр ления находятся в лучших условиях и требуют значи но меньшего ухода и ремонта.

На летнее время, с окончанием отопительного п да, стенки кожуха снимаются и сопротивления раб в обычных условиях.

(Информационные материалы Энергосбыта Мосэнерго, ма И. К. Молчанов)

ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Заводы Министерства строительного и дорожного шиностроения СССР осваивают все новые и новые т электрифицированного инструмента для комплексной м низации трудоемких процессов.

Электрогайковерты типа И-91 и И-92 предназнач для завертывания гаек и болтов с максимальным диам ром резьбы 18 *мм* (И-91) и от 18 до 25 *мм* (И-92). типа электроинструмента имеют асинхронные корот мкнутые электродвигатели, работающие от электричес сетей переменного трехфазного тока с частотой 200 при напряжении 36 или 220 *в*. Потребляемая мощност 800 (И-91) и 1200 *вт* (И-92). Режим работы — длит ный при переменной нагрузке. Скорость вращения э тродвигателя (синхронное) — 12 000 *об/мин*, а ш деля 630 (И-91) и 325 *об/мин* (И-92). Габаритные раз ры и вес соответственно: для типа И-91—115×470×625 и 10 *кг*, а для типа И-92—785×440×190 *мм* и 16 *кг* (шлангового кабеля и ключа). Время затяжки гайки 5 с

Электросверлилка И-90 предназначается для свер ния отверстий диаметром до 8 *мм* в стали с временн сопротивлением 50 *кг/мм²*, а также в других более м

таллах и в дереве. Инструмент имеет универсальный коллекторный, однофазный электродвигатель, что позволяет приключать его к сетям переменного (50 *гц*) и постоянного тока. Потребляемая электродвигателем мощность 200 *вт* при напряжении 220 *в*. Режим работы — продолжительный с переменной нагрузкой. Электросверлилка снабжена двухполюсным выключателем куркового типа одностороннего действия, встроенного в рукоятку. Скорость вращения электродвигателя при холостом ходе 18 000 и при номинальной нагрузке 8 300 *об/мин*, а шпинделя соответственно 1 500 и 680 *об/мин*. Шпиндель используется с конусным укороченным конусом Морзе № 1. Крутящий момент на шпинделе 12,8 *кгсм*. Габаритные размеры электросверлилки (без патрона) 75×180×250 *мм* и вес 2 *кг*. Скорость сверления отверстий диаметром 8 *мм* составляет 20 *мм/мин*. При необходимости использования электросверлилки как настольного станка, она легко может быть установлена в специальном штативе.

Электролобзик И-93 предназначен для выпиловок разнообразных деталей из фанеры и досок толщиной до 18 *мм*. Электролобзиком можно производить распил по кривым линиям малым радиусом. Инструмент найдет широкое применение при выполнении различных работ по дереву и, в частности, для модельных и резных работ. Электролобзик состоит из коллекторного универсального электродвигателя, редуктора с эксцентриковым устройством ползунка с пилой и направляющей лыжей. Потребляемая мощность электродвигателем 200 *вт* при напряжении 120 или 220 *в*. Число двойных ходов пилы при полной нагрузке 2 000 в минуту; ход пилы 20 *мм*. Габаритные размеры инструмента 295×165×82 *мм* и вес (без кабеля) 3 *кг*. Средняя производительность при резьбе фанеры толщиной 4 ... 6 *мм* — 2,3 ... 2,5 *м/мин* и сосновых досок (поперек волокна) толщиной 18 *мм* — 0,8 ... 1,0 *м/мин*.

Электроинструмент типа И-109 назначен для очистки ржавчины и старой краски с металлических поверхностей судов, а также различных металлоконструкций, для очистки котлов от накипи, очистки литья, зачистки сварных швов и т. д. В производственных условиях аппарат показал хорошие результаты. Потребляемая мощность 400 *вт* при напряжении 36 *в*. Скорость вращения двигателя и рабочего инструмента под нагрузкой 2 800 *об/мин*. Диаметр гибкого вала 8,3 *мм*; общий вес инструмента с шарошкой, но без кабеля 13,4 *кг*; вес, приходящийся на руки рабочего, в зависимости от высоты подъема рабочей части инструмента 3,5 ... 4,5 *кг*. Производительность в зависимости от вида работ колеблется от 3 до 6 *м²/час*.

(Механизация строительства, Электрогайковерт И-91, № 3, 1951, В. Н. Бармаш; Электросверлилка И-90, № 5, 1951 В. Н. Бармаш; Электролобзик И-93, № 8, 1951, Д. И. Судакович; Электрогайковерт И-92, № 10, 1951, Д. И. Судакович и Н. Н. Шестинский; Электроинструмент для чистки ржавчины И-109, № 10, 1951, В. Н. Бармаш).

РУБЕЖОМ

ПРОЕКТ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 400 *кв* В РУРСКУЮ ОБЛАСТЬ

Перед войной, в 1939 г., Германский Рейнско-Вестфальский энергетический концерн RWE совместно с электропромышленными фирмами Сименс, AEG и Броун-Бовери приступил к эскизному проектированию передачи 400 *кв*, которая должна была передавать электроэнергию в Рурскую область от группы гидростанций, предполагавшихся к сооружению в Австрийских Альпах.

Предусматривалась передача по двум двухцепным линиям 400 *кв* мощности порядка 2 000 тыс. *квт* на расстояние около 700 *км* (рис. 1).

Исследовательские и проектные работы германских фирм были приостановлены в 1943 г. в связи с военной неразберихой, а крах гитлеровского райха в 1945 г. привел к полному прекращению.

Некоторые технические результаты этих предварительных работ опубликованы в статье Бирманса [Л. 1].

Как можно видеть из вышеприведенных цифр, предполагалась передача по одной цепи мощности, близкой к натуральной, что считалось наиболее рациональным для таких передач 400 *кв*.

Необходимо отметить, что в действительности по условиям работы системы, например, не всегда удается обеспечить максимальную мощность дальней передачи, равную натуральной. Поэтому никак нельзя ограничиться анализом условий работы линий 400 *кв* при передаче только натуральной мощности, как это характерно для рассматриваемого проекта.

При заданном напряжении электропередачи и выбранном постоянии между проводами увеличение натуральной мощности воздушной линии возможно только путем увеличения диаметра провода. С другой стороны, необходимость уменьшения диаметра провода диктуется также требованием снижения потерь на корону.

Задача повышения напряжения и натуральной мощности длинных линий и нежелательность по конструктивным причинам применения полых проводов с диаметром больше 50 *мм* привели к переходу на расщепленные провода. Каждый провод линии делится на *n* параллельных более тонких проводников, расположенных по вершинам правильного многоугольника. Следует отметить, что вопрос о применении расщепленных проводов для дальних передач впервые был рассмотрен в СССР [Л. 2].

Применение расщепленных проводов для линий 400 *кв* объясняется, главным образом, задачей повышения пропускной способности линии по требованиям устойчивости нормальной работы. В этих условиях при заданной мощности передачи и определенном уровне потерь энергии суммарное сечение фазы является постоянным и увеличение его при увеличении числа параллельных расщепленных проводников нежелательно.

Если требование снижения потерь на корону вызывает увеличение диаметра проводников при увеличении расщепления, то увеличение диаметра не должно сопровождаться увеличением расхода металла проводов. Предлагаемое Бирмансом уменьшение относительных активных потерь путем увеличения расщепления проводов при постоянном отношении диаметра описанной окружности к диаметру провода вызывает сомнения.

В некоторых случаях расщепление проводов может рассматриваться как мера повышения пропускной способности и снижения потерь действующей перегруженной линии (если ее опоры позволяют подвеску дополнительных проводов). В таком частном случае, более характерном к тому же для линий передачи малой и средней длины, будет иметь место увеличение расхода металла, однако и здесь относительная величина потерь, предполагая, конечно, что реконструируемая линия была первоначально запроектирована правильно, должна остаться неизменной. Поэтому и в этом случае требование постоянства отношения диаметра описанной окружности к диаметру провода, очевидно, является неправильным.

В целях наилучшего использования электропередача 400 *кв* должна работать при одинаковом напряжении на обоих концах линии. Бирманс считает, что при переменной нагрузке, в целях сохранения напряжения постоянным, натуральную мощность линии необходимо уравнивать с передаваемой мощностью. При передаче мощностей ниже натуральной это достигается путем поперечной компенсации линии, которая осуществляется параллельным включением реактивных катушек, соединенных в звезду с заземленной нулевой точкой. При передаче мощностей выше натуральной — путем продольной компенсации линии, которая осуществляется последовательным включением статических конденсаторов в линию передачи. Необходимо также применение силовых трансформаторов 400 *кв* с регулированием коэффициента трансформации под нагрузкой.

На рис. 2,*а* показано изменение напряжения по длине линии при различных нагрузках, при сохранении напряжения *на концах линии постоянным. При увеличении* передаваемой мощности для сохранения постоянства напряжения на концах передачи требуется дополнительная реактивная мощность, которая увеличивается вместе с нагрузкой (рис. 2,*б*). При уменьшении передаваемой мощности до величины ниже натуральной от линии следует отвести

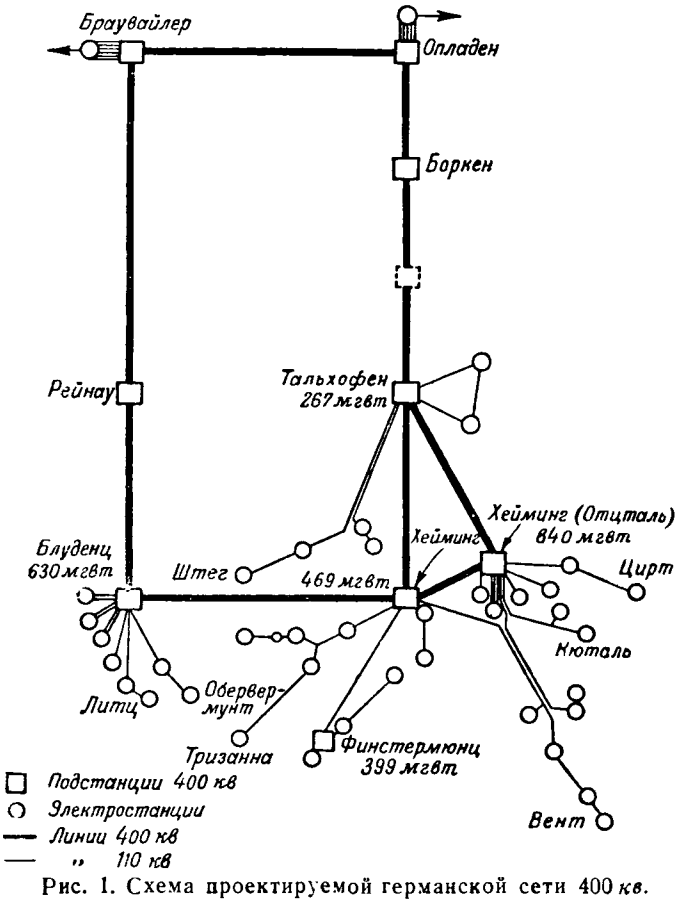


Рис. 1. Схема проектируемой германской сети 400 *кв*.

реактивную мощность, что достигается поперечной компенсацией.

Передача по длинным линиям реактивной мощности, генерируемой отдаленной электростанцией, недопустима.

Режим работы линии без перепада напряжения, т. е. без передачи реактивной мощности или с небольшим перепадом напряжения (2...3%), для линии 400 *кв* является оптимальным. Предлагаемый Бирмансом метод работы в условиях изменяющейся нагрузки с неизменным уровнем напряжения 400 *кв* на концах передачи с регулированием параметров передачи путем регулирования продольной и поперечной компенсации является неприемлемым. Практически регулировать степень емкостной компенсации линии в зависимости от нагрузки слишком сложно, и это осуществляться не будет, мощность подключенных шунтирующих реакторов будет меняться резкими скачками или не будет меняться совсем и регулирование линии должно осуществляться, главным образом, за счет изменения возбуждения генераторов на отправном конце передачи, изменения коэффициента трансформации трансформаторов, изменения нагрузки синхронных компенсаторов, т. е. за счет изменения уровня напряжения на концах передачи. Работа же при постоянных параметрах передачи с постоянным уровнем напряжения на ее концах, не изменяющемся при изменении ее нагрузки, будет сопровождаться ухудшением экономических показателей передачи.

Серьезное значение имеет вопрос о потерях в линии передачи, которые помимо потерь в устройствах компенсации реактивной мощности определяются потерями в активном сопротивлении проводов линии и потерями на корону. Потери в активном сопротивлении зависят от полезного поперечного сечения проводника, от принятой в качестве экономической величины плотности тока.

Бирманс считает возможным для линии 400 *кв*, при натуральной нагрузке и числе часов использования не выше 5 000, рекомендовать для алюминиевых проводов экономическую плотность 1 *а/мм*^{2}.

На рис. 3 им даны относительные годовые потери линии 400 *кв* длиной 750 *км* при полых и расщепленных проводах. При 5 000 *час* использования потери в линии потерь в повысительных и понизительных трансформ рах) составляют 8,5%.

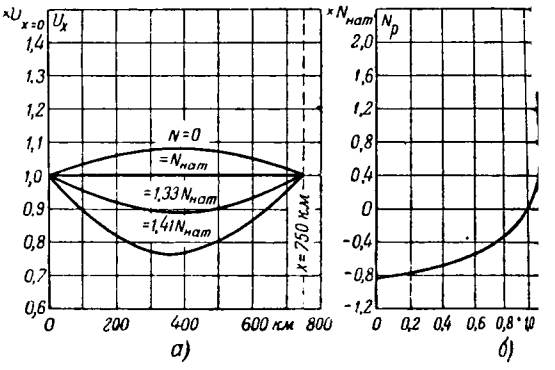


Рис. 2.

а — измен ние напряжения по длине линии при сохранении ства напряжения по концам передачи; *б* — необходимая р мощность для передачи с сохранением постоянства напря концах передачи; N_a — активная мощность; N_p — реакт мощность.

Планируемые в данных проектировках потери ной мощности в линии (8,5% при длине пе 750 *км*, экономическая плотность тока 1 *а/мм*^{2}) чре высоки. Реально дальние передачи 400 *кв* должны тать с меньшими потерями. Советские исследо [Л. 3] указывают для дальних передач значительно шие цифры экономической плотности тока, а и 0,5...0,6 *а/мм*^{2} для алюминиевых проводов.

Вопросы устойчивости параллельной работы д передач 400 *кв* при эскизном проектировании герм передачи были проработаны совершенно недостато

Для линии 400 *кв* с проводами, расщепленными длиной 750 *км* по условиям динамической устойч параллельной работы трехполюсное короткое замы должно быть отключено за время не выше 0,10 с двухполюсное замыкание — за время не выше 0.20

Задача обеспечения устойчивости параллельной ты электростанций, соединенных более длинной, чем линией 400 *кв*, требует ряда дополнительных Авторы проектировки исходили из того, что наил мерой повышения устойчивости является установка каждые 300...400 *км* на промежуточных подста мощных синхронных или асинхронных компенсатор предполагали, что это дополнительное мероприятие печит передачу по двухцепной линии 400 *кв* мощ 1 млн. *квт* на расстоянии 1 000 *км*.

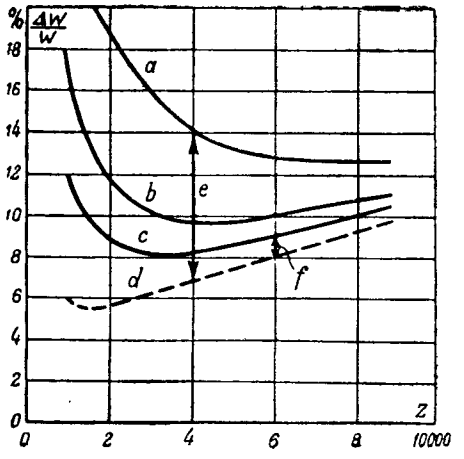


Рис. 3. Относительные годовые потери передачи 400 длиной 750 *км* при полых и расщепленных проводах

ΔW — годовые потери энергии; W — годовая передача энергии; Z — довое число часов использования; *а* — полый провод ди метром 42 *b* — то же 50 *мм*; *с* — расщепление на четыре провод ди метром 21 *мм*; *d* — потери в проводах и компенсационных устройствах *е* — потери на корону для полого провода ди метром 42 *мм* *f* — то же для расщепленных проводов.

вод Бирманса о возможности передачи 1 млн. *квт* стояние 1 000 *км* не подтверждается в его статье, же и в германских материалах, изложением прора- ых серьезных мероприятий по повышению пропу- способности передачи до указанных весьма высоких ий. Такие исследования в Германии сделаны не Задача доведения пропускной способности двухцеп- нии 400 *кв* длиной 1 000 *км* до 1 млн. *квт* разре- Л. 3...5], но германские исследования не смогли ть путей для ее разрешения.

ри рассмотрении вопросов повышения устойчивости тельной работы германские проектировки совершен- е касались такой радикальной меры, разрабо- и применяющейся с 1935...1937 гг. в СССР, как нение специальных автоматических методов регулиро- возбуждения синхронных машин (электронные ре- оры, компаундирование и др.) [Л. 4]. Не рассмат- сь также продольная и поперечная компенсации передач, как мера повышения устойчивости па- ной работы, вопрос, также разрабатывавшийся со- ми исследователями с середины 30-х годов 8].

прос о мерах повышения динамической устойчиво- и не считать обычного требования об ускорении ия выключателей и релейной защиты, в германских тках даже не поставлен.

ыт эксплуатации сетей 220 *кв* подтверждает, что ением номинального напряжения и соответствен- еличением линейной изоляции атмосферные пере- ения становятся все менее опасными. На линиях путем целесообразного расположения защитных и правильного выбора сопротивлений заземления жно избежать прямых ударов молнии в провода и обратных разрядов.

ля защиты распределительных устройств подстанций от волн перенапряжений, приходящих с линий, не- мо обеспечить требуемые характеристики вентиль- разрядника и правильно скоординировать величины щегося напряжения на разряднике с разрядными на- ениями изоляции трансформаторов и высоковольтной атуры. Однако германские фирмы не смогли разре- задачу создания разрядника на 400 *кв*.

числу опасных внутренних перенапряжений Бир- носит повышение напряжения на конце холостой следствие ее емкостного эффекта. У линии длиной напряжение на открытом конце увеличивается по сравнению с напряжением на сборных шинах ельной подстанции. Для предупреждения перена- й при внезапном сбросе нагрузки рекомендуется нять к линии наглухо компенсационные катушки ном конце.

ледование внутренних перенапряжений в системе передач не может ограничиться только изучением го эффекта, необходимо исследование перенапря- ммутационных, феррорезонансных, динамических; ание самовозбуждения генераторов, подключаемых

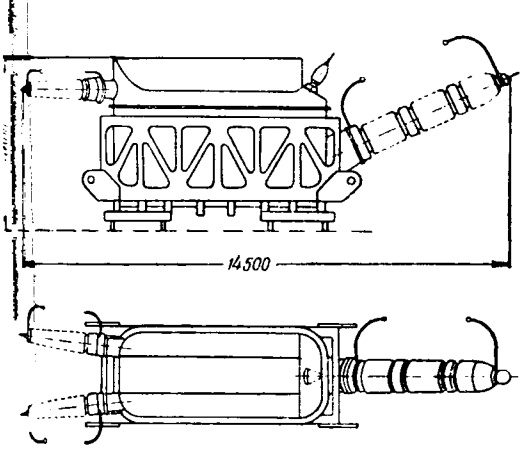


Рис. 4. Передвижной однофазный трансформатор 400 *кв*, 100 тыс. *ква* (проект).

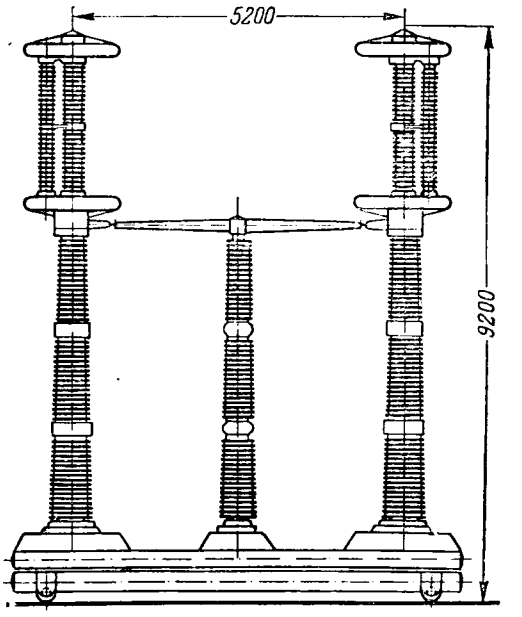


Рис. 5. Воздушный выключатель 400 *кв* (проект).

к холостой линии; исследование влияния компенсации ли- нии, влияния короны. В упомянутых же материалах эти вопросы совершенно не освещаются.

Вопросы оборудования 400 *кв* в проектировках наме- чены весьма эскизно, требования к нему не конкретизи- рованы, что, очевидно, объясняется начальными, эскизными стадиями проектирования передачи и конструирования оборудования, на которых была прервана работа герман- ских организаций над проблемами 400 *кв*.

По требованиям RWE габарит силовых трансформа- торов 400 *кв* должен обязательно допускать перевозку по железной дороге в совершенно собранном виде. Это тре- бование предопределило ряд попыток германских фирм дать конструкцию трансформатора с уменьшенными вер- тикальными размерами за счет увеличения длины (рис. 4). Эти попытки сопровождались весьма сомнительными кон- структивными решениями — горизонтальное расположение обмоток, горизонтальный вывод обмотки 400 *кв* сквозь бо- ковой сердечник, применение сердечников с радиальной шихтовкой.

Предельная мощность однофазной единицы предусмат- ривалась 100 тыс. *ква* и мощность трехфазной группы 300 тыс. *ква*.

Трансформаторы должны быть рассчитаны для работы с заземлением нулевой точки обмотки 400 *кв* через дуго- гасительные катушки. Коэффициент трансформации сило- вых трансформаторов намечался $\frac{400}{\sqrt{3}}\Big/\frac{115}{\sqrt{3}}$ 27 *кв* или $\frac{400}{\sqrt{3}}\Big/$ 115 *кв*. Создание трансформаторов 400/220 *кв* счи- талось весьма затруднительным.

Испытательное напряжение током промышленной ча- стоты для силовых трансформаторов намечалось, по неко- торым данным, равным 800 *кв*, импульсная прочность 1 740 *кв* (по другим данным 1 500 *кв*).

Подробной разработки и обоснования вопроса об уров- нях прочности изоляции силовых трансформаторов и дру- гой аппаратуры 400 *кв* в этих проектировках проведено не было.

Разрывные мощности выключателей в сети 400 *кв* должны иметь значительную величину, поскольку герман- скую сеть 400 *кв* предполагалось осуществить по связан- ной схеме. Для нее необходимы разрывные мощности вы- ключателей 400 *кв* в 7—8 млн. *ква* при номинальном токе 1 000...1 200 *а* и мощности выключателей на отходящих линиях 110 *кв* на понизительных подстанциях 400/110 *кв* в 3 млн *ква* при номинальном токе 2 000 *а*.

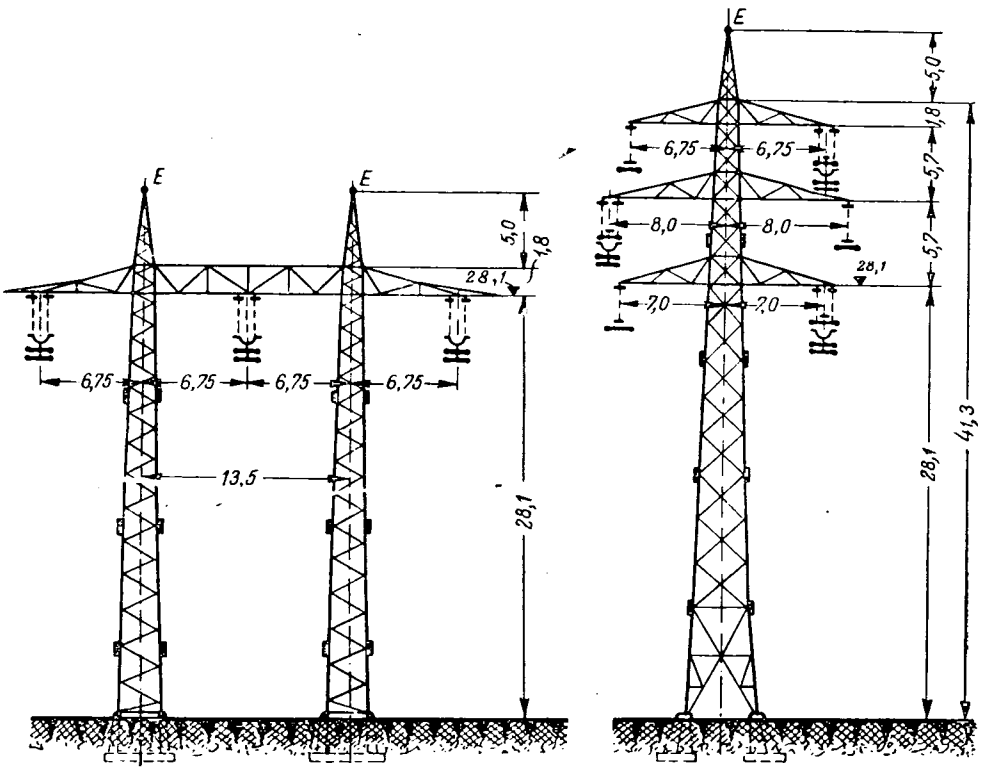


Рис. 6. Эскизы опор линий 400 *кв* с расщепленными проводами. (размеры в *м*)

Фирмы AEG и BBC начали разработку воздушных выключателей (рис. 5), фирма Сименс — экспансионного выключателя на напряжение 400 *кв*.

Значительная трудность возникла с уменьшением времени действия выключателя.

Разъединитель на ток 1 200 *а* для 400 *кв* предполагался с двумя фарфоровыми колонками с шаровыми контактами высотой 6 *м* каждая, одна неподвижная, другая перемещающаяся по горизонтальным направляющим. Разъединитель имеет двигатель для привода.

Распределительные устройства подстанций 400 *кв* по материалам проектировок аналогичны по конструкции подстанциям более низкого напряжения, но отличаются значительно большими размерами. Шаг ячейки 400 *кв* проектировался от 22 до 36 и даже до 44 *м*. Высота конструкций 20 ... 25 *м*.

Распределительное устройство 400 *кв* проектировалось с двумя системами шин и одним выключателем на цепь. Предусматривался шиносоединительный выключатель.

Для линий электропередачи 400 *кв* с расщепленными проводами RWE предусматривались двухцепные металлические опоры высотой до 50 *м*, с пролетом 350 *м*, при вертикальном двух- или трехъярусном расположении проводов. Вес двухцепной промежуточной опоры 17 ... 26 *т* в зависимости от типа проводов, изоляторов и конструкции опоры. Число заземляющих тросов предполагалось различное — от одного до трех. В более поздних материалах [Л. 1] предлагаются для линий 400 *кв* одноцепные металлические опоры портального типа (рис. 6).

Заключение. Проблемы дальних передач переменным током 400 *кв* в упомянутых материалах намечены весьма эскизно, что объясняется, повидимому, начальными стадиями проектирования передачи и конструирования оборудования. Ряд решений принятых в проекте глубоко ошибочен, и это также определяет неудовлетворительный характер проектных материалов.

К таким неправильным решениям следует отнести: заземление нулевой точки 400 *кв* через компенсирующие катушки; нерациональные конструкции трансформат применение двухцепных опор для линий 400 *кв*; нет точный уровень грозозащиты установок 400 *кв*; нед точно надежные схемы подстанций и т. д.

Ряд ошибочных решений, принятых авторами про следует рассматривать как результат, продиктованный менными соображениями (например, применение д сящих катушек), характерными для капиталистиче системы хозяйства.

Как уже указывалось выше, ряд важнейших во сов, связанных с дальней передачей энергии перемен током, в упомянутых проектировках совершенно не ра батывался.

Литература

1. Д. Ж. Бирманс. Технические проблемы пере трехфазным током 400 *кв*. ETZ, стр. 455, № 17, 1950.

2. Л. Е. Машкиллейсон. Расщепление прово линий электропередачи. Электричество, № 3, 1925.

3. В. А. Веников, Г. М. Розанов и Н. Н. колов. Характеристики передач переменного тока большие расстояния. Электричество, № 7, 1950.

4. С. А. Лебедев. Исследование искусствен устойчивости. Труды ВЭИ, вып. 40. Энергоиздат, 1940.

5. В. Л. Иносов и Л. В. Цукерник. Компаун рованное возбуждение синхронных генераторов с элект механическим корректором. Электрические стан № 4 — 5, 1946.

6. И. С. Брук. Продольная компенсация линий пе дачи. Электричество, № 13, 1936.

7. А. А. Вульф. Устойчивость параллельной раб сверхдальних электропередач. Электричество, № 11, 19

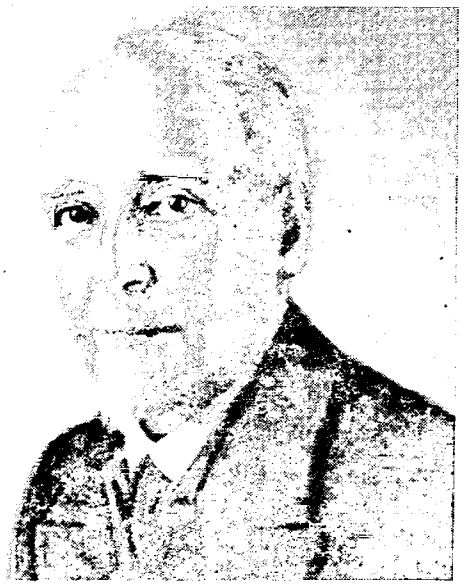
8. А. А. Вульф. Проблема передачи электроэнер на сверхдальние расстояния по компенсированным линия Энергоиздат, 1941.

Инж. С. С. РОКОТ

◇ ◇ ◇

Академик Г. М. Кржижановский

К 80-летию со дня рождения



24 января исполнилось 80-летие со дня рождения Глеба Максимилиановича Кржижановского, революционера-большевика, крупного инженера и выдающегося советского ученого-энергетика.

После окончания реального училища Глеб Максимилианович поступил в Петербургском горном институте и в 21-летнем возрасте получил звание инженера-технолога с правом, ввиду отличия, его имени на мраморную доску института.

Будучи студентом II курса, Г. М. Кржижановский вступил в нелегальный кружок технологов-марксистов вместе с Л. Б. Красиным, В. А. Старковым и Р. Э. Классоном, а в 1895 г. вступил в организованный В. И. Лениным Петербургский союз борьбы за освобождение рабочего класса, в котором принял активное участие в пропагандистской работе. Работая в то время химиком на Обуховском заводе, Глеб Максимилианович в декабре 1895 г. был арестован вместе с другими членами Союза борьбы за освобождение рабочего класса за пропаганду и выступления на рабочих собраниях. После 17-месячного предварительного заключения арестованные были высланы на поселение в Сибирь. Г. М. Кржижановский был водворен на 3 года в село Тесь, находящееся недалеко от Шушенского, куда был сослан В. И. Ленин.

После отбытия ссылки Глеб Максимилианович, работавший на Юго-западных железных дорогах, продолжал революционную работу среди железнодорожников и в дни революции 1905 г. организовал крупную железнодорожную забастовку.

Плодотворная деятельность Г. М. Кржижановского в области электрификации и энергетики началась вскоре после революции 1905 г., когда Глеб Максимилианович, получивший права работать на железных дорогах, поступил на службу в «Общество электрического освещения 1886 г.». Это была частная компания иностранного капитала, которая имела концессии на электроснабжение в Петербурге, Риге и Лодзи и не считала себя связанной распоряжениями Министерства внутренних дел в отношении приема обратно на службу, так называвшихся, неблагонадежных лиц. Г. М. Кржижановский благодаря своим исключительным способностям быстро освоил электротехнику и вскоре выдвинулся как крупный практический инженер. Начав свой путь монтером, Глеб Максимилианович, спустя непродолжительное время, встал во главе кабельной сети Петербурга, а затем Москвы.

Электрические станции в то время использовали в качестве топлива почти исключительно нефть. Крупная заслуга Г. М. Кржижановского состояла в том, что он первый стал пропагандировать в технической печати и на технических съездах необходимость перехода от использования ценной привозной нефти к использованию местных видов топлива, в частности торфа. Вместе с Р. Э. Классоном им была сооружена в то время крупная электростанция на торфу («Электропередача») недалеко от города Богородска, теперь Ногинска, и построена высоковольтная линия электропередачи длиной 85 *км* при напряжении 80 *кв*.

Первая империалистическая война застала Г. М. Кржижановского на посту директора «Электропередачи»; здесь ему пришлось преодолевать немало трудностей в связи с тяжелым экономическим и финансовым положением на электростанции и необходимостью поддерживать и без того низкий уровень жизни рабочих станции.

После Великой Октябрьской социалистической революции, продолжая работать на «Электропередаче», Г. М. Кржижановский некоторое время был председателем Технического совета ВСНХ. Затем в самом начале 1920 г. он был выдвинут В. И. Лениным на ответственный пост председателя Государственной комиссии по электрификации России (ГОЭЛРО). То был период больших экономических затруднений, возникших перед молодой Советской властью: еще не закончилась гражданская война, железнодорожный транспорт был расстроен, большинство фабрик и заводов работало с перебоями из-за отсутствия сырья и топлива, значительная часть старой технической интеллигенции стояла еще в стороне от созидательной работы Советской власти. Однако Г. М. Кржижановскому удалось собрать необходимые технические силы для разработки плана ГОЭЛРО.

После успешного завершения работы в комиссии ГОЭЛРО Г. М. Кржижановский в 1921 г. был назначен председателем Государственной плановой комиссии (сокращенно — Госплана), имевшей по мысли В. И. Ленина своей задачей — координацию и контроль в отношении мероприятий отдельных наркоматов, а также подготовку соответствующих решений СТО и Совнаркома. За время почти десятилетнего пребывания во главе Госплана Г. М. Кржижановским была выполнена большая творческая работа. Это становится особенно ясным, если учесть, что составление годичных и многолетних государственных планов развития народного хозяйства было тогда еще новым делом, что в наркоматах и на периферии только стали зарождаться плановые органы, что в тот период еще только начиналось выяснение производительных сил страны и что специально подготовленных новых кадров еще не было, а среди старых специалистов было немало неразоблаченных врагов советской власти.

В январе 1929 г. Г. М. Кржижановский был избран действительным членом Академии наук СССР и в том же году был назначен на ответственный пост вице-президента Академии наук. После перевода Президиума Академии наук СССР в Москву Г. М. Кржижановский приложил немало усилий для обеспечения правильного направления многосторонней организационной и научной жизни Академии наук. На этом поприще Глеб Максимилианович как-

вице-президент Академии наук оставил глубокий след: при нем техническим наукам было уделено внимание наравне с естественными и гуманитарными науками — было создано Отделение технических наук и был основан ряд технических научно-исследовательских институтов, в том числе и Энергетический институт Академии наук СССР.

Этому институту (в дальнейшем ему было присвоено имя Г. М. Кржижановского) Глеб Максимилианович посвятил последние 15 лет. Встав во главе Энергетического института, Глеб Максимилианович развернул его в крупное научно-исследовательское учреждение, оснащенное рядом новых лабораторий. Глеб Максимилианович непосредственно руководит и участвует в работах по общей энергетике, по созданию единой высоковольтной электросистемы в Европейской части СССР, по электрификации железнодорожного транспорта и сельского хозяйства. Большое внимание он уделяет вопросам разработки и внедрения новой техники, усовершенствованию методов сжигания топлива, внедрению пара высоких давлений, проблемам теплофикации и т. д. Г. М. Кржижановский принимает активное участие в пропаганде значения великих гидроэнергетических строек и в разрешении связанных с ними научных и технических задач (вопросы увеличения мощности гидростанций, рационального распределения получаемых от них мощностей и др.).

Чтобы получить наглядное представление о большой творческой работе Г. М. Кржижановского, достаточно просмотреть его печатные труды (3 тома) и ряд оригинальных журнальных статей. Касаясь («Энергетика»), следует отметить: если энергети тывающая теплотехнику, гидротехнику, электрот другие виды производства и применения энергии, самодавлеющее значение, то это, несомненно, научная заслуга Г. М. Кржижановского. Во всех по вопросам энергетики Глеб Максимилианович до что для получения наибольшего эффекта и в целях ного использования ресурсов страны, и в частно лива, необходимо встать на путь комбини ного использования их потенциальной энергии. посвящен проблемам планирования. III том со «Социалистическое строительство». Здесь мы нахо вы, посвященные великим людям Октябрьской рев итогам первых 10 лет социалистического строител другим проблемам.

Партия и правительство высоко оценили Г. М. Кржижановского, наградив его орденом двумя орденами Трудового Красного Знамени и ме

Широкие круги советских электротехников, знающие Глеба Максимилиановича Кржижановско лают ему сохранения на долгие годы свойственн бодрости и работоспособности на благо и процвета шей Родины.

Член-корр. Академии наук СССР, проф. К. А.

Редакционная коллегия журнала «Электричество» поздравляет академика Глеба Максимилиановича Кржижановского с 80-летием со дня рождения и выражает ему наилучшие пожелания здоровья и дальнейшей плодотворной научной деятельности в интересах великого энергетического строительства, развернувшегося в нашей стране.

Редколлегия

◇ ◇ ◇

Научно-техническая конференция на Сталинградгидрострс

16—19 ноября 1951 г. в Сталинграде была проведена научно-техническая конференция с участием работников строительства Сталинградской гидроэлектростанции, областных организаций, бригады Академии наук СССР и научно-технической общественности Сталинграда, всего — около 800 чел.

На первом пленарном заседании при открытии конференции выступил секретарь Сталинградского областного комитета ВКП(б) **И. Т. Гришин**, подробно осветивший народнохозяйственные задачи, связанные с преобразованием природы районов, тяготеющих к Сталинграду, с развитием промышленности и сельского хозяйства области и использованием естественных ресурсов в связи с постройкой гэс и оросительной системы. Начальник Сталинградгидростроя **Ф. Г. Логинов** в своей речи остановился на общих задачах строительства Сталинградского гидроузла и на значении помощи ученых строительству. Плохое знание конкретной обстановки — наиболее распространенный недостаток в работах, выполняемых для великих строек научно-исследовательскими учреждениями Академии наук СССР. Комитет содействия стройкам коммунизма Академии наук СССР должен более оперативно осуществлять свои мероприятия по оказанию помощи энергетическому строительству. Руководитель бригады Академии наук СССР академик **В. С. Кулебакин** выступил с большим докладом, посвященным работам Академии наук СССР по проблемам великих энергетических строек коммунизма. В 1951 г. более 120 институтов и других научных учреждений Академии наук СССР и академий наук союзных республик разрабатывали в помощь великим стройкам свыше 450 тем, отражающих важнейшие области техники, физики, химии, геологии и т. д. О размахе исследовательских работ можно судить по такому интересному факту — некоторые научно-исследовательские экспедиции за время своих изысканий проехали и прошли по разным маршрутам расстояние порядка 100 000 *км*. Приезд бригады Академии наук имеет своей задачей: сделать более тесным общение ученых со строителями гидроузла, лучше узнать их запросы к научным учреждениям, разрешить на месте вопросы внедрения некоторых уже законченных в институтах демии наук работ и т. д. Такое общение должно в ряться регулярно и в дальнейшем.

Вице-президент Академии архитектуры С **В. М. Келдыш** сообщил о работах Академии архитек по вопросам строительства Сталинградского гидроуз архитектурного оформления гэс. Доктор техн. **Г. А. Матвеев** охарактеризовал участие ЭНИН им. К жановского в разрешении научно-технических задач никших в связи с величественной программой круп гидроэнергетического строительства, развернувшегося стране. Исключительно важную роль в развитии прои дительных сил имеет комплексное использование элек ческой энергии. Особое внимание институт будет и ви уделять электрификации сельского хозяйства.

На заседаниях трех секций были заслушаны докла по вопросам полезащитного лесоразведения, повыше солеустойчивости растений, по экономо-географичес вопросам — кандидата эконом. наук **В. Я. Векшинов** доктора эконом. наук **И. А. Бородина**, доктора биол наук **П. А. Генкеля**, доктора хим. наук **И. Г. Дружин** и инж. **Я. В. Буйневича** (*секция № 1*); по вопросам бо бы с износом машин — доктора техн. наук **И. В. Крае ского**; о рациональных методах сварки металличес конструкций — доктора техн. наук **Н. Н. Рыкалина**, ра нального освещения строительных площадок — докт техн. наук **В. В. Мешкова**, механизации погрузочно-раз зочных работ — главного механика Сталинградгидрост **И. К. Полякова** (*секция № 2*); по вопросам организац земляных и бетонных работ на строительстве гидроэле тростанции — главного инженера Сталинградгидростр **С. Р. Медведева**, о каменных и отделочных работах в зи них условиях — кандидата техн. наук **А. А. Шишкин** о технологических правилах в строительстве гражданск сооружений — инж. **С. И. Лазутиной** (*секция № 3*).

На заключительном пленарном заседании конференц доктор техн. наук, проф **Н. Г. Домбровский** выступил подробным сообщением о новых типах механизмов дл

...работ и о результатах их эксплуатации. Он вы... ряд соображений о путях развития отечественного ...гостроения и о повышении производительности ...на землеройных и землесосных машинах.

Затем были заслушаны итоги работы секций и приняты ...ации.

...ференция обратила внимание Академии наук, Гидр...ента и Гидроэнергопроекта на отсутствие достаточно ...и систематического научного обобщения опыта ...ьства гэс, каналов и т. п., на крайне недостаточ... запаздалую информацию о проведенных научных ...ваниях по тематике великих строек. Специально ...лась плохо поставленная взаимная информация меж...йками.

...ференция составила перечень первоочередных во..., которые необходимо включить в текущие тематиче... планы научных организаций. В их числе: организа... и технические проблемы эмтс (электромашино... станций); вопросы рационализации методов ...ия стройплощадок и средств механизации без ...ия воздушных электросетей; разработка перспек... электробаланса Сталинградской гэс и, в частно... проблема развития электроемких производств на базе ...градской гэс; разработка способов сварки арматуры ...ического профиля из стали повышенной прочности, ...стыков и узлов арматуры, разработка аппаратуры ...ого трансформатора для контактной сварки круп... стержней, рационализация и автоматизация электро... производственных агрегатов на строительстве, ...низация управления и контроля за работой строи... машин и другие вопросы.

...ференция признала целесообразным: созыв при на... Сталинградгидростроя регулярных научно-техни... совещаний; организацию в Сталинграде филиала ...ии наук СССР и филиалов некоторых институтов ...ии наук для наиболее быстрого и оперативного раз... научных задач, возникающих в ходе строитель... развертывание для этого на строительстве ряда ...ментальных лабораторий, оснащенных современ... измерительными приборами и испытательной аппара... расширение в Сталинграде научно-технической биб...ки.

При закрытии конференции с заключительным словом об итогах работы конференции выступил академик **В. С. Кулебакин**, отметивший огромную пользу научно-технического содружества работников науки и производства. Критика, которой была подвергнута деятельность некоторых научных учреждений за отрыв от актуальных запросов практики, послужила своевременным стимулом для еще большего укрепления связи учреждений Академии наук с великими стройками коммунизма. Бригада Академии наук СССР, тесно соприкасаясь в период конференции с многочисленными знатными людьми Сталинградгидростроя — стахановцами, ударниками, мастерами, бригадирами, техниками и инженерами, убедилась в том, что на Сталинградгидрострое создан сплоченный коллектив советских людей, беззаветно преданных делу, воля и энергия которых упорно и полностью направлены к успешному выполнению задания правительства. Это обязывает всех научных и исследовательских работников еще сильнее напрячь свои силы для всемерной помощи проектировщикам и строителям гидроузла, конструкторам машин, рационализаторам и инициаторам передовых методов труда. Ученые, — закончил руководитель бригады Академии наук В. С. Кулебакин, — заверяют строителей Сталинградского гидроузла, что их требования к научно-исследовательским организациям будут полностью учтены и послужат основой для успешного развития содружества.

Участники конференции послали приветственное письмо товарищу Сталину; в письме отмечается, что конференция установила пути решения ряда сложных научно-технических проблем, связанных с возведением в установленный срок крупнейших гидротехнических сооружений на Волге.

В последний день пребывания бригады Академии наук в Сталинграде на могилу Сталинградских героев Великой Отечественной войны, в присутствии представителей партийных и советских организаций и большого числа граждан города Сталинграда, был торжественно возложен венок от коллектива ученых Академии наук СССР в знак вечной памяти и бессмертных заслуг героев Советской Армии, отдавших свою жизнь за свободу и независимость социалистической Отчизны.

Д. Р.

◇ ◇ ◇

Конференция по троллейбусному транспорту

...–27 октября 1951 г. в Ростове-на-Дону Всесоюзным ...инженерно-техническим обществом городского ...транспорта (ВНИТО ГЭТ) была проведена научно... техническая конференция по троллейбусному транспорту. ...работе конференции приняли участие представители ...ства коммунального хозяйства РСФСР, Академии ...ального хозяйства им. Памфилова, Ростовского-на-...родского комитета ВКП(б), Ростовского-на-Дону ...ома городского совета депутатов трудящихся и де... более 20 троллейбусных предприятий различных ... СССР.

...ткрывая конференцию, директор Управления Ростов...-на-Дону трамвайно-троллейбусного транспорта инж. ...Черкесов коротко остановился на значении троллей... транспорта и охарактеризовал задачи, стоящие ...троллейбусными предприятиями страны

...ференция заслушала 12 докладов, посвященных ...бусному транспорту. О информационным сообще... эксплуатации троллейбусов в Ростове-на-Дону вы... инж. **С. А. Надеждин**, который отметил, что раз... гитлеровцами троллейбусное хозяйство города ...ось создавать заново. В настоящее время довоен...вень троллейбусного транспорта города далеко ...ден. В эксплуатации находятся в значительной ...овременные машины МТБ-82Д.

...ближайшее время намечается расширение троллей... сети и введение в эксплуатацию новых машин.

...ндидат техн. наук **И. С. Ефремов** (МАДИ) сделал ...«Классификация и терминология в подвижном составе троллейбусного транспорта». Инж. **А. Г. Файн** (Гипрокоммундортранс МКХ РСФСР) выступил с докладом «Проект технических условий и норм на проектирование тягового хозяйства троллейбуса (депо, троллейбусные ремонтные мастерские и троллейбусные ремонтные заводы)». Инж. **Л. П. Агафонов** (Гипрокоммундортранс МКХ РСФСР) сделал доклад «Типовые троллейбусные депо на 25 и 50 машин».

Инж. К. А. Маштаков (Управление троллейбусного транспорта Мосгорисполкома) выступил с докладом «Опыт эксплуатации троллейбусов типа МТБ-82Д», в котором коротко подвел итоги эксплуатации в течение 18 лет троллейбусного транспорта Москвы. Емкость троллейбусов увеличилась с 50 до 65 пассажиров, относительный вес на 1 пассажиро-место снизился с 261 до 220 *кг*, мощность тягового двигателя увеличена с 60 до 86 *квт*, коэффициент выпуска троллейбусов возрос до 0,8, эксплуатационная скорость увеличилась до 14,8 *км/час*, регулярность движения достигла 95,5%, межремонтный пробег повысился: до среднего ремонта — со 100 до 150 тыс. *км*, а до капитального ремонта — с 200 до 450 тыс. *км*. Докладчик остановился на анализе аварийности оборудования троллейбусов и подробно изложил мероприятия, направленные к ее устранению.

Инж. **Г. А. Лучай** (Главное управление трамваев и троллейбусов МКХ РСФСР) выступил с информационным сообщением о мероприятиях по улучшению качества троллейбусов.

Знатный водитель московского троллейбуса **А. Н. Ягубов** сделал доклад «Мой опыт вождения троллейбуса». Докладчик подробно остановился на роли соцсоревнования в деле улучшения эксплуатации троллейбусного транспорта, на вопросах осмотра машин, в особенности электрооборудования, и на опыте вождения машин с экономией электрической энергии. Помимо применяемого им в эксплуатации минимального числа пусков на перегоне без задержек на реостатных позициях, он подчеркнул важность отличного знания водителем: маршрута следования троллейбуса, профиля пути, состояния дорожных покрытий, расположения стрелок, пересечений, секционных изоляторов и других особенностей трассы и контактной сети, а также прилегающих к ней переулков. Докладчик указал также на необходимость непосредственного участия водителя в проведении ремонтов троллейбуса. Своим опытом поделились также знатные водители ростовского и ленинградского троллейбусов.

Кандидат техн. наук **В. Л. Марковников** (Академия коммунального хозяйства) сделал доклад «Новый 45-местный троллейбус для городов СССР». Инж. Н. В[ский (Второй московский троллейбусный парк) в с докладом «Малая механизация в тр[бусных парках». Инж. **Р. Г. Шварцман** ([троллейбусное управление) осветил опыт Киевск[лейбусного хозяйства и рассказал о достижениях[сти ремонта и изготовления редукторных червяко[стерен.

Выступившие в прениях подчеркнули актуальн[рокого внедрения передовых методов вождения [бусов и их ремонтов. На конференции были приня[ветствующие этой задаче решения.

После окончания конференции делегаты посет[стовский-на-Дону вагоноремонтный завод, тролле[парк, а также Андреевское трамвайное депо.

Конференция послала приветствие товарищу [

Кандидат техн. наук Ю. М. ГА

Инж. А. Г.

А. С. Румянцев

20 ноября 1951 г. скоропостижно скончался заместитель председателя Правления Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетиков (ВНИТОЭ), заслуженный деятель Общества, Александр Семенович Румянцев, член ВКП(б).

А. С. Румянцев, начав свою деятельность с рабочего слесаря, вырос до руководителя общественной организации, объединяющей огромный коллектив энергетиков Советского Союза. Окончив без отрыва от производства учебу в Промакадемии, Александр Семенович работал вначале в проектных и строительных организациях, а с 1938 г. бессменно избирался на должность заместителя председателя ВНИТОЭ.

Руководство большой общественной инженерной организацией потребовало от А. С. Румянцева затраты огромной энергии и творческой инициативы. Со знанием дела он решал многообразные вопросы, возникающие в деятельности общества, и, чутко прислушиваясь к голосу энергетической общественности, правильно ориентировал общество на решение наиболее актуальных вопросов советской энергетики, следуя по пути, начерт[большевистской партией и советски[вительством.

Несмотря на большую загрузку[той в обществе, Александр Семенов[ходил время и для работы над [нием своей квалификации — им бы[кончена диссертация на соискание[степени кандидата технических наук[

Деятельность А. С. Румянцева с[ствовала успешному решению Общ[многих важных задач, стоявших[Обществом в период послевоенной с[ской пятилетки и в связи с ве[стройками коммунизма.

Работа Александра Семеновича Румянцева была[чена правительством, наградившим его медалями: «З[рону Ленинграда», и «За доблестный труд в В[отечественной войне».

Путь товарища Румянцева — славный путь боль[ка, преданного делу партии Ленина — Сталина, и ч[ка большой души, отдавшего всю свою жизнь делу[тельства социализма.

М. А. Шателен, А. М. Залесский, В. П. Лебедев, Б. А. Телешев, С. М. Же[Ф. К. Архангельский, А. И. Баумгольц, Т. Л. Золотарев, М. Н. Бу[Б. В. Проскуряков, А. М. Гурвич, А. И. Есьман, Ф. Т. Швец, Г. М. Кондра[С. В. Усов, А. Е. Алексеев, В. В. Болотов, И. М. Тиходеев, Н. В. Гераси[Л. А. Мелентьев, Г. О. Левит, А. В. Орловский, В. М. Ведихов, М. А. Ст[кович, Л. К. Грейнер, В. В. Никифоров, Г. С. Солодовников, С. П. Смир[Н. А. Золотарева, Н. М. Калекина, Т. Л. Гольдмерштейн, Л. Д. Клеб[Н. Ф. Салуев, А. А. Заико, М. Ф. Мартенс и др.

Правление Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетиков с прискорбием[щает о скоропостижной кончине заместителя председателя правления Румянцева Александра Се[вича 20 ноября 1951 г.

Правление ВНИ

◇ ◇ ◇

П. Л. Калантаров

2 декабря 1951 г. после непродолжительной, но тяжелой болезни скончался профессор Ленинградского политехнического института им. Калинина, член ВКП(б), заслуженный деятель науки и техники, доктор технических наук Павел Лазаревич Калантаров.

Советские электротехники потеряли в лице профессора П. Л. Калантарова крупного ученого, электрика-теоретика, талантливого деятеля высшей школы, отдавшего всю свою жизнь советской науке, делу подготовки специалистов для нужд социалистической промышленности.

Павел Лазаревич Калантаров родился в Ленинграде 25 июня 1892 г. Свою научную и преподавательскую деятельность Павел Лазаревич начал в первые годы Советской власти и принимал самое активное участие в организации высшего электротехнического образования в нашей стране. Непосредственно по окончании в 1921 г. Ленинградского политехнического института он был оставлен при институте преподавателем кафедры теоретических основ электротехники. С 1925 г. он занял должность доцента кафедры, а с 1930 г. должность профессора. Возглавив с 1930 г. кафедру переменных токов, а в 1934 г. вновь объединенную кафедру теоретических основ электротехники, он воспитал целую плеяду учеников, многие из которых ведут в настоящее время плодотворную научную и преподавательскую работу в различных высших учебных и научных учреждениях страны. Многие ученики Павла Лазаревича с успехом работают в промышленности.

Глубоко эрудированный в широкой области научных знаний, исключительно строгий и требовательный в научном отношении к себе и к своим ученикам, П. Л. Калантаров много сделал для развития одной из крупнейших научных школ теоретической электротехники, основоположником которой был Владимир Федорович Миткевич, внесший большой вклад в формирование дисциплины «Теоретические основы электротехники». Свой большой научно-педагогический опыт П. Л. Калантаров воплотил в своих замечательных первоклассных учебниках и учебных пособиях, по которым было воспитано несколько поколений советских электриков. В 1934 г. был издан написанный П. Л. Калантаровым учебник «Теория переменных токов», который в переработанном виде вошел составной частью в написанный совместно с Л. Р. Нейманом учебник «Теоретические основы электротехники», вышедший тремя изданиями. Тремя изданиями вышло составленное П. Л. Калантаровым руководство к лабораториям переменных токов. Под редакцией П. Л. Калантарова коллективом кафедры составлен задачник по теории переменных токов.

Научные труды Павла Лазаревича Калантарова относятся к различным теоретическим вопросам современной электротехники. Первые его научные работы были посвящены исследованию сложных явлений в нелинейных электрических цепях, содержащих железо и емкость. Эти работы Павла Лазаревича, выполненные в тот период, когда только намечались пути практического использования нелинейных свойств таких цепей и когда лишь ставились, основные вопросы построения теории этих цепей, безусловно, послужили импульсом для современного широкого практического применения нелинейных цепей с железом во многих важнейших областях электротехники. В работах, посвященных актуальному вопросу о расчете индуктивности сложных электрических контуров, П. Л. Калантаровым предложены оригинальные методы и установлены некоторые общие свойства для контуров различной конфигурации, что дало возможность в ряде важных случаев решить эту трудную задачу.

Советской научной и инженерной общественности хорошо известна широкая деятельность П. Л. Калантарова в комиссиях Академии наук СССР, в Комитете по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР и в других учреждениях по вопросам установления единой научной терминологии и единой системы единиц в области электротехники. Этим важным вопросам посвящен ряд личных работ Павла Лазаревича, возбудивших оживленную дискуссию (см., например, Электричество, № 1, 1948; №№ 1, 2, 12 1949; №№ 4, 10, 1950).

Научные труды П. Л. Калантарова отличаются строгостью и ясностью изложения, глубиной анализа и четкостью доказательств. Идеи, заложенные в его трудах, развивались в многочисленных работах его учеников.

Павел Лазаревич обладал выдающимися организаторскими талантами, которые ярко проявились в его большой руководящей работе в Ленинградском политехническом институте им. Калинина. В 1934 г. ему было поручено организовать общетехнический факультет института. Как декан этого факультета он вел большую научно-организационную работу, нашедшую впоследствии отражение в разработке основных принципов общетеоретической подготовки инженеров в высших учебных заведениях. В 1936 г. он был выдвинут на работу в качестве руководителя учебной и научной деятельности всего института, а с 1943 г. по 1946 г. был директором института.

П. Л. Калантаров всегда принимал самое активное участие в общественной деятельности. С 1930 г. по 1935 г. был членом бюро, а затем председателем бюро Секции научных работников ЛПИ. С 1939 г. по 1947 г. он был депутатом Выборгского Районного Совета депутатов трудящихся г. Ленинграда. Близкое участие в течение ряда лет П. Л. Калантаров принимал в деятельности журнала «Электричество», являясь редактором одного из научных отделов журнала, консультантом и автором.

Партия и правительство высоко оценили плодотворную и многогранную работу профессора П. Л. Калантарова, наградив его двумя орденами Ленина и медалью за доблестный труд в Великой Отечественной войне.

Всю свою жизнь Павел Лазаревич посвятил служению советскому народу, советской науке и до последних дней неутомимо работал на своем посту.

М. А. Шателен, В. А. Толвинский, Л. Р. Нейман, М. М. Михайлов, И. А. Зайцев, А. Г. Лурье, Л. А. Цейтлин, А. В. Миткевич.

◇ ◇ ◇

Библиография

М. Г. ЧИЛИКИН. ОБЩИЙ КУРС ЭЛЕКТРОПРИВОДА. 380 стр., ц. 13 руб. 70 коп. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. Госэнергоиздат, 1951.

Книга предназначается для студентов, не специализирующихся в области электропривода. В соответствии с этим в ней рассматриваются вопросы, относящиеся как к теории электропривода, так и к управлению электроприводами. Вопросы теории электропривода излагаются в первых пяти главах книги (228 страниц). Вторая часть книги, посвященная вопросам управления электроприводами, занимает 146 страниц.

В первых параграфах книги приводится краткая история развития электропривода и подчеркивается приоритет русских и советских ученых. В связи с этим нужно отметить, что при описании регулируемого привода с электронно-тиратронным управлением типа ЭЛИР (§ 74) в книге не указано, что эта система электропривода разработана ЭНИМС.

В первой части, после общих и исторических сведений по электроприводу, рассматриваются вопросы механических характеристик электроприводов, регулирования их скорости, переходных режимов, нагрузочных диаграмм и выбора мощности двигателей. Объем материала этой части нужно признать вполне достаточным. Следует отметить полезное начинание автора, заключающееся во введении в главу о регулировании скорости электроприводов: § 24 «Привод постоянного тока с ионными преобразователями», § 29 «Регулирование при помощи асинхронной муфты скольжения», § 30 «Регулирование скорости асинхронных двигателей в схеме с поворотным статором» и описания асинхронно-синхронного каскада в § 32.

Из отдельных замечаний по первой части можно указать на следующие.

(К стр. 32) Необходимо было дать понятие об устойчивости электропривода. (К стр. 46) Расположение характеристик в том или ином квадранте определяется не направлением вращения машин, а режимом, в котором она работает; поэтому фиг. 32 и относящийся к ней текст могут неправильно ориентировать читателя. Двигатели КПД сняты с производства; лучше ориентироваться на двигатели новой серии МП. Режим рекуперативного торможения приводов с асинхронными машинами (стр. 62) имеет место не только при переключении полюсов, но и в приводах грузоподъемных машин (подъемники, эскалаторы и т. д.) и в преобразовательных агрегатах. Под входным моментом (стр. 65) понимается момент, развиваемый синхронным двигателем в асинхронном режиме при скорости, равной точно (а не примерно) 0,95 n_0; он никак не связан со скоростью, при которой подается возбуждение. Достоинства системы генератор — двигатель (стр. 82) не ограничиваются только ее регулирующими свойствами; очень важно также, что эта система дает возможность получения оптимальных переходных процессов. Для двигателей последовательного возбуждения изменением тока возбуждения (стр. 91—92) можно не только повысить скорость, но и понизить ее (шунтированием якоря). Утверждение, что x_2' мало по сравнению с x_1 (стр. 110), неверно; обычно x_2' соизмеримо с x_1. Наименование § 42 «Ускорение переходных процессов в электроприводах» не соответствует содержанию этого параграфа, которое касается исключительно переходных процессов при пуске системы генератор — двигатель. Автор дает пример расчета нагрузочной диаграммы кривошипных ножниц с двигателем постоянного тока параллельного возбуждения; такие ножницы приводятся обычно асинхронными электродвигателями.

В гл. 5, посвященной нагреву и выбору мощности двигателей, следовало бы сказать о законах старения изоляции и о возможности температурной перегрузки двигателя. По этому поводу имеется лишь недостаточно ясное указание на стр. 213.

Вторая часть книги содержит три главы: управление электроприводами, схемы управления электроприводами и главу, названную «Синхронное вращение, синхронная передача, следящий привод».

В гл. 6 «Управление электроприводами» п общие положения, рассмотрены методы и принци матического управления ускорением и торможени троприводов. Здесь же дан большой параграф, в излагаются элементы общей теории регулирования нием в общий курс электропривода элементов теор лирования автор проявил весьма ценную ини В этом параграфе, содержащем 17 страниц, авто лось в доступной форме изложить основные по определения теории регулирования и критерии ус сти систем автоматического регулирования. Вопрос чивости иллюстрируются удачными примерами.

В следующем параграфе излагаются принцип тромашинного управления. Этому важному вопрос жающему современные тенденции в развитии элек вода, следовало бы уделить больше места и внима

Далее излагаются принципы управления двига постоянного тока от ионных преобразователей.

Глава 7, в которой дается описание схем релей тактного управления электродвигателями, содерж которые недочеты. Приведенное описание действия стройки реле РП в схеме фиг. 237 неудачно. Кон противовключения работает при отпуске РП, поэтом зачем говорить о токе его трогания. На стр. 304 след бы сказать не о токе нормальной работы, а о вел тока при $n = 0$ и при полностью включенных сопро ниях. Схема фиг. 239 неработоспособна, так как ре при пуске двигателя втянется раньше контактора Л описании принципиальной схемы автотрансформат пуска синхронного двигателя (фиг. 241) не указан перед включением выключателя *2* должен быть обяз но отключен выключатель *3*. При описании действия ризованного реле (стр. 310) указано, что реле отп якорь, включая возбуждение синхронного двигателя, зультате уменьшения тока в катушке реле и его ма ного потока. В действительности главную роль играет личение длительности пауз между двумя соседними волнами тока в катушке реле при увеличении ско двигателя. Иначе не было бы смысла в применении ризованного реле. Приведенные на фиг. 246, 247 и схемы синхронных двигателей и схему двигателя с раллельным возбуждением (фиг. 249) следовало бы нить более современными.

В последней главе дана теория синхронного вращ нескольких асинхронных электродвигателей с общим статом, а также описание других систем синхронного щения. Здесь можно было ограничиться двумя двигател

Говоря о применении системы электрического автор в качестве примера приводит перегрузочные кр По современным воззрениям для перегрузочных кр нужно обеспечить одинаковость проходимых путей, а равенство скоростей вращения.

Далее автор дает краткую теорию сельсинов, спра ливо подчеркивая приоритет советских ученых в созда бесконтактных сельсинов. В заключение дается описание которых схем следящих приводов.

Книга написана хорошим языком, причем автор ограничивается только математической трактовкой ош ваемых явлений, а старается разъяснить их физичес сущность. В связи с тем, что книгой, несомненно, б пользоваться также студенты заочных втузов, было весьма полезно привести примеры и несколько типо задач по основным вопросам теории электропривода.

Качество технического оформления книги неодина вое. Так, чертежи выполнены удовлетворительно, но фо графии оставляют желать лучшего. Это, видимо, вооб слабое место издательства. Написанная проф. М Г. Чи киным книга является первым опытом создания обще курса электропривода и встретит благожелатель прием у читателей.

Кандидат техн. наук, доц. Г. П. ХАЛИЗ
Всесоюзный заочный политехнический институ

◇ ◇ ◇

О ЖУРНАЛЕ „РАБОЧИЙ ЭНЕРГЕТИК" (№№ 1—9, 1951 г.)

В 1951 г. начал выходить новый массовый производственно-технический ежемесячный журнал «Рабочий энергетик». Этот журнал — орган Министерства электростанций СССР — предназначен для широких кругов рабочих-энергетиков: электромонтеров, механиков, машинистов, котельных мастеров и техников, работающих на электростанциях, электрических и тепловых сетях, на промышленных предприятиях, строительстве и монтаже энергетических установок.

Необходимость в таком журнале назрела уже давно. Количество энергетиков необычайно возросло во всех областях народного хозяйства. Партия большевиков, Советское правительство всегда уделяли большое внимание подготовке технических кадров, преданных народу и стоящих на уровне новейших достижений передовой науки и техники.

В редакционной статье, которой открывается № 1 журнала «Рабочий энергетик», справедливо отмечается, что дальнейшее развитие советской энергетики, ее развитие и дальнейшее совершенствование невозможны без подготовки хорошо обученных и обогащенных передовым опытом кадров рабочих-энергетиков. Систематическое повышение своих знаний, сознательное овладение опытом своей профессии имеет большое значение, что по выполняемой работе и по уровню своей квалифицированный рабочий на советских электростанциях и в энергоцехах предприятий и строек (машинист, кочегар, электромонтер) часто мало отличается от инженерно-технического техника. Рецензируемый журнал ставит своей целью распространение среди рабочих-энергетиков по основных специальностей последних сведений о технике советской энергетики и приобщение своих читателей к практическим достижениям передовых людей электростанций, электрических и тепловых сетей. Журнал рассматривает главным образом вопросы эксплуатации и ремонта энергетических установок, не оставляя, однако, в стороне и вопросы строительства и монтажа этих установок. Редакция обещает организовать широкий обсуждением и обеспечить крепкую, живую связь авторов и читателей журнала, привлекая в качестве авторов лучших производственников, рабочих, мастеров, техников и инженеров.

Эти установки и пожелания редакции журнала «Рабочий энергетик», безусловно правильны. Необходимо помнить, что массовый энергетический журнал должен воспитывать широкие массы рабочих в духе советского патриотизма, показывая превосходство советской техники и приоритет отечественных ученых, инженеров и изобретателей. Необходимо развивать интерес и любовь рабочих к своей профессии. Между тем, просматривая номера нового журнала, приходится констатировать отсутствие в них статей о великих стройках коммунизма, об актуальных задачах социалистического соревнования рабочих-энергетиков. Вопросы экономики рабочих специальностей и энергетики вообще мало отражены в вышедших номерах журнала.

Большинство опубликованных в журнале статей не вызывает особых возражений,[1] ряд статей заслуживает безусловно положительной оценки. Интересны, например, статья мастера московской кабельной сети В. Ф. Лебедева и бригад Ф. Л. Ковалева при ремонтных работах в кабельных сетях» (№ 1), Ю. М. Элькинда «Мегомметры и особенности их эксплуатации» (№ 1), инженеров Ленэнерго А. А. Дементьева и В. Л. Смольникова «Новые методы ремонта электрической аппаратуры» (№ 6), инженера МКС В. А. Смирнова «Из опыта эксплуатации фидерной городской сети» (№ 3), мастера релейной защиты и автоматики Московской кабельной сети Семкина «Применение грузовых приводов в городских сетях», А. А Дементьева и В. Л. Смольникова «Новый способ сушки генераторов и высоковольтных двигателей» (№ 3), инж. Д. М. Андрианова «Некоторые вопросы индустриализации электромонтажных работ» (№ 4) и некоторые другие. Неплохо начат отдел «Обмен опытом», где помещаются сообщения передовых рабочих-энергетиков. Дежурный теплового щита А. Е. Дидик подробно описывает, каким образом ему удалось добиться высоких показателей работы котла; его содержательная статья (№ 3) может служить хорошим пособием при составлении производственной инструкции по эксплуатации котлоагрегатов. На эту же тему пишет кочегар П. Ашукин (№ 2). В № 1 и 6 в этом отделе уделено внимание работе машинных и химических цехов электростанций.

Приходится, однако, сожалеть, что наряду с распространением передового опыта эксплуатации теплоэнергетического оборудования в первых выпусках «Рабочего энергетика» не нашла никакого отражения богатая практика электриков, станционников и работников энергоемких предприятий, направленная на достижение безаварийной работы, снижение расхода электроэнергии на собственные нужды и на единицу выпускаемой продукции, а также на улучшение коэффициента мощности. В связи с этим нельзя не отметить, что удельный вес статей на электротехнические темы энергохозяйства вообще недостаточен. Имеющийся в журнале отдел «Переписка с читателями» убедительно показывает, что читатели проявляют большой интерес именно к вопросам электротехники. Редакции следовало бы шире освещать вопросы электротехники.

Наконец, бросается в глаза несколько ведомственный уклон в статьях (в основном написанных работниками системы Министерства электростанций), в то время как журнал «Рабочий энергетик» обязан удовлетворять запросы рабочих и мастеров энергетиков всего народного хозяйства, как это и отмечено в задачах журнала. Значение «Рабочего энергетика» возросло бы, если бы в нем освещались успехи энергетиков, работающих в тяжелой индустрии, являющейся главным потребителем электрической и тепловой энергии. В журнале мало статей, интересующих рабочих и мастеров энергетиков промышленных предприятий (электропривод, электрическое освещение и пр.), сельских установок и т. д. В то же время, растрачивая бесполезно свой объем, журнал помещает статьи, дублирующие другие энергетические журналы, например: статьи «Простой способ защиты электродвигателей от работы на двух фазах» (помещенной уже в журнале «Электрические станции» и «Промышленная энергетика»), «Железобетонные сборные подножины для металлических опор на линиях электропередач» и некоторые другие. В связи с этим следует напомнить редакции журнала «Рабочий энергетик» слова товарища Сталина в беседе о задачах журнала «Красная молодежь»[2] — «...Незачем здесь дублировать другие журналы. Каждый печатный орган в нашем Союзе должен иметь свое определенное место в общей работе».

Ознакомление читателей с материалами других издающихся в СССР энергетических журналов можно осуществить в случае необходимости путем организации раздела «По страницам технических журналов», где и помещать соответствующие краткие рефераты с указанием источников

В журнале следует развить дискуссии. В передовой статье «Правды» от 13 декабря 1950 г. эта задача была поставлена достаточно ясно. «Некоторые журналы избегают острых, злободневных вопросов, которые возникают в науке и практике, не организуют научных дискуссий, слабо развертывают критику, не проявляют должной настойчивости в борьбе за новое, передовое, прогрессивное».

Отдел журнала «Библиография», по существу, ограничивается формальным перечнем названий книг с незначительными аннотациями. В отделе нужно систематически помещать рецензии на массово-техническую энергетическую литературу с тем, чтобы облегчить читателям журнала выбор наилучших книг этой серии для самообразования и повышения своей квалификации.

«Справочный отдел», появившийся в одном только № 2, нужен читателям и его необходимо вести из номера в номер, знакомя читателей с особенностями новой аппаратуры, с нормами, стандартами и пр. Систематически следовало бы вести и отдел «Хроника», который появился лишь в 2—3 номерах.

[1] Допущенной редакцией журнала „Рабочий энергетик" ошибке, выразившейся в опубликовании неправильной статьи Е. Д. Зейлидзона, имеется признание редакции в специальном уведомлении читателям № 9, 1951 г.

[2] И. В. Сталин. Соч., т. 7, стр. 4—5.

Авторский состав журнала следует пополнить за счет периферии, так как, судя по номерам 1951 г., в журнале сотрудничают главным образом москвичи и преимущественно работники Мосэнерго.

В заключение приходится еще отметить неудовлетворительно составленный указатель статей за 1951 г. (опубликован в № 9): указатель дан лишь по авторам (в алфавитном порядке), а предметно-тематического указателя нет. Таким образом, читатели будут испытывать затр при поисках нужной им статьи.

Все отмеченные недостатки легко устранимы. мнения, что журнал «Рабочий энергетик» получи нейшее широкое распространение.

Инж. В. К. Б

Инж. Г. К. Ц

Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(издания 1951 г.)

АЛАТОРЦЕВ С. А. ГОРНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. 372 стр., ц. 11 руб. Углетехиздат.

АЛЕКСЕЕВ А. Е. ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия для институтов железнодорожного транспорта. 484 стр., д. 20 руб. Трансжелдориздат.

ВИНТЕР А. В. ВЕЛИКИЕ СТРОЙКИ КОММУНИЗМА. 85 стр., д. 2 руб. Изд-во Академии наук СССР.

ГАВРИЛОВ А. Н. ТЕХНОЛОГИЯ АВИАЦИОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. 460 стр., ц. 18 руб. Оборонгиз.

ДАХНОВ В. Н. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ. 482 стр., ц. 21 руб. Гостоптехиздат.

ДОМБРОВСКИЙ И. А. АНТЕННЫ. 352 стр., ц. 20 руб. 50 коп. Связьиздат.

ИГНАТЬЕВ Н. К. ТЕЛЕВИДЕНИЕ. Допущено в качестве учебника для техникумов связи. 208 стр., ц. 7 руб. 80 коп. Связьиздат.

КАРАВАЙ З. Н. УКАЗАТЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ (1949—1950 гг.), вып. VI. 140 стр., беспл. (МЭИ. Библиотека. Информационно-библиографический отдел).

* **ЛЕВИ С. С.** ЭЛЕКТРОПРИВОД СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВ. 232 стр., ц. 7 руб. Госстройиздат.

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается помещение рецензий.

ЛУЦИК В. И., РЕМОНТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И Т ТОРОВ. 180 стр., ц. 9 руб. 90 коп. Машгиз.

САНИН А. А., РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИС ВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ. 388 стр., ц. 14 руб. 60 коп. Гос

ТРУДЫ МОСКОВСКОГО ОРДЕНА ЛЕНИНА ЭНЕРГ СКОГО ИНСТИТУТА ИМ. В. М. МОЛОТОВА, вып. VII (ческие машины и аппараты). Под редакцией А. Н. Ла 171 стр. беспл. Госэнергоиздат (Московский энергетический им. В. М. Молотова).

Настоящий выпуск «Трудов» содержит статьи: П. С. С «Исследование параллельного трехфазного коллекторного д с питанием со стороны ротора», А. В. Иванова-Смоленского дование и расчет асинхронной многофазной машины с несим ной обмоткой на статоре», И. С. Гончарова «Графоаналит метод расчета продольной намагничивающей силы поперечн ции якоря в машинах постоянного тока», Б. К. Буля «Агре моник», Е. Л. Львова «Связь между различными методами статических тяговых сил в электромагнитных системах», И. Б кер «Применение методов численного интегрирования для динамических характеристик электромагнитов постоянного В. А. Балагурова «Напряжения и токи в магнето после раз контактов в первичной цепи», С. М. Брагина «О нагрева водов и кабелей», В А. Привезенцева «Исследование эма ных проводов на синтетических лаках» и А. В. Нетушила и Табакс «Расчет рабочего конденсатора для высокочастотного вания пластмасс».

◇ ◇ ◇

К ЧИТАТЕЛЯМ

В соответствии с решениями читательских конференций журнала «Электричество», проведенных в 1948 и 1949 гг., редакционная коллегия журнала принимала меры, направленные к улучшению содержания журнала, в частности: к увеличению числа статей на современные актуальные темы, удовлетворяющие практические запросы читателей; к развитию дискуссий, обмена опытом, технической информации; к освещению истории электротехники и пр.

Учитывая пожелания читателей, в тематический план журнала включены статьи обзорного характера, позволяющие знакомиться с состоянием отдельных вопросов читателям, не являющимся специалистами в данной области. Ряд таких статей уже был опубликован.

Для устранения еще неизжитых недостатков в журнале, а также для уточнения тематики на II полугодие 1952 г. и на 1953 г., с целью более полного освещения вопросов, особо интересующих широкие круги читателей журнала «Электричество», редакционная коллегия обращается к читателям с просьбой сообщить редакции свои замечания и соображения по содержанию журнала за последние 2—3 года, а равно соответствующие предложения и рекомендации.

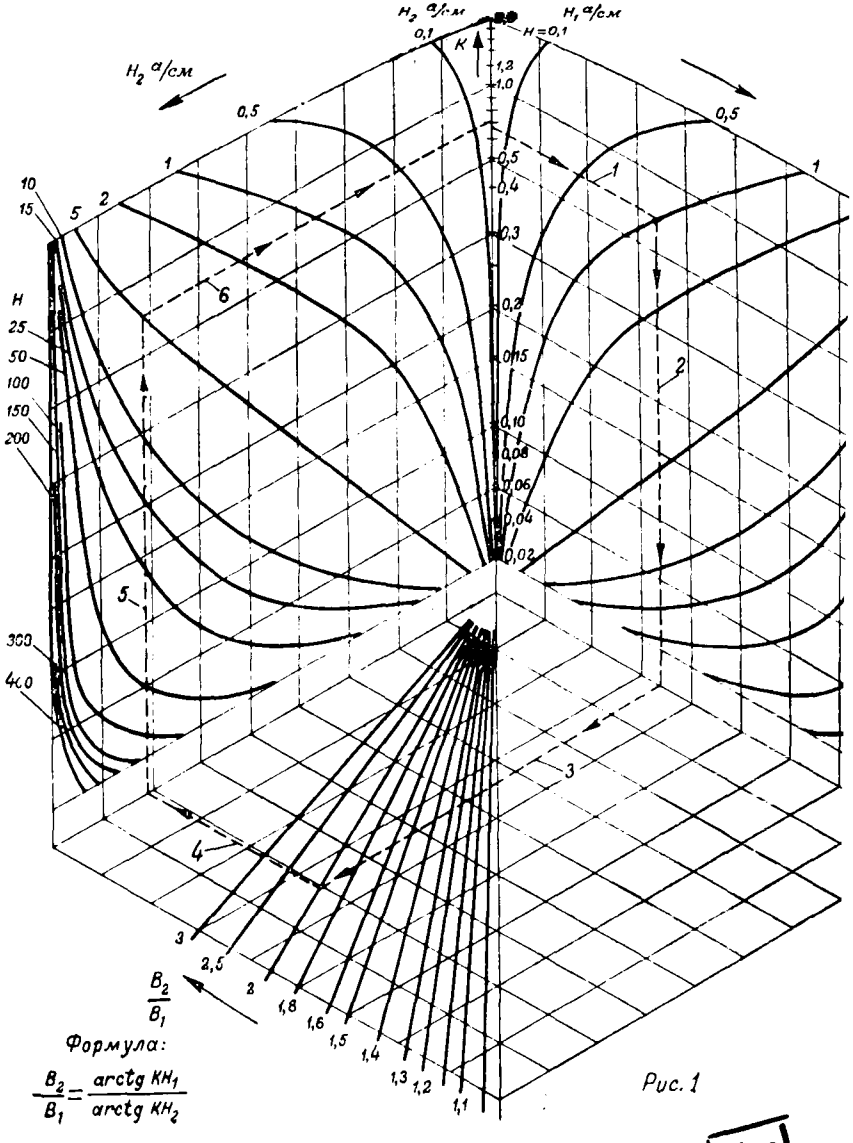
Отчет об откликах читателей будет опубликован в журнале.

Редколлегия журнала «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

◇ ◇ ◇

Сдано в набор 15/XII 1951 г. Подписано к печати 6 II
Объем 12 печ. л. Уч.-изд. л. 17 Бумага 60X
Т 01482 Тираж 16 100 экз. Зак.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

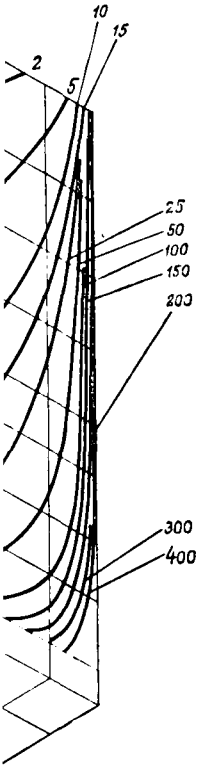


Формула:

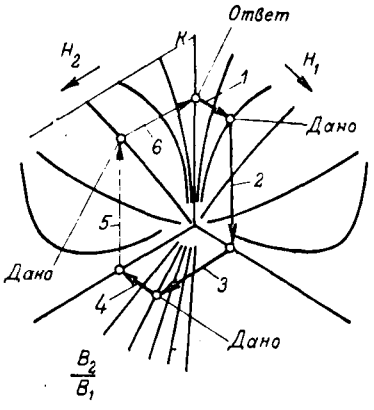
$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{\operatorname{arctg} KH_1}{\operatorname{arctg} KH_2}$$

Рис. 1

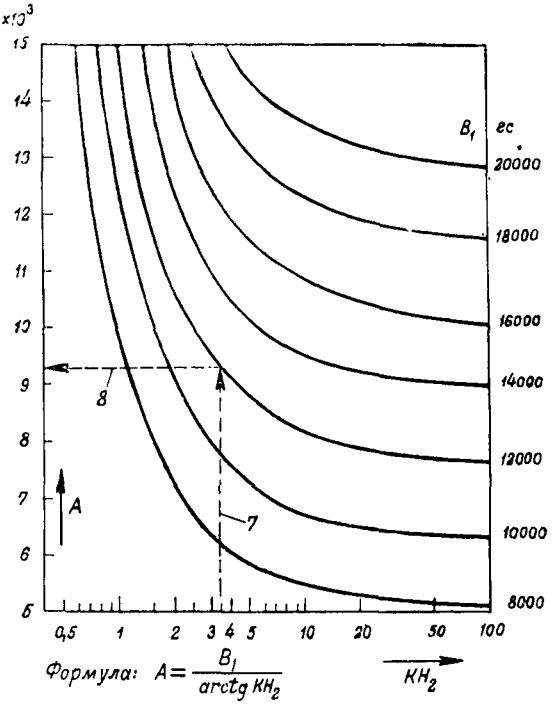
ЦТК 3



Схемы пользования:
к рис. 1

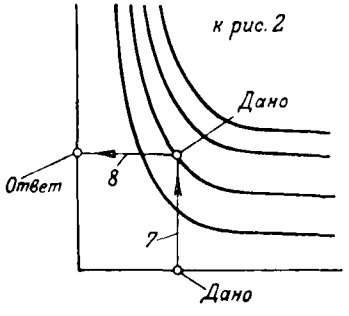


Величиной K необходимо задаться предварительно и повторять построение до совпадения линий 1 и 6



Формула: $A = \frac{B_1}{\text{arctg } KH_2}$

Рис. 2



Пример: Координаты двух точек кривой намагничивания $B_1 = 6000$ гс $H_1 = 1$ э/см

$B_2 = 12000$ гс $H_2 = 5$ э/см

Находим по рис. 1 $K = 0{,}7$

Для $KH_2 = 0{,}7 \cdot 6 = 3{,}6$ *Находим по рис. 2* $A = 9{,}2 \cdot 10^3$

Составил инж. А. Б. ТИМОФЕЕВ

ЦЕНА 8 РУБ.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА

НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Орган Академии наук СССР, Министерства электростанций СССР и Министерства электропромышленности СССР

Основан в 1880 г. Русским техническим обществом

Журнал рассчитан на широкие круги инженеров и научных работников, ведущих работу в различных областях электротехники.

В журнале широко освещаются основные теоретические и практические вопросы, связанные с развитием электротехники и электрификации народного хозяйства СССР.

Журнал ЭЛЕКТРИЧЕСТВО уделяет особое внимание вопросам внедрения новой передовой электротехники во всех отраслях народного хозяйства СССР.

В журнале освещаются новые научно-технические проблемы, связанные с величественными сооружениями Сталинской эпохи — Куйбышевской, Сталинградской, Каховской гэс, Главным Туркменским каналом и другими энергетическими стройками.

В журнале систематически освещаются вопросы истории русской электротехники, печатаются рефераты и обзоры по отечественным и иностранным журналам и проводятся научно-технические дискуссии.

В журнале принимают участие виднейшие ученые и специалисты — электротехники Советского Союза.

12 номеров в год (144 печ. листа)

Годовым подписчикам на журнал высылается календарь-справочник на 1952 г.

Подписная цена 96 руб.

Подписка на журнал ЭЛЕКТРИЧЕСТВО принимается во всех отделениях Союзпечати и во всех почтовых отделениях