

621.3(05)

~~Э-45~~

~~Ж3985~~

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

103600, Москва, ул. М. И. Ульянова, дом 1
Вологодская обл. с/б/м
библиотека им. М. В. Вавилова

1952



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

7-12

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

7
1952
июль

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

СОДЕРЖАНИЕ

Письмо товарищу И. В. Сталину от рабочих, работниц, инженеров, техников и служащих строительства Каховской гидроэлектростанции	3
А. В. Миролёбов и С. С. Рокотян—Линия электропередачи 400 кв Куйбышев—Москва	5
А. А. Сиротин — Электропривод от асинхронного двигателя с колебательными контурами в роторе	11
Е. К. Мезин — Самовозбуждающаяся муфта с коллектором	17
Л. Г. Живов — Регулятор замедления шахтной подъемной машины	20
И. В. Тихомиров — Повышение устойчивости работы передвижных электростанций при пуске электродвигателей соизмеримой мощности	26
В. Д. Юренков — Антенный емкостный отбор энергии от линий электропередачи	32
И. К. Бобровская, Я. Л. Быховский, К. П. Егоров, Б. С. Клебанов, В. И. Медведев, Н. Г. Мякочина — Дальняя телефонная высокочастотная связь по линиям электропередачи	41
В. П. Ларионов — К вопросу о механизме импульсного разряда в длинном промежутке	46
Б. К. Буль — К расчету магнитных проводимостей поля вблизи воздушного зазора	52
В. Ю. Ломоносов — Периодические процессы в нелинейных цепях	55
Б. И. Яхинсон — Характеристики электрических цепочных схем в переходном режиме	59
О. М. Богатырев — Рационализация методов расчета переходных процессов в линейных электрических цепях с сосредоточенными параметрами	64
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
Г. И. Тер-Газарян — Измерение вибраций гидрогенераторов	71
М. А. Панасенков — Электромагнитный тормоз	74
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
С. А. Гусев — Первая линия электропередачи с применением трехфазного тока	77
Б. С. Успенский — Канал имени Москвы. К 15-летию эксплуатации	82
СТАНДАРТЫ И НОРМЫ	
Д. С. Лившиц — Проект правил устройства электротехнических установок. Проводки шинопроводами	84
ДИСКУССИИ	
К статье В. Ю. Ломоносова „Операторное исчисление и электротехническое образование“ Г. А. Сисоян, Г. С. Аронзон, М. Ю. Шухатович, А. Я. Бергер, А. А. Янко-Триницкий	87
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Новые электрифицированные аппараты и механизмы. Автоматическое управление работой электролебедок. Новая установка продольной емкостной компенсации линии передачи	91
ХРОНИКА	
Цимлянская гэс дала промышленный ток	94
Учреждение Польской академии наук	94
Научно-техническое совещание в Ленинграде по повышению коэффициента мощности	94
Ромбическая номограмма (на третьей полосе обложки)	



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. Гла-**
зунов, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, доктор 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.

**ОТ РАБОЧИХ, РАБОТНИЦ, ИНЖЕНЕРОВ, ТЕХНИКОВ И СЛУЖАЩИХ
СТРОИТЕЛЬСТВА КАХОВСКОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

МОСКВА, КРЕМЛЬ

**Председателю Совета Министров Союза ССР
товарищу СТАЛИНУ Иосифу Виссарионовичу**

Дорогой Иосиф Виссарионович!

Мы, строители Каховской гидроэлектростанции, шлем Вам, великому вождю и учителю, вдохновителю и организатору побед советского народа, гениальному зодчему коммунизма, свой пламенный сердечный привет.

Под руководством партии Ленина — Сталина, под Вашим мудрым водительством советский народ осуществляет величественную программу коммунистического строительства, успешно борется за дальнейший подъем всех отраслей народного хозяйства, культуры и улучшение благосостояния трудящихся.

Сооружение Каховской гидроэлектростанции, осуществляемое по Вашей инициативе, является ярким выражением ленинско-сталинской национальной политики большевистской партии, свидетельством нерушимой ленинско-сталинской дружбы народов нашей Советской Родины, ярчайшим примером братской помощи украинскому народу со стороны всех народов Советского Союза и, в первую очередь, великого русского народа.

Героический, самоотверженный труд советских людей с каждым днем приближает нашу Родину к великой цели — построению коммунизма в нашей стране.

В то время как империалисты Америки, Англии и других капиталистических стран ведут бешеную подготовку новой мировой войны, вкладывают колоссальные средства в производство орудий уничтожения человечества, советские люди под Вашим руководством проводят величайшую созидательную работу по созданию экономической базы коммунистического общества, строят гигантские электростанции и каналы, названные народом великими стройками коммунизма.

Мы выражаем глубокую благодарность коммунистической партии, Советскому правительству и лично Вам, дорогой товарищ Сталин, за то, что нам оказано доверие осуществлять строительство

одной из этих великих строек — Каховской гидроэлектростанции, сооружение которой позволит превратить засушливые степи Юга Украины и Севера Крыма в цветущий плодородный край.

Докладываем Вам, дорогой Иосиф Виссарионович, что план строительно-монтажных работ 1951 года коллективом строителей Каховской ГЭС выполнен на 100,8 процента, план первого квартала 1952 года — на 100,6 процента и по вводу жилья — на 101,1 процента.

За 1951 год и первый квартал 1952 года построено и сдано в эксплуатацию свыше 25 тысяч квадратных метров жилой площади. В короткий срок на строительстве вырос город Новая Каховка. Построены и введены в эксплуатацию тепловая электростанция, бетонный завод, лесопильный цех, железнодорожная линия Федоровка — Каховка протяженностью 154 километра и линия электропередачи Кривой Рог — Новая Каховка протяженностью 140 километров с понизительной подстанцией. Построена автобаза на 500 автомашин и 30 километров автодорог. Выполнение большого объема проектно-изыскательских работ и создание производственно-технической базы позволило в этом году начать работы по выемке котлована под здание гидроэлектростанции.

На строительстве создан коллектив рабочих, инженерно-технических работников и служащих готовый к выполнению задач, поставленных перед строительством в 1952 году, выросли кадры стахановцев — новаторов производства. Каменщики Тельник и Цирюльников, бригадир комплексной бригады Василенко, плотник Руденко, экскаваторщик Баденков, бульдозерист Нечаев, шоферы Шевякин, Ястребова и многие другие показывают образцы стахановского труда.

Этих успехов мы добились благодаря всенародной помощи, заботе нашей родной большевистской партии, Советского правительства и лично Вашей, Иосиф Виссарионович.

Родина щедро снабжает строителей всем необходимым для выполнения правительственного задания по сооружению Каховского гидроузла. Из Москвы и Ленинграда, Киева и Минска, Урала и Сибири, Поволжья и Закарпатья непрерывным потоком идут материалы и оборудование в адрес нашей стройки.

Однако в нашей работе имеются еще серьезные недостатки. Мы не выполнили в 1951 году задание по вводу в эксплуатацию жилой площади и культурно-бытовых зданий, не добились полного использования всех возможностей по увеличению темпов, улучшению качества и снижению стоимости строительства.

Обещаем Вам, товарищ Сталин, в кратчайший срок устранить имеющиеся недостатки и сделать нашу стройку образцовой.

В 1952 году нам предстоит выполнить большой объем строительно-монтажных работ, широко развернуть работу по строительству основных гидротехнических сооружений и к концу года приступить к укладке бетона в сооружение плотины, гидроэлектростанции и шлюза.

Обсудив на общих собраниях рабочих, инженерно-технических работников и служащих задачи, поставленные перед строителями Каховской ГЭС в 1952 году, и учтя наши возможности, мы берем на себя следующие обязательства:

1. Досрочно, к 7 ноября с. г., выполнить государственный план строительно-монтажных работ 1952 года.

2. Во втором квартале с. г. широко развернуть работы по основным сооружениям и к концу года выполнить 4 миллиона кубометров земляных работ, в том числе способом гидромеханизации 3,7 миллиона кубометров, и к концу года подготовить котлован под укладку бетона.

3. Досрочно, к первому октября 1952 года, выполнить годовой план по строительству жилья и сдать в эксплуатацию 40 тысяч квадратных метров жилой площади. Строительство жилья осуществлять поточно-скоростными методами.

4. Построить и ввести в действие 14 подсобных предприятий и культурно-бытовые объекты, намеченные планом 1952 года.

5. Построить и сдать в эксплуатацию два автоматизированных бетонных завода общей произ-

водительностью 4 тысячи кубометров бетона в сутки.

6. Повысить производительность труда на 5 проц. против уровня, достигнутого в 1951 году.

7. Выполнить годовой план автоперевозок на 105 проц. и снизить их себестоимость на 5 проц.

8. Решительно улучшить качество строительно-монтажных работ. Законченные строительством основные сооружения, подсобные предприятия, жилые дома и соцкультурные здания сдавать государственной комиссии с оценкой на «отлично» и «хорошо».

9. Максимально механизировать все строительно-монтажные и погрузо-разгрузочные работы. Повысить использование механизмов и машин на 5 проц. против плана, сократить расход горючего и смазочных материалов на 3 проц. против нормы, продлить межремонтный срок службы каждой машины и механизма на 5 проц. против установленных норм.

10. Путем экономного расходования материалов, топлива и электроэнергии, дальнейшего улучшения организации работ, внедрения новой строительной технологии, передовых методов труда и максимальной механизации снизить стоимость строительно-монтажных работ на 0,5 проц.

11. Подготовить в 1952 году через учебную сеть, а также путем производственно-технического обучения 2100 квалифицированных рабочих.

Дорогой Иосиф Виссарионович!

Выполняя Ваше указание не успокаиваться на достигнутом и сознавая всю глубину ответственности за то высокое доверие, которое оказано нам, мы заверяем Вас, что приложим все усилия, весь свой опыт и обеспечим перевыполнение взятых нами обязательств.

Желаем Вам, дорогой Иосиф Виссарионович, долгих лет жизни на благо нашего народа и всего прогрессивного человечества.

Да здравствует наша Советская Родина — Союз Советских Социалистических Республик!

Да здравствует вдохновитель и организатор наших побед — Всесоюзная коммунистическая партия большевиков!

Да здравствует мудрый вождь и учитель советского народа и всего прогрессивного человечества, наш родной и любимый товарищ Сталин!

Обсуждено и принято на собраниях рабочих, работников, инженеров, техников и служащих строительства Каховской гидроэлектростанции

[Правда, 1 июня 1952 г.]



Линия электропередачи 400 кВ Куйбышев—Москва

Инж. А. В. МИРОЛЮБОВ и инж. С. С. РОКОТЯН
Москва

Сооружение гигантских гидроэлектростанций на Волге — Куйбышевской гЭС и Сталинградской гЭС — ставит перед советскими энергетиками ряд новых технических задач. Важнейшей из этих задач является передача огромных количеств электроэнергии на далекие расстояния.

Для передачи энергии Куйбышевской гЭС в Москву на расстояние свыше 900 км и Сталинградской гЭС в Москву на расстояние свыше 1 000 км должны быть построены две линии электропередачи, по каждой будет передаваться мощность порядка 1 000...1 200 тыс. кВт. Эти электропередачи явятся важнейшим этапом на пути создания единой высоковольтной сети, которая охватит в ближайшие годы большую часть Европейской территории Советского Союза.

Электропередача подобного масштаба еще нигде не осуществлялась, и советские энергетики впервые в мире создают ее в весьма короткие сроки.

Настоящая статья имеет своей целью изложение основных характеристик дальней электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва. Линия электропередачи Сталинградская гЭС — Москва по протяженности и по передаваемой мощности примерно такая же, как и линия Куйбышевская гЭС — Москва, поэтому технические решения для обеих линий во многом аналогичны.

Напряжение и число цепей электропередачи. Мощность, которая будет передаваться по линии Куйбышевская гЭС — Москва, и протяженность этой линии требуют применения новой, более высокой ступени напряжения переменного тока 50 гц. В качестве номинального напряжения для нее принято 400 кВ, наибольшее же длительно допустимое рабочее напряжение на 5% выше, т. е. 420 кВ. Напряжение 360 кВ технически и экономически оказалось неприемлемым, так как оно не обеспечивало при двух цепях необходимой степени устойчивости параллельной работы и требовало сооружения третьей цепи линии электропередачи.

В соответствии с режимами Куйбышевской гЭС линия электропередачи некоторое число часов в году будет работать при малых и средних нагрузках. Ввиду этого активные потери мощности при холостом ходе длинной линии 400 кВ, связанные с большими емкостными токами и коронированием, играют значительную роль, и увеличение

Приводятся основные технические решения, принятые в проекте линии электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва. Дается описание мероприятий, обеспечивающих необходимый уровень устойчивости линии, приводятся исходные данные, определяющие уровень изоляции линии и технические параметры оборудования линии и подстанций 400 кВ.

числа параллельных цепей при одной и той же передаваемой мощности и режиме работы электропередачи вызывает ухудшение ее экономических показателей.

На рис. 1 приведены экономические характеристики, полученные на основании проектных проработок одного из вариантов электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва, для двух, трех и четырех параллельных цепей и для одной и той же передаваемой мощности. Для линии электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва приняты две параллельные цепи, пропускной способностью 600 тыс. кВт каждая.

Линия электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва спроектирована для работы с оптимальным к. п. д., по ней не должно быть перетоков реактивных мощностей, она должна работать без перепада напряжений на отправном и приемном концах. Для этой цели на отправном конце и в

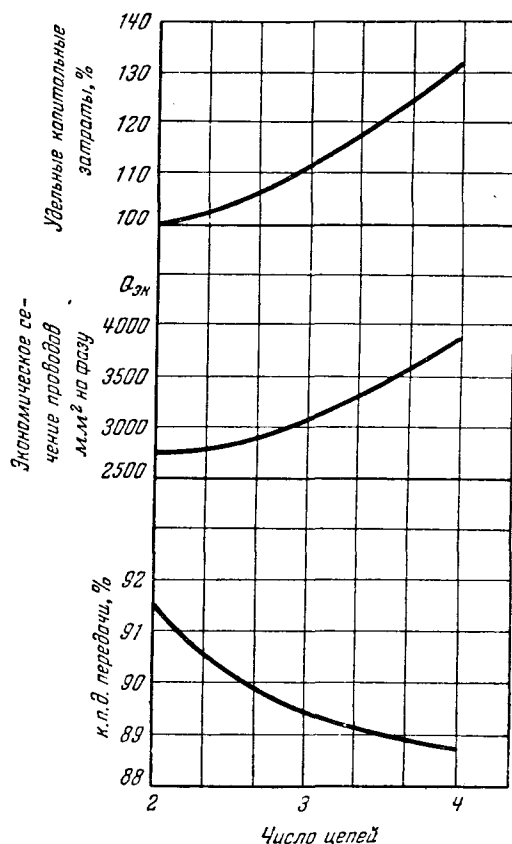


Рис. 1. Влияние числа цепей на экономические показатели передачи.

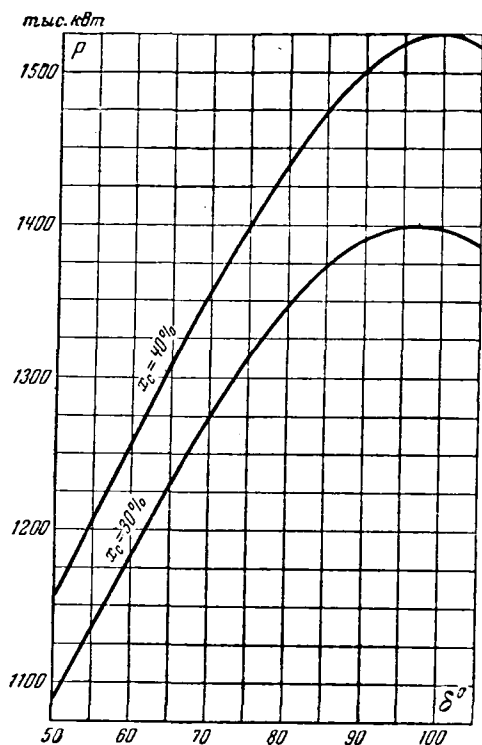


Рис. 2. Предельные мощности по условиям статической устойчивости.

середине линии будут установлены шунтирующие реакторы 400 кВ суммарной мощностью 600 тыс. кВА, а на приемном конце — мощные синхронные компенсаторы.

Для снижения активных потерь энергии, вызываемых током нагрузки, плотность тока по сравнению с линиями 110 и 220 кВ будет уменьшена. Для линии Куйбышевская гЭС — Москва (при двух цепях) она принята равной 0,5...0,6 а/мм², в связи с чем сечение алюминиевой части проводов каждой фазы одной цепи будет равно примерно 1500 мм². Годовые потери энергии в линии при передаче 6,1 млрд. кВтч в год будут сведены к 4...4,5%.

Пропускная способность электропередачи. Предельная нагрузка одной цепи линии электропередачи напряжением 400 кВ, длиной 800...1000 км, с одиночными проводами, работающей в энергосистеме со стандартными характеристиками оборудования, не выше 200 тыс. кВт на одну цепь. Поэтому для двухцепной линии электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва были разработаны дополнительные мероприятия, которые позволят увеличить ее пропускную способность до 600 тыс. кВт на цепь и обеспечат статическую и динамическую устойчивость параллельной работы синхронных машин, связанных этой линией.

К числу таких мероприятий относятся:

а) автоматическое регулирование возбуждения синхронных машин с помощью специальных методов и выполнение систем возбуждения генераторов таким образом, чтобы обеспечивалось постоянство э. д. с. за переходной реактивностью;

б) применение оборудования с улучшенными характеристиками, в частности, гидрогенераторы Куйбышевской гЭС и трансформаторы 400 кВ будут иметь сниженные реактивности;

в) расщепление проводов линии электропередачи 400 кВ с целью снижения ее индуктивного сопротивления; провод каждой фазы линии Куйбышевская гЭС — Москва будет расщеплен на три провода;

г) продольная емкостная компенсация посредством последовательного включения в линию 400 кВ батарей статических конденсаторов; на линии Куйбышевская гЭС — Москва будет применена емкостная компенсация, величина которой равна 30...40% индуктивного сопротивления линии;

д) установка на приемных подстанциях 400/115 кВ мощных синхронных компенсаторов, оборудованных быстродействующими регуляторами возбуждения;

е) применение переключательных пунктов, разделяющих передачу на 4 части;

ж) применение быстродействующих выключателей и релейной защиты, которые обеспечат выключение поврежденного участка в сети 400 кВ за время, не превышающее 0,1 сек;

з) применение активных мер повышения динамической устойчивости параллельной работы, в частности, заземление нулевых точек повышающих трансформаторов 400 кВ через небольшое активное сопротивление, применение ударного возбуждения генераторов; кратковременное включение трехфазных нагрузочных сопротивлений, установленных на шинах 400 кВ Куйбышевской гЭС.

Кривые предельных мощностей электропередачи, определяемых условиями статической устойчивости для различных значений продольной емкостной компенсации, приведены на рис. 2. Кривые изменения сдвигов эквивалентных э. д. с. генераторов при трехфазном коротком замыкании вблизи шин 400 кВ Куйбышевской гЭС, при выключении короткого замыкания через 0,12 сек, при включении нагрузочного сопротивления через 0,16 сек и выключении его через 0,5 сек с момента возникновения короткого замыкания приведены на рис. 3. Пропускная способность и индуктивное сопротивление линии 400 кВ в зависимости от числа параллельных проводов в фазе показаны на рис. 4.

Схема электропередачи. Двухцепная линия электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва (рис. 5) коммутируется по связанной схеме с тремя переключательными пунктами, с четырьмя постами продольной емкостной компенсации, включаемыми в линию приблизительно на равном расстоянии от близлежащих переключательных пунктов¹, с линиями 400 кВ, связывающими между собой несколько приемных подстанций 400/115 кВ. Такая схема обеспечивает надежную

¹ Рассматривается также вариант размещения статических конденсаторов на переключательных пунктах.

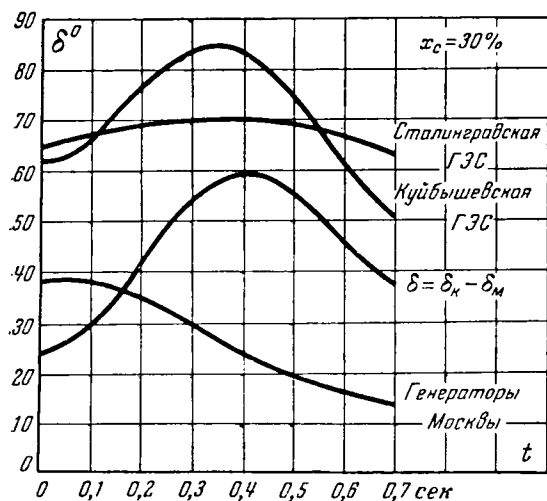


Рис. 3. Кривые изменения сдвигов эквивалентных э. д. с. генераторов при трехфазном коротком замыкании у шин 400 кВ Куйбышевской гЭС.

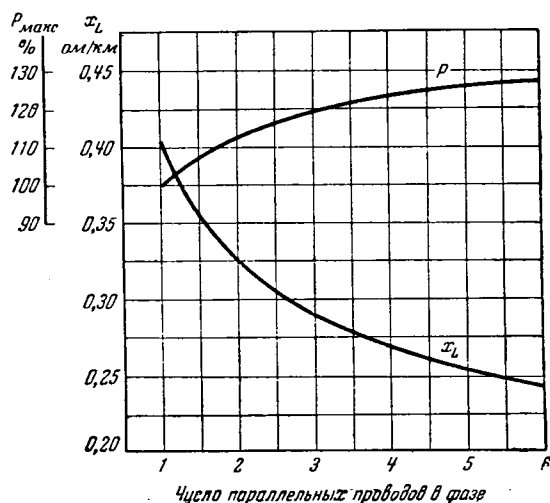


Рис. 4. Индуктивное сопротивление и пропускная способность линии 400 кВ при различном числе параллельных проводов в фазе.

работу самой электропередачи и создает наилучшие условия для развития приемной Московской энергосистемы 110 и 220 кВ.

Схема линии электропередачи Сталинградская гЭС—Москва будет отличаться лишь тем, что один из переключательных пунктов является промежуточной подстанцией 400/115 кВ для питания центральных черноземных областей.

Уровни изоляции. Уровни изоляции системы 400 кВ определяются следующими исходными условиями:

- а) нулевые точки обмоток 400 кВ силовых трансформаторов наглухо заземлены;
- б) наибольшее рабочее линейное напряжение равно 420 кВ;

в) линия электропередачи защищена по всей длине от прямых ударов молнии двумя тросовыми молниеотводами, защитный угол составляет $15 \dots 20^\circ$;

г) подстанции 400 кВ также защищены от прямых ударов молнии;

д) на подстанциях устанавливаются вентильные разрядники;

е) уровень внутренних перенапряжений не превосходит $3U_{\text{фаз, макс}}$, где

$$U_{\text{фаз, макс}} = 343 \text{ кВ};$$

ж) импульсное испытательное трехударное напряжение при полной волне 1,5/40 мксек для изоляции линии электропередачи на 33% выше

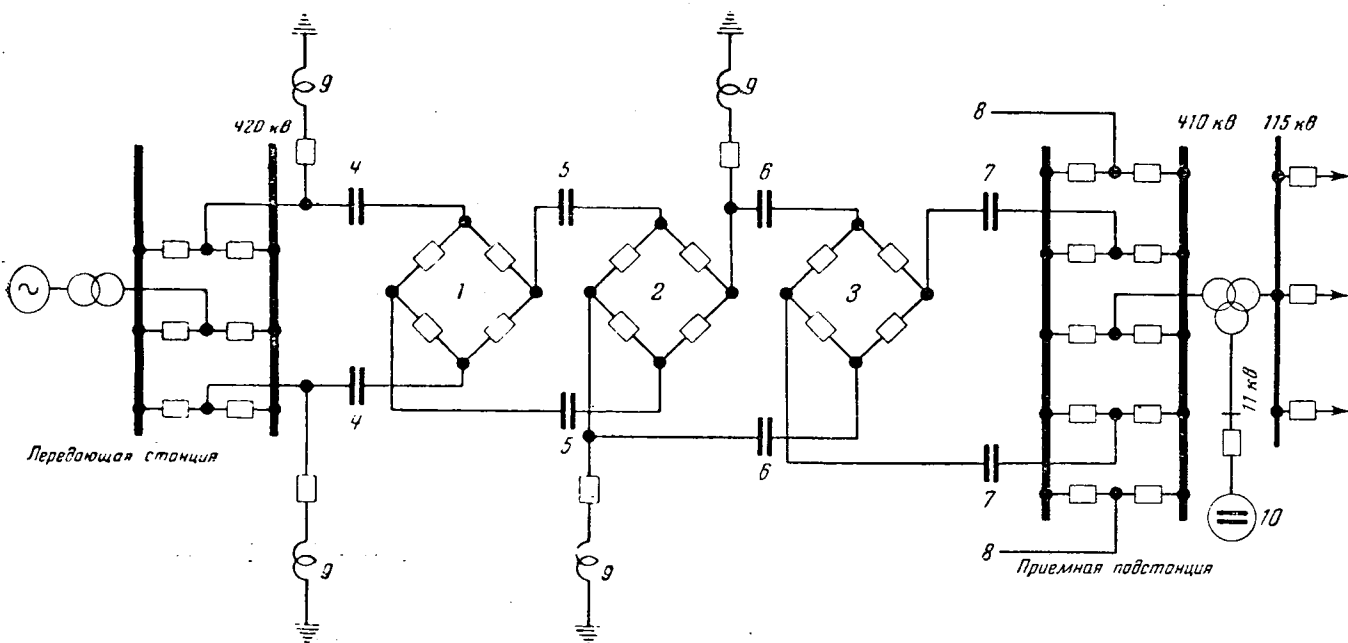


Рис. 5. Схема двухцепной линии электропередачи Куйбышевская гЭС—Москва.

1, 2, 3—переключательные пункты; 4, 5, 6, 7—конденсаторные посты; 8—линии к другим приемным подстанциям; 9—шунтирующие реакторы; 10—синхронный компенсатор.

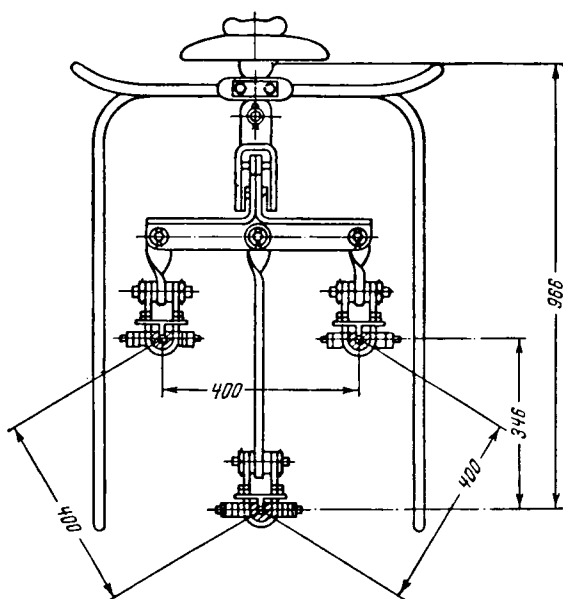


Рис. 6. Подвеска одной фазы из трех параллельных проводов.

импульсного испытательного напряжения внутренней изоляции аппаратов.

Описание линии электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва. Длина линии 925 км. Линия будет выполнена сталеалюминиевым проводом, диаметр провода 30,2 мм, вес 1 км провода 1 800 кг, разрывающее усилие 14 370 кг. Каждая фаза линии будет иметь три таких провода, расположенных по вершинам равностороннего треугольника с длиной стороны 400 мм (рис. 6).

Изоляторы — фарфоровые, подвесного типа. Поддерживающая гирлянда будет состоять из 22 изоляторов типа ПЦ-7; имеющих размеры 185×300 мм и испытательную электромеханическую нагрузку 7 т. Гирлянды участков линии, проходя-

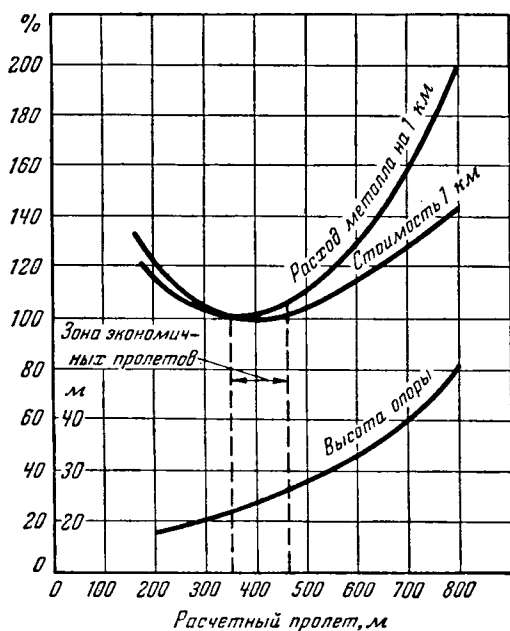


Рис. 7. Оптимальные величины расчетного пролета между опорами линии 400 кВ и высоты промежуточной опоры.

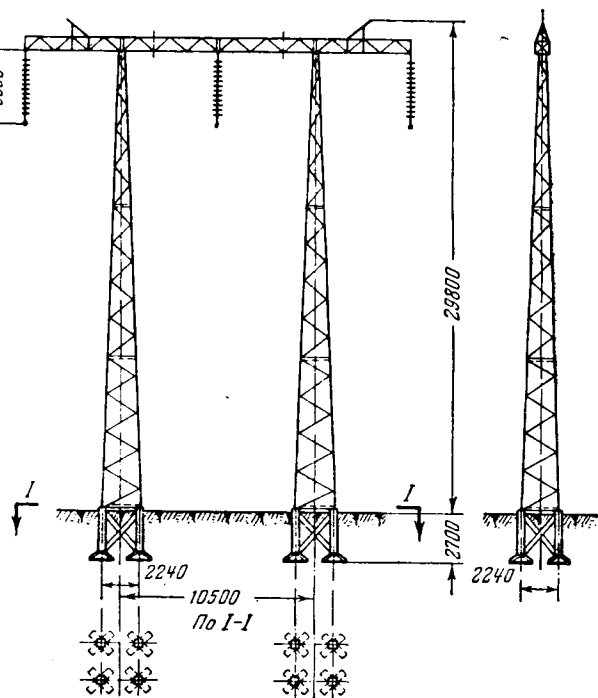


Рис. 8. Промежуточная опора линии 400 кВ.

щих в более суровых климатических условиях, будут состоять из 22 изоляторов типа ПЦ-8,5, имеющих те же размеры при испытательной нагрузке 8,5 т. Натяжная гирлянда анкерных и угловых опор будет скомплектована из трех параллельных ветвей. В каждой из ветвей будет 22 изолятора типа ПЦ-11. Размеры этих изоляторов 210×350 мм, испытательная нагрузка 11 т. Со стороны линейного провода гирлянды имеют защитные экраны.

Грозозащита линии обеспечивается высокими значениями импульсной прочности линейной изоляции, подвеской на каждой цепи двух тросовых молниеотводов с защитным углом 15...20°, сопротивлением заземления каждой опоры, равным не более 10 ом.

Для опор линии электропередачи применены металлические сварные конструкции из марганцевой стали марки Ст. 3.

В связи с тем, что по линии 400 кВ будут передаваться большие мощности и она будет тяжело нагружена в механическом отношении, были проведены подробные исследования с целью определения оптимальной высоты опоры, ее наилучшей конструкции и расчетного пролета. На рис. 7 приведены кривые, характеризующие выбор оптимальных значений расчетного пролета и высоты промежуточной опоры.

Приняты промежуточные опоры portalного типа (рис. 8), обладающие наилучшими показателями по расходу металла, удобству монтажа и обслуживания, по транспортным расходам и весу фундаментов. Вес промежуточной опоры 7,25 т, высота точки подвеса гирлянды изоляторов 27 м, полная высота 29,8 м. Расположение проводов — горизонтальное. Расчетный пролет между промежуточными опорами 425...460 м.

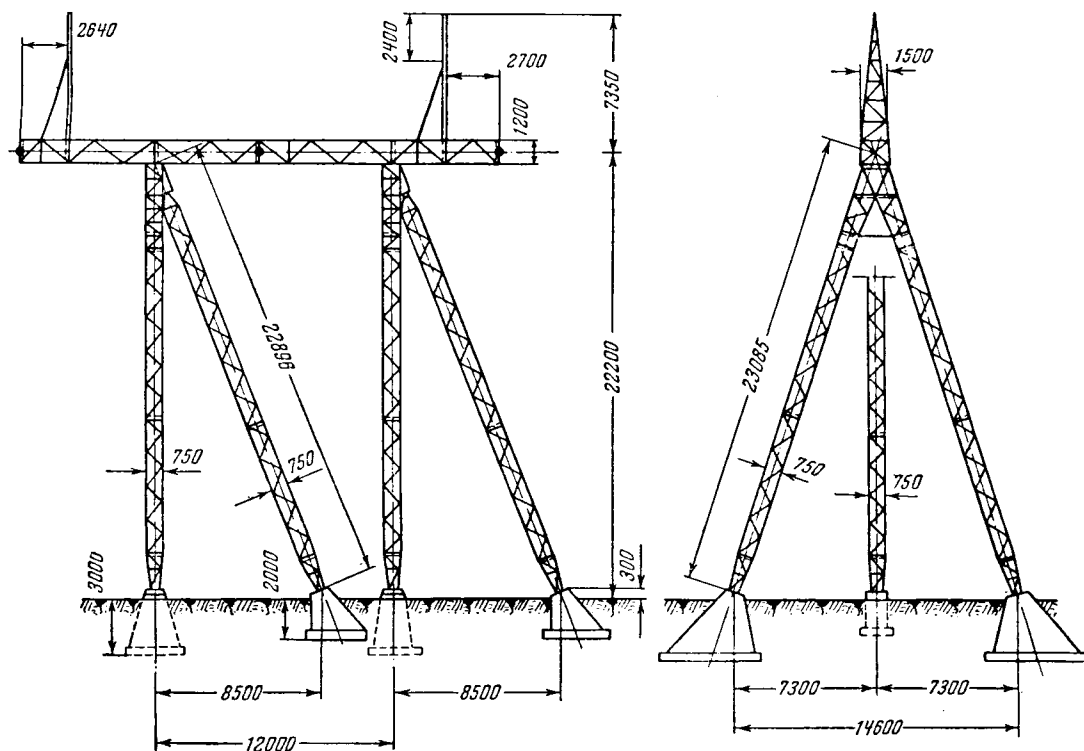


Рис. 9. Угловая опора линии 400 кв.

Анкерные и угловые опоры — стержневой конструкции (рис. 9). Высота подвеса гирлянд 22,2 м, полная высота опоры 29,6 м, расположение проводов — горизонтальное, расстояние между соседними проводами 12 м. Веса анкерных и угловых опор различных типов приведены в таблице.

Типы опор	Число подкосов	Вес, т
Анкерная и угловая 0...15° . . .	1	13,1
Угловая 15...30°	2	16,5
Угловая 30...45°	2	16,6
Угловая 45...60°	2	17,8

Фундаменты промежуточных опор в нормальных грунтах — сборные железобетонные. Фундаменты анкерных и угловых опор из монолитного бетона.

Для сооружения двух цепей линии электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва потребуется выполнить следующие объемы строительно-монтажных работ:

Земляные работы	700 тыс. м ³
Бетонные работы	200 тыс. м ³
Монтаж металлоконструкций	45 тыс. т
Монтаж проводов и тросов	35 тыс. т

Приемные подстанции 400/115/220 кв. Для приема энергии Куйбышевской и Сталинградской гидроэлектростанций в районе Москвы будет построено несколько приемных понизительных подстанций. Характеристики Московской энергосистемы позволили исключить трансформацию

400/220 кв, как неэкономичную и вызывающую дополнительные потери энергии. Принимаемая энергия будет трансформироваться на напряжение 115 кв и на этом же напряжении распределяться. Для регулирующей и резервирующей связи с сетью Московской энергосистемы на приемных подстанциях помимо трансформаторов 400/115 кв будут установлены трансформаторы 220/115 кв.

На приемных подстанциях будут установлены также мощные синхронные компенсаторы с водородным охлаждением. Несмотря на суровые условия климата центра Европейской части Советского Союза, их решено установить на открытом воздухе. Трансформаторные группы 400 и 220 кв будут иметь вольтодобавочные трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой.

Распределительные устройства всех напряжений запроектированы открытыми с гибкой ошиновкой. Ширина ячейки распределительного устройства 400 кв равна 25 м, высота линейных порталов — 28 м и шинных порталов — 16,5 м.

Оборудование для электропередачи 400 кв. Проекты оборудования разработаны конструкторскими бюро электропромышленности на основании технических заданий, определивших при составлении эскизных проектов электропередачи. При составлении проектов были широко использованы научно-исследовательские работы. Опытные экземпляры оборудования уже построены и успешно проходят испытания в научно-исследовательских институтах и на заводах.

Мощность повышающих трансформаторов 370 тыс. кВА в трехфазной группе, напряжение 13,8/420 или 13,8/121/420 кв, схема соединений обмоток треугольник — звезда — звезда, нулевая

точка обмотки 420 кВ заземлена наглухо или через малоомное сопротивление, охлаждение повышающих трансформаторов — водяное с принудительной циркуляцией масла.

Мощность понижающих трансформаторов 300 тыс. кВа в трехфазной группе, напряжение 410/115/11 кВ, схема соединений обмоток звезда — звезда — треугольник, нулевая точка обмотки 410 кВ заземлена наглухо, охлаждение — воздушное.

Тип выключателя 400 кВ — воздушный, его номинальный ток 2 000 и 1 000 А, разрывная мощность 10 млн. кВа, время выключения — 3 периода. Разрабатываются также другие варианты выключателей 400 кВ.

Тип разъединителя 400 кВ — рубящий, его номинальный ток 2 000 и 1 500 А. В качестве привода будет применен электродвигатель переменного тока.

Тип трансформатора напряжения 400 кВ — каскадный, коэффициент трансформации

$$\frac{420\,000}{\sqrt{3}} : \frac{100}{\sqrt{3}} : 100.$$

Мощность трансформатора класса 0,5 составляет 300 вА.

Тип трансформатора тока — петлевой, коэффициент трансформации 2 000—1 000—400/1.

Вентильные разрядники 400 кВ будут иметь опорное и подвесное исполнение.

Тип конденсатора связи опорный.

Статические конденсаторы для продольной емкостной компенсации будут установлены на открытом воздухе, изолированно от потенциала земли на 420 / $\sqrt{3}$ кВ.

Напряжение синхронных компенсаторов 11 кВ, мощность 75 000 кВа, скорость вращения 600 об/мин, охлаждение — водородное.

Работы по осуществлению проекта передачи. При составлении проектов электропередач Куйбышевская ГЭС — Москва и Сталинградская ГЭС —

Москва научно-исследовательскими и проектными организациями Советского Союза разработан ряд комплексных проблем, к числу которых относятся: вопросы режимов и регулирования дальней передачи; повышение устойчивости параллельной работы; вопросы изоляции; вопросы короны; вопросы внутренних и атмосферных перенапряжений; особенности релейной защиты, связи, телемеханики и автоматики; механическая часть линий электропередачи 400 кВ; вопросы диспетчерского управления мощными объединенными энергетическими системами; влияние линий 400 кВ на установки связи и т. д.

Созданы лабораторные установки с опытными участками линий 400...500 кВ для экспериментального изучения короны переменного тока, радиопомех, влияния на установки связи, вибраций проводов, а также для исследования опор и фундаментов линий 400 кВ. Для изучения явлений гололеда на расщепленных проводах создан высокогорный участок линии 400 кВ. Построено несколько опытных установок продольной емкостной компенсации. Разрешив основные вопросы, связанные с передачей 1 000 тыс. кВт на расстояние 1 000 км, научно-исследовательские организации разрабатывают дальнейшие проблемы, связанные с уточнением ряда деталей, и занимаются подготовкой эксплуатации систем 400 кВ.

Электропромышленность Советского Союза, закончив выполнение опытных образцов нового оборудования и их испытание, приступила к выпуску этого оборудования.

Строительные организации с 1952 г. приступили к сооружению двухцепной линии электропередачи Куйбышевская ГЭС — Москва, понизительных подстанций и переключательных пунктов.

Перед советскими энергетиками и электромашиностроителями поставлена почетная задача — создать самые мощные и самые протяженные в мире линии электропередачи в сроки, установленные правительством. Можно выразить полную уверенность в том, что эта задача ими будет выполнена с честью.



Электропривод от асинхронного двигателя с колебательными контурами в роторе

Инж. А. А. СИРОТИН

Московский энергетический институт им. Молотова

Вывод основных соотношений для рассматриваемой системы регулирования скорости асинхронных двигателей значительно упрощается, если учесть, что магнитный поток на рабочей части резонансной механической характеристики остается приблизительно равным потоку электродвигателя при холостом ходе в нормальной схеме соединения. Это явление можно объяснить, проследив за изменениями роторного тока, например по круговой диаграмме, от малых величин до резонанса при постепенном возрастании нагрузки на валу двигателя.

При этом сначала сокращается индуктивная составляющая первичного тока, что свидетельствует о поддержании магнитного потока машины за счет ротора. Затем она превращается в ноль, и начинает нарастать емкостная составляющая. Соответственно при постепенном нарастании нагрузки на валу магнитный поток машины сначала несколько возрастает и превышает поток холостого хода нормальной схемы, а потом, при приближении к полному резонансу, начинает постепенно падать и еще больше снижается на нерабочей (нижней) ветви резонансной механической характеристики.

Выполненные расчеты и опытные данные позволяют утверждать, что магнитный поток в малых двигателях на рабочей части резонансной механической характеристики изменяется только на 5...7% при условии, что ток не превышает своего номинального значения больше чем в 2...3 раза.

При полном резонансе и на нерабочей части механической характеристики отклонения магнит-

Современное производство нуждается в электроприводах, обеспечивающих регулирование скорости в больших диапазонах (до 200 и выше). В последнее время предложен ряд новых схем, расширяющих диапазон регулирования скорости асинхронных двигателей, и, в частности, схема с последовательными колебательными контурами в роторе. Приводятся результаты исследования работы такого привода, проведенного в лаборатории электрооборудования промпредприятий Московского энергетического института

ного потока от потока холостого хода могут достигать 15%.

Допущение постоянства магнитного потока позволяет свести рассмотрение явлений, происходящих в двигателе, к анализу упрощенной электрической схемы ротора

(рис. 1). Естественно, что здесь статор двигателя из рассмотрения исключен и действующая в роторе э. д. с. считается пропорциональной паспортному значению э. д. с. электродвигателя при неподвижном разомкнутом роторе $E_{2\kappa.3}$ и скольжению s .

Токи, напряжения на конденсаторах и дросселях, мощность и момент на валу достаточно просто выражаются через скольжение и параметры системы:

$$I_2 = \frac{E_{2\kappa.3}s}{\sqrt{R_2^2 + \left(\omega_1 s L - \frac{1}{\omega_1 s C}\right)^2}} [a]; \quad (1)$$

$$U_c = \frac{E_{2\kappa.3}}{\omega_1 C \sqrt{R_2^2 + \left(\omega_1 s L - \frac{1}{\omega_1 s C}\right)^2}} [b]; \quad (2)$$

$$U_L = \frac{E_{2\kappa.3}s \sqrt{R_{op}^2 + \omega_1^2 L_{op}^2 s^2}}{\sqrt{R_2^2 + \left(\omega_1 s L - \frac{1}{\omega_1 s C}\right)^2}} [b]; \quad (3)$$

$$P_s = \frac{3E_{2\kappa.3}^2 R_2 (s-s^3) 10^{-3}}{R_2^2 + \left(\omega_1 s L - \frac{1}{\omega_1 s C}\right)^2} [\kappa \text{ вт}]; \quad (4)$$

$$M_s = \frac{2,92 I_2^2 R_2}{n_c s} = \frac{2,92 E_{2\kappa.3}^2 R_2 s}{n_c \left[R_2^2 + \left(\omega_1 s L - \frac{1}{\omega_1 s C}\right)^2 \right]} [\kappa \text{ з.м}]; \quad (5)$$

$$M_p \approx \frac{2,92 E_{2\kappa.3}^2 s_p}{n_c R_2} [\kappa \text{ з.м}], \quad (6)$$

здесь I_2 — ток роторной цепи;
 R_2 — полное активное сопротивление фазы роторной цепи, включая сопротивление машины и колебательного контура;

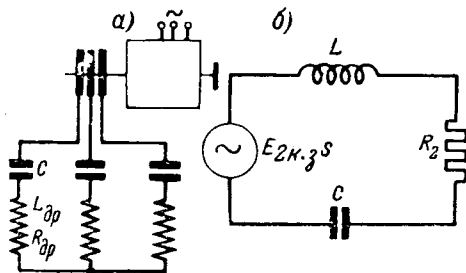


Рис. 1.

L и C — индуктивность и емкость колебательного контура;

ω_1 — угловая частота сети;

U_c и U_L — фазные напряжения на емкости и индуктивности;

P_g и M_g — мощность и момент на валу двигателя;

s_p и M_p — резонансные скольжение и момент на валу двигателя.

Изменяя в этих уравнениях L , C и R_2 , можно получить сколь угодно большое количество семейств механических характеристик. На рис. 2 показаны семейства механических характеристик, полученные расчетом при следующих условиях:

$$\left. \begin{aligned} \text{а) } L &= \text{пост}, C = \text{пер}, R_2 = \text{пост}, \\ M_p &= s_p, \beta_0 \equiv s_p; \\ \text{б) } L &= \text{пост}, C \equiv \frac{1}{R_2^2}, M_p = \text{пост}, \\ \beta_0 &\equiv \frac{1}{s_p}; \\ \text{в) } L &= \text{пост}, C = \frac{1}{R_2}, U_{cp} = \text{пост}, \\ \beta_0 &\equiv \frac{1}{s_p^3}; \\ \text{г) } L &= \text{пер}, C = \text{пост}, R_2 = \text{пост}, \\ M_p &= s_p, \beta_0 \equiv \frac{1}{s_p}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\beta_0 = \frac{M_p - 0,5 M_p}{(s_p - s_1) M_H} \quad (8)$$

— относительная жесткость механических характеристик;

M_H — номинальный момент двигателя;

s_1 — скольжение, соответствующее моменту $M_1 = 0,5 M_p$.

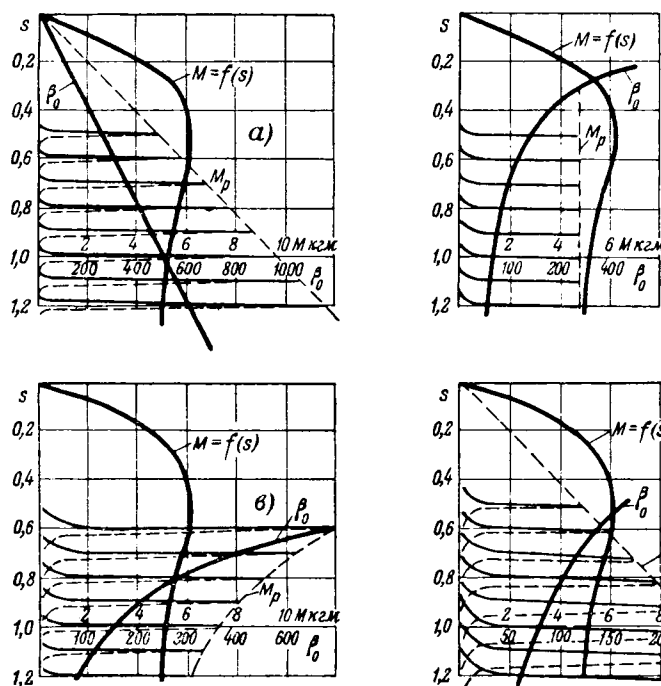


Рис. 2.

Условия (7) показывают, в частности, что простым регулированием емкости можно обеспечить весьма ценное семейство механических характеристик (рис 2,а). Если же пойти по пути регулирования емкости одновременно с активным сопротивлением, то можно получить семейство б (рис. 2) с постоянным критическим моментом, семейство в — с постоянным максимальным напряжением на емкостях, а также и ряд других семейств. Изменение зазоров дросселей приводит к семейству г, в котором вместе с увеличением скольжения резонансная механическая характеристика делается значительно менее заостренной.

Относительная жесткость механических характеристик зависит от L и R_2 и не зависит от емкости. Эту зависимость наиболее просто можно вывести, воспользовавшись применяемым в радиотехнике понятием ширины полосы пропускания одиночного колебательного контура, которая равна:

$$F_a = \frac{50 R_2}{\omega_1 L}. \quad (9)$$

Как известно, полоса пропускания дает ширину резонансной токовой кривой при токе, равном $0,707 I_p$. Переходя к моменту через уравнение (5), получим ширину резонансной механической характеристики при моменте, равном $(0,707)^2 M_p = 0,5 M_p$. Для определения жесткости характеристики записываем котангенс острого угла прямоугольного треугольника, катетами которого являются половина определенной выше ширины кривой и $0,5 M_p$. Опуская промежуточные преобразования, получаем относительную жесткость резонансной механической характеристики в следующем виде:

$$\beta_0 = -k \frac{\omega_1 s_p L \left(2 - \frac{s_p}{s_p - R_2/2\omega_1 L} \right)}{R_2^2}, \quad (10)$$

где

$$k = \frac{2,92 E_{2\kappa.s}^2}{n_c M_H}.$$

Если учесть, что $R_2/2\omega_1 L$ обычно мало, то приближенное значение относительной жесткости механической характеристики получит вид:

$$\beta_0 \approx -k \frac{\omega_1 s_p L}{R_2^2}. \quad (11)$$

Введенное здесь понятие относительной жесткости механической характеристики представляет собой котангенс угла наклона прямой, проведенной через точку резонансной кривой момента, где момент равен $0,5 M_p$, и через вершину резонансной кривой. Введение этого понятия представляется полезным, так как наиболее целесообразна работа производственных механизмов в средней части кривой или даже ближе к ее вершине, следовательно, как раз в тех местах, где наклон прямой

близок к наклону механической характеристики. Уравнения (10) и (11) показывают, что жесткость механических характеристик двигателей с колебательными контурами в роторе прямо пропорциональна индуктивности и обратно пропорциональна квадрату активного сопротивления. Согласно уравнению (10) были построены кривые жесткости для рис. 2.

Одной из величин, принимаемых за исходную при выборе параметров рассматриваемого привода, является скольжение s_p , соответствующее максимуму тока. Зависимость s_p от параметров колебательных контуров может быть получена обычным методом определения положения максимума тока из выражения (1):

$$s_p = \frac{1}{\omega_1 \sqrt{LC - 0,5C^2 R_2^2}} \approx \frac{1}{\omega_1 \sqrt{LC}}. \quad (12)$$

Аналогичное условие может быть получено при определении положения максимума вращающего момента из уравнения (5). Уравнение (12) показывает, что существует бесконечное множество пар значений L и C , которые обеспечат одинаковые значения максимального тока при неизменных s_p и R_2 .

Оптимальные значения L и C соответствуют минимуму веса вспомогательных устройств.

Автором были получены следующие приближенные выражения:

$$C_{мин} \approx \frac{1}{\omega_1 s_p} \sqrt{\frac{a}{b}}, \quad (13)$$

$$L_{мин} \approx \frac{1}{\omega_1 s_p} \sqrt{\frac{b}{a}}, \quad (14)$$

где a, b — удельные веса индуктивностей и емкостей. При обычных сталях $a = 300...800 \text{ кг/гн}$; конденсаторы можно подобрать с $b = 20\,000...40\,000 \text{ кг/ф}$.

Для снижения тока дросселя и повышения пускового момента двигателя колебательные контуры следует шунтировать.

Эквивалентная схема и векторная диаграмма фазы роторной цепи для этого случая показаны на рис. 3.

Сопротивление шунта можно определить, если принять, что в первом приближении механическая характеристика при шунтировании колебательных контуров получается в результате наложения характеристики без шунтирования на характеристику электродвигателя при наличии только шунтов в роторе. Если при наличии только шунтов характеристика проходит через точку с координатами s_p и $(0,5...0,6) M_{мин}$, то естественно, что сопротивление шунта согласно общей теории реостатного регулирования запишется так:

$$R_{ш} = \frac{s_p R_n M_n}{(0,5...0,6) M_{мин}} - R_{рот}, \quad (15)$$

здесь R_n и M_n — номинальные значения сопротивления и момента данного двигателя;

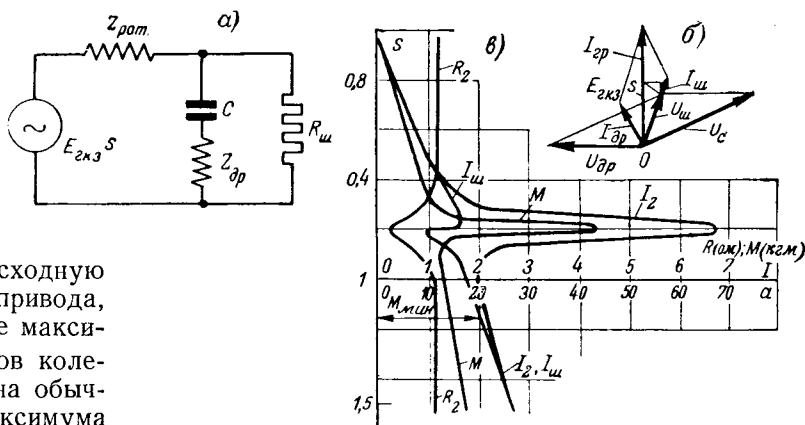


Рис. 3.

$M_{мин}$ — минимальный статический момент на валу двигателя (рис. 3);
 $R_{рот}$ — активное сопротивление фазы ротора двигателя.

Коэффициент $(0,5...0,6)$ введен после ряда выполненных расчетов. Он гарантирует работу двигателя на жесткой части механической характеристики даже при минимальном статическом моменте.

Токи в роторе двигателя i_2 , в дросселе $i_{др}$ и в шунте $i_{ш}$, очевидно, определяются из трех уравнений (рис. 3):

$$i_2 = i_{ш} + i_{др}; \quad i_{ш} R_{ш} = i_{др} Z; \quad E_{2кз} S = i_2 Z_{рот} + i_{ш} R_{ш}. \quad (16)$$

В уравнениях Z и $Z_{рот}$ — полные сопротивления ветви дроссель — емкость и роторной обмотки.

Расчетные кривые токов ротора и шунта, общего активного сопротивления R_2 и механическая характеристика двигателя мощностью $2,5 \text{ кВт}$ при шунтировании также показаны на рис. 3. Естественно, что при желании выбрать параметры контуров, исходя из минимального веса вспомогательных устройств, необходимо учитывать и вес шунтов.

Расчеты и эксперименты, проведенные в лаборатории электрооборудования промпредприятий МЭИ, показывают, что если минимальное скольжение составляет $s_p = 0,4...0,5$, то вес вспомогательных устройств системы с последовательными колебательными контурами не превышает трехкратного веса двигателя. Следовательно, вполне возможно осуществить регулирование в двигательном режиме до скорости 1800 об/мин и в тормозном режиме до скорости, безопасной для двигателя по соображениям механической прочности обмотки ротора. Общий вес установки при этом будет примерно равен весу машин системы «генератор — двигатель».

Какой же диапазон регулирования может обеспечить электропривод с колебательными контурами, параметры которых выбраны по условию минимума веса? Если, например, задаться допустимыми колебаниями скорости $\Delta n = 5 \text{ об/мин}$

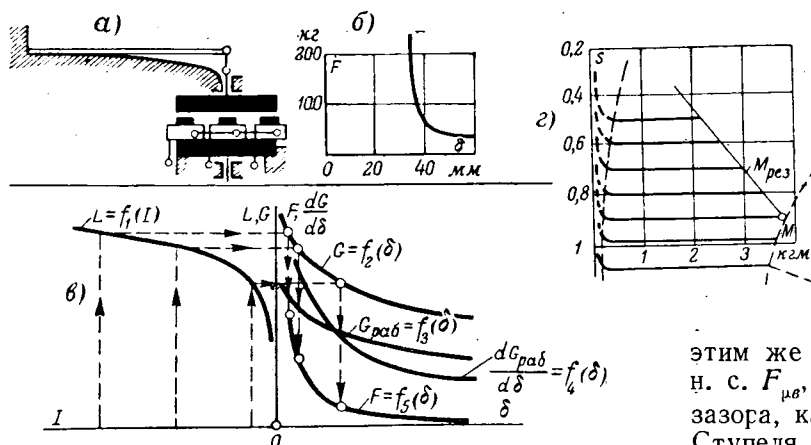


Рис. 4.

при колебаниях момента на валу $\Delta M = 0,5 M_n$ и синхронной скорости $n = 1000$ об/мин, то получается диапазон регулирования 120, а минимально допустимая жесткость механических характеристик, обеспечивающая этот диапазон, $\beta_0 = 100$. Такую жесткость и диапазон регулирования затруднительно получить от рассматриваемого привода без увеличения мощности двигателя или индуктивности контуров, т. е. без увеличения веса и размеров установки (см. кривые жесткости на рис. 2).

Для решения этого вопроса удалось найти простой и надежный способ автоматического поддержания жесткости механических характеристик на очень высоком уровне, который сводится к тому, чтобы с изменением тока автоматически изменять индуктивность таким образом, чтобы скольжение оставалось постоянным или менялось мало в заданных пределах колебаний тока. Индуктивность и ток связывает уравнение (1), из которого:

$$L = \frac{1}{\omega_1^2 s^2 C} - \frac{1}{\omega_1 s} \sqrt{\frac{E_{2\kappa,3}^2 s^4}{T_2^2} - R_2^2}. \quad (17)$$

Зависимость индуктивности по (17) подобна кривой намагничивания и может быть осуществлена при помощи дросселей насыщения. Однако этот способ уступает по простоте и весовым данным решению, предусматривающему изменение воздушного зазора дросселей. На рис. 4 показан принципиальный чертеж дросселя, подвижная часть которого подвешена на пружине, изменяющей жесткость одновременно с током и позволяющей практически осуществить зависимость индуктивности от тока по (17). Здесь же показан метод графоаналитического определения кривой силы притяжения ярма дросселя в зависимости от воздушного зазора. Этот метод иллюстрируется результатами конкретного расчета, выполненного для двигателя мощностью 2,5 кВт (кривые б и г рис. 4), и состоит в следующем.

В левом квадранте строится зависимость $L = f_1(I_2)$, которую должен выполнять дроссель, а в правом квадранте кривые $G = f_2(\delta)$ и $G_{раб} = f_3(\delta)$.

Эти кривые дают полную магнитную проводимость G и проводимость рабочего зазора

фазы дросселя $G_{раб}$ в зависимости от величины воздушного зазора. Следующим шагом является графическое дифференцирование кривой $G_{раб} = f_3(\delta)$ и построение в правом квадранте кривой $\frac{dG_{раб}}{d\delta} = f_4(\delta)$. Затем следует задаваться значениями I_2 и, пользуясь пунктирными линиями, определять соответствующие значения $\frac{dG_{раб}}{d\delta}$. По

этим же значениям тока необходимо определять н. с. $F_{\mu\delta}$, идущую на преодоление воздушного зазора, как это рекомендуется, например, в книге Ступеля „Расчет и конструирование электромагнитных реле“. Последним этапом является получение точек кривой силы притяжения дросселя, например, по известной из курса электроаппаратостроения аналитической зависимости:

$$F = f_5(\delta) = 5,1 \cdot 10^{-8} F_{\mu\delta}^2 \frac{dG_{раб}}{d\delta}. \quad (18)$$

Имея кривую силы притяжения дросселя и спрямив ее на отдельных участках, можно для каждого участка провести расчет пружины как балки с заделкой, обкатывающейся по упору нужной формы. Такая пружина увеличивает свою жесткость с уменьшением воздушного зазора дросселей, что и необходимо для данного случая. Кривая силы притяжения дросселей и контур упора для пружины макетной установки лаборатории ЭПП МЭИ показаны на рис. 4.

При автоматическом поддержании высокой жесткости семейство механических характеристик получает вид, показанный на том же рисунке (кривая 2). Это семейство ограничивается двумя пунктирными кривыми и кривой резонансных моментов. Пунктирные кривые получаются из уравнения (5), в которое подставляются значения тока, ограничивающие участок постоянной скорости. Тесретиические расчеты и эксперименты показывают, что если правильно спроектировать дроссель для обеспечения постоянной скорости на одной механической характеристике, то, изменяя емкость, можно получить довольно точное поддержание постоянства скорости и на других характеристиках в пределах, ограниченных пунктирными кривыми. Заметим, что автоматическое регулирование индуктивности можно одновременно использовать для создания необходимого пускового момента. Это положение станет очевидным, если напомнить о том, что пружина раздвинет зазоры к моменту пуска, и при правильном расчете пуск начнется с моментом, большим статического.

Переходные процессы в рассматриваемом приводе описываются следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 + \frac{1}{C} \int i_1 dt &= \sqrt{2} E_{2\kappa,3} s \sin \omega_1 s t; \\ M_{\delta\delta} - M_{cm} &= -J\omega_1 \frac{ds}{dt}; m \frac{d^2\delta_0}{dt^2} + r \frac{d\delta_0}{dt} + s\delta_0 = F, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где i_1 — ток одной из фаз ротора;

δ_o — перемещение подвижных частей дросселя, отсчитанное от линии ненапряженной пружины.

Получить точное аналитическое решение такой системы не удается и поэтому можно рекомендовать частные, упрощенные решения для наиболее часто встречающихся переходных процессов.

Процесс включения двигателя при постоянной скорости вращения и неизменной индуктивности $L = \text{const}$. В этом случае

$$i = E_{2m} \dot{A} (\sin \omega_1 s t + j \cos \omega_1 s t) + E_{2m} e^{-bt} \times \\ \times [(\dot{B} + \dot{C}) \cos \omega_o t + (\dot{B} - \dot{C}) j \sin \omega_o t]. \quad (20)$$

В этом выражении ω_o — частота собственных колебаний контура и b — коэффициент затухания свободной слагающей тока. Значения комплексных коэффициентов уравнения выписаны ниже:

$$\dot{A} = \frac{\omega_1 s}{-b^2 - \omega_1^2 s^2 + \omega_o^2 - 2jb\omega_o},$$

$$\dot{B} = \frac{b^2 + \omega_1^2 s \omega_o + \omega_o^2 - jb\omega_o}{-b^2 - \omega_1^2 s^2 + \omega_o^2 - 2jb\omega_o}$$

и

$$\dot{C} = \frac{-b^2 + \omega_1 s \omega_o - \omega_o^2 - jb\omega_1 s}{-b^2 - \omega_1^2 s^2 + \omega_o^2 - 2jb\omega_o}.$$

Этот переходный процесс легко наблюдать. Он имеет место особенно при значительных моментах инерции и статического сопротивления на валу двигателя, когда небольшими изменениями скорости за время процесса можно пренебречь. Он характерен возникновением биений, получающихся в результате наложения принужденной слагающей тока на свободную:

$$i = i_{np} + i_{cs} = I_m \sin \omega_1 s t - I_m e^{-bt} \sin \omega_o t.$$

Преобразуем это выражение, пренебрегая затуханием:

$$i = 2I_m \cos \left[\frac{\omega_1 s + \omega_o}{2} t \right] \sin \left[\frac{\omega_1 s - \omega_o}{2} t \right]. \quad (21)$$

Частота колебаний огибающей биений низкая. С этой частотой колеблется и пусковой момент двигателя. При достижении резонанса биения исчезают. Максимально возможный ток стремится к двухкратной величине от тока принужденной слагающей, что делает необходимым при расчете установки проверять пусковые напряжения на дросселях и конденсаторах. На рис. 5 приведен пример графического построения кривой пускового тока по формуле (20).

Процесс включения двигателя с учетом изменений скорости при $L = \text{const}$. В этом случае можно применять графоаналитический метод. Сначала строят кривую $s = f(t)$ способом пропорций, определяя для каждого значения времени момент по (5). Затем ведут расчет тока по уравнению (20), в которое для каждого момента времени нужно подставлять скольжение из кривой $s = f(t)$.

Процессы в двигателе при мгновенных изменениях статического момента или емкости ($L = \text{const}$). Считая рабочую часть резонансной характеристики прямолинейной, легко получить выражение аperiодического процесса:

$$n = n_{уст} + n_{нач} e^{-\frac{M_n \beta}{J \omega_1} t}. \quad (22)$$

Процессы двигателя, работающего с автоматически регулируемые дросселями. Если пренебречь электромагнитной инерцией, то задача расчета сводится к решению систем из двух дифференциальных уравнений, содержащих s и δ_o . Расчет легко проводится графоаналитическим способом. Задаваясь малыми промежутками времени $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ и т. д., можно считать, что за время Δt_1 меняется только s в уравнении движения, а ток и зазор дросселя не изменены. На границе между Δt_1 и Δt_2 ток меняется скачкообразно от I_1 до нового значения I_2 , полученного из уравнения (1). На втором участке происходит изменение уже двух параметров (зазора и скольжения) и должны совместно решаться два дифференциальных уравнения (проще всего это решение получается подбором). На границе между Δt_2 и Δt_3 происходит новое изменение тока от I_2 до I_3 и повторяется построение кривой зазора и скольжения для участка Δt_3 и т. д.

Анализ переходных процессов показывает, что удовлетворительное качество переходных процессов может быть получено даже при работе дросселей с автоматическим изменением индуктивности. Затухание механических колебаний дросселей может быть увеличено до нужных значений за счет установки простейшего масляного или воздушного демпфера, который при необходимости сведет колебательные процессы к аperiодическим.

Коэффициент полезного действия с учетом потерь в статоре, очевидно, запишется просто:

$$\eta = \frac{3I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s} 100}{3I_2^2 R_2 s + 3I_1^2 R_1 + \Delta P_{cm}}; \quad (23)$$

здесь $3I_1^2 R_1$ — потери в меди статора и ΔP_{cm} — потери в стали от неизменного вращающегося магнитного потока.

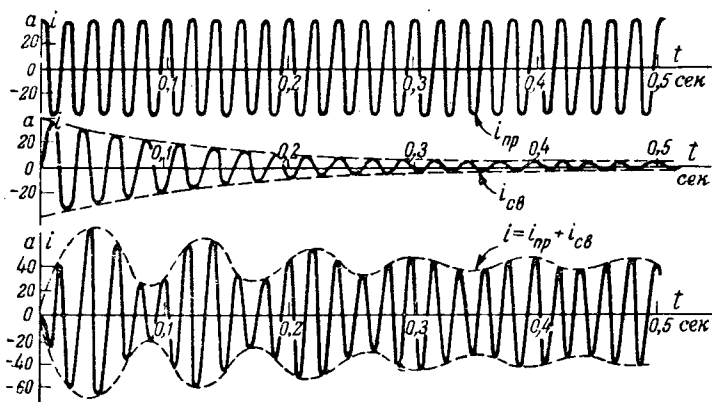


Рис. 5.

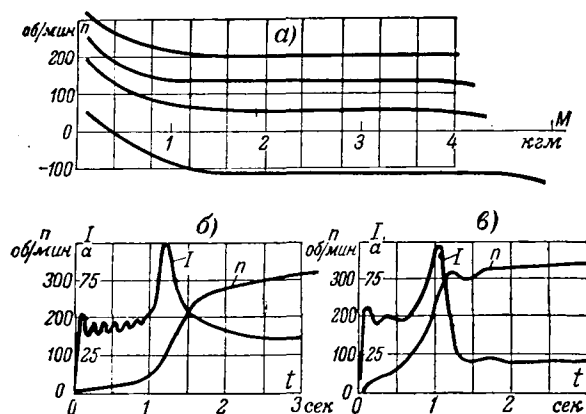


Рис. 6.

Формулу (23) можно использовать для подсчета к. п. д. при длительной работе на заданной резонансной характеристике с заданным током I_2 в роторе. Более целесообразно оценивать рассматриваемый привод, пользуясь понятием к. п. д. цикла, в котором работает механизм с рассматриваемым приводом.

Коэффициент полезного действия цикла в общем виде:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{\sum_{k=1}^n P_{\text{ек}} t_k}{\sum_{k=1}^m P_{1k} t_k} \quad (24)$$

Здесь $P_{\text{ек}}$ и t_k — мощность, отдаваемая с вала двигателя и время работы на k -том участке; P_{1k} — мощность, забираемая двигателем из сети на k -том участке.

Числитель и знаменатель (24) записаны в виде сумм, так как в общем случае рассматривается

многоучастковый график нагрузки, предполагающий отдачу энергии с вала двигателя на n участках и потребление энергии двигателем на m участках. Очевидно, что при расчете по (24) к. п. д. двигателя может получиться высоким даже при работе на отдельных участках цикла со скольжениями, близкими к единице.

В лаборатории ЭПИ МЭИ проведены расчеты и эксперименты, которые полностью подтвердили изложенную выше упрощенную теорию. На рис. 6 показаны статические механические характеристики двигателя макетной установки мощностью 2,5 кВт с синхронной скоростью 1000 об/мин при автоматическом регулировании дросселей в незашунтированных контурах. Там же показаны построенные по осциллограммам кривые пуска двигателя макетной установки при различном демпфировании (б и в). В лаборатории получен диапазон регулирования 50 при колебаниях момента в пределах (0,5 ... 1,5) M_n . Устойчивая минимальная скорость была равна 20 об/мин, колебания скорости не превышали 5 об/мин. Однако это не является пределом.

Для суждения об области применения исследованной системы электропривода нами, проделаны расчеты: а) для резьбонарезного станка; б) для привода подачи 12-шпиндельного расточного агрегатного станка; в) для привода лифта; г) для привода подачи фрезерного станка.

Полученные из расчетов данные сведены в таблицу. Они свидетельствуют о том, что во всех рассмотренных случаях применения асинхронного двигателя с колебательными контурами в роторе эта система электропривода значительно выигрывает перед специальной системой «генератор — двигатель», по установленной мощности электрических машин, по общему весу, простоте выполнения, наладки и эксплуатации. По к. п. д. цикла получаются

Сравнительные данные различных систем электропривода

Наименование механизма	Система электропривода	Установленная мощность, кВт	Вес, кг	Жесткость характеристики, β_0	Диапазон регулирования	Коэффициент полезного действия цикла, %	Примечание
Резьбонарезной станок	Асинхронный двигатель	5,3	325	85	4	20,9	Коэффициент полезного действия цикла подсчитан для $s=0,8$. При $s=0,725$ к. п. д. этих систем привода одинаков
	„Система г—д“	22,6	474	85	4	25,1	
12-шпиндельный расточный агрегатный станок	Асинхронный двигатель	1	75	40	40	34	Двигатель работает 12 сек на низкой скорости и 5 сек при ускоренном подводе и отводе головки
	„Система г—д“	3,25	187	40	40	56	
Лифт с точным остановом	Асинхронный двигатель	10	225	50	25	73	Двигатель на короткое время переходит в режим низкой скорости
	„Система г—д“	35	718	50	25	57	

Фрезерный станок типа 6Б82

Если заменить механическую коробку подач асинхронным двигателем, то отпадает необходимость в 20 зубчатых колесах и 7 подшипниках.

весьма разнообразные данные, позволяющие сделать вывод о том, что этот показатель нужно просчитывать для каждого отдельного случая.

Можно утверждать, что система с асинхронным двигателем будет лучше специальной системы „генератор — двигатель“ во всех случаях, где требуется точный останов рабочего механизма с кратковременной работой в режиме низкой скорости. Примером такого механизма является рассмотренный нами лифт. Такой же вывод можно сделать для приводов подач, а в отдельных случаях и для главного движения, агрегатных, шлифовальных, фрезерных и других станков.

Приводы эти имеют малую мощность. Поэтому даже в тех случаях, когда к. п. д. цикла у асин-

хронного двигателя ниже, чем у специальной системы „генератор — двигатель“, можно не считаться с незначительным увеличением потерь электрической энергии и отдать предпочтение более простой системе с асинхронным двигателем. Заметим, что электропривод с асинхронным двигателем с колебательными контурами в роторе также упрощает кинематическую схему станков и других механизмов.

Таким образом, в результате проведенного исследования можно считать доказанной практическую возможность осуществления широкого и плавного регулирования асинхронных двигателей при помощи колебательных контуров, включенных в ротор.

[12. 12. 1951]



Самовозбуждающаяся муфта с коллектором

Кандидат техн. наук доц. Е. К. МЕЗИН

Ленинград

Устройство. Электромагнитная муфта служит для передачи вращающего момента от ведущей части вала к ведомой. По устройству (рис. 1) муфта представляет собой машину постоянного тока с последовательным возбуждением. Полусная система муфты находится на одной части вала, якорь — на другой. Щеточная траверза жестко скреплена с той частью муфты, на которой находится полусная система. Вращающий момент от одной части муфты к другой передается посредством магнитного потока. Муфта передает вращающий момент только при замкнутой цепи якоря.

Скольжение муфты. Скольжение муфты

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (1)$$

где n_1 , n_2 — скорости вращения ведущей и ведомой частей вала.

Для токовой цепи муфты справедливо уравнение

$$E - U = I(R_a + R_c), \quad (2)$$

где E — э. д. с. якоря;

$U = IR$ — напряжение на зажимах внешнего сопротивления R ;

R_a , R_c — сопротивление обмотки якоря и обмотки возбуждения.

Электродвижущая сила якоря муфты пропорциональна относительной скорости вращения двух частей муфты

$$E = \frac{p}{a} 10^{-8} (n_1 - n_2) \Phi = c (n_1 - n_2) \Phi. \quad (3)$$

Рассматривается самовозбуждающаяся электромагнитная муфта с последовательным возбуждением. Доказывается основное свойство муфты в ненасыщенном состоянии — способность работать при постоянном скольжении независимо от момента торможения. Скольжение муфты регулируется сопротивлением в цепи якоря. Муфта может быть использована в качестве стабилизатора скорости и в качестве редуктора с плавной регулировкой передаточного числа.

В предположении, что магнитный поток Φ пропорционален току обмотки возбуждения, можно на основании (1)...(3) написать:

$$s = A(R_a + R_c + R). \quad (4)$$

Итак, у муфты с ненасыщенной магнитной системой: 1) величина скольжения прямо пропорциональна суммарному сопротивлению токовой цепи муфты; 2) при постоянном сопротивлении внешней цепи и скорости вращения ведущей части муфты скорость вращения ведомой части постоянна и не зависит от величины тормозного момента; 3) при насыщенной магнитной системе скольжение муфты с увеличением тормозного момента возрастает.

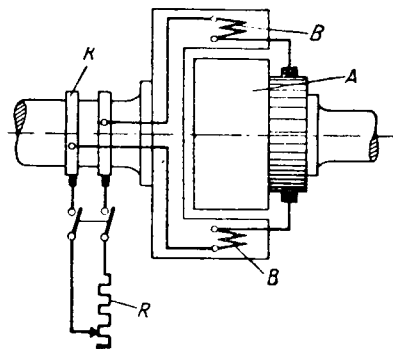


Рис. 1. Схема самовозбуждающейся муфты с коллектором.

A — якорь с коллектором; B — обмотка возбуждения; K — кольцо; R — внешнее сопротивление.

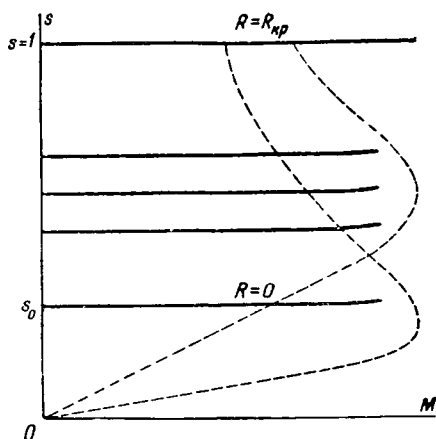


Рис. 2.

На рис. 2 представлена зависимость $s=f(M)$ при различных значениях сопротивления токовой цепи. Пунктиром нанесены аналогичные зависимости обычной асинхронной муфты с независимым возбуждением при различных сопротивлениях цепи якоря. Чем больше сопротивление внешней цепи самовозбуждающейся муфты, тем выше располагается характеристика.

Сопротивление внешней цепи, при котором муфта останавливается, назовем критическим. Скольжение при критическом сопротивлении внешней цепи по (4) будет:

$$s=1=A(R_a+R_c+R_{kp}). \quad (5)$$

Разделив (4) на (5), получим выражение для определения скольжения муфты при любом сопротивлении внешней цепи:

$$s = \frac{R_a + R_c + R}{R_a + R_c + R_{kp}}. \quad (6)$$

Наиболее низкое скольжение соответствует такому режиму, когда сопротивление внешней цепи $R=0$ — режим короткого замыкания токовой цепи.

При нагрузках выше номинальной увеличение тока вызывает насыщение магнитной системы и скольжение муфты возрастает. При сильных перегрузках скольжение муфты может достигнуть 1 и ведомая часть остановится. Величина тока при $s=1$ зависит от сопротивления токовой цепи. Предохранитель, поставленный в цепь якоря, разрывает ее при значительном токе, тем самым разобщая энергетическую связь ведущей и ведомой частей муфты.

Таким образом, муфта с коллектором может нести функции предохранителя от перегрузки.

Критическое сопротивление и критическая скорость вращения. На рис. 3 (кривая a) дана характеристика холостого хода муфты при скольжении $s=1$. При рабочем скольжении $s<1$ все ординаты характеристики холостого хода располагаются ниже (кривая b , рис. 3).

Зависимость напряжения внешней цепи от тока $U=f(I)$ при постоянном сопротивлении внешней цепи будет прямой, тангенс угла наклона которой $\operatorname{tg} \alpha = \frac{U}{I} = R$.

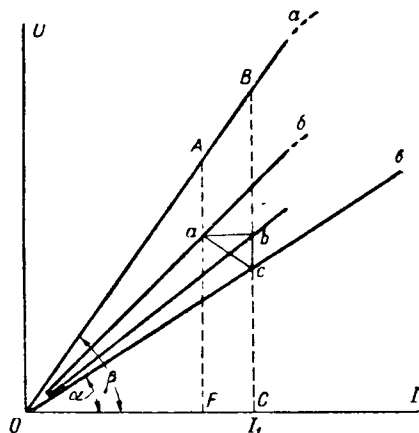


Рис. 3.

Связь между характеристикой холостого хода b при рабочем скольжении и прямой напряжения v может быть осуществлена посредством реактивного треугольника, который располагается между этими характеристиками.

Для некоторого значения тока муфты I_1 реактивный треугольник примет положение, показанное на рис. 3.

Вертикальный катет треугольника

$$\overline{bc} = I_1(R_a + R_c).$$

Согласно (4), скольжение муфты по рис. 3 может быть определено так:

$$s = \frac{\overline{bc}}{AF}. \quad (7)$$

При изменении тормозного момента, а следовательно, тока муфты реактивный треугольник скользит своими вершинами a и c по характеристикам b и v , положение которых не меняется при неизменном сопротивлении внешней цепи. Однако при увеличении внешнего сопротивления R наклон характеристики напряжения v увеличивается. Одновременно возрастает, согласно (4), и скольжение муфты s . Как нетрудно видеть, при этом характеристика холостого хода b поднимается, стремясь к предельному положению при $s=1$ (кривая a), к режиму, когда ведомая часть муфты останавливается.

При дальнейшем увеличении сопротивления внешней цепи муфта с последовательным возбуждением перестает самовозбуждаться.

Сопротивление внешней цепи, выше которого муфта с последовательным возбуждением перестает самовозбуждаться, и есть критическое сопротивление внешней цепи R_{kp} ; суммарное сопротивление токовой цепи — критическое сопротивление токовой цепи ΣR_{kp} .

Критическое сопротивление токовой цепи муфты в первом приближении может определяться по тангенсу угла наклона прямолинейной части характеристики холостого хода при $s=1$

$$\Sigma R_{kp} \approx \operatorname{tg} \beta. \quad (8)$$

При снижении скорости вращения ведущей части муфты n_1 ординаты характеристики холостого хода (кривая a , рис. 3) уменьшаются пропорционально скорости.

Если при постоянном сопротивлении внешней цепи характеристика холостого хода для $s=1$ достигнет положения кривой b рис. 3, то ведомая часть останавливается. Дальнейшее снижение скорости вращения ведущей части переводит электромагнитную муфту в режим генератора с последовательным возбуждением.

Скорость вращения ведущей части, ниже которой ведомая часть муфты с последовательным возбуждением не вращается, назовем критической скоростью ведущей части муфты для данного сопротивления внешней цепи.

Если кривая a соответствует скорости вращения ведущей части муфты n_1 , то критическая скорость вращения $n_{кр}$ для внешнего сопротивления, соответствующего характеристике b , будет равна той скорости вращения, при которой получается характеристика b . Критическая скорость вращения

$$n_{кр} = n_1 \frac{\overline{aF}}{\overline{AF}} = n_1 \frac{\overline{bC}}{\overline{AF}}. \quad (9)$$

Если реактивный треугольник неизвестен, то в первом приближении критическую скорость можно найти как

$$n_{кр} \approx n_1 \frac{\overline{bC}}{\overline{BC}}. \quad (10)$$

Из (7) и (9) получаем:

$$n_{кр} = n_1 s. \quad (11)$$

Условия нормальной работы. Для самовозбуждения муфты с последовательным возбуждением и ее нормальной работы необходимо выполнить следующие условия: 1) наличие в полюсной системе остаточного магнетизма; 2) сопротивление внешней цепи муфты должно быть ниже критического; 3) скорость вращения ведущей части муфты должна быть выше критической скорости.

Вращающий момент

$$M = \frac{1}{A\omega_1} I^2, \quad (12)$$

где $\omega_1 = \frac{2\pi n}{60}$.

Вращающий момент муфты с последовательным возбуждением пропорционален квадрату тока якоря муфты и не зависит от сопротивления внешней цепи.

Мощность, передаваемая от ведущей части муфты к ведомой:

$$P_{12} = \omega_1 M = \frac{I^2 (R_a + R_c + R)}{s}. \quad (13)$$

Полезная мощность

$$P_2 = P_{12} - \Sigma P, \quad (14)$$

где $\Sigma P = I^2 (R_a + R_c + R)$ — сумма всех потерь токовой цепи муфты (потерями в стали якоря пренебрегаем).

Коэффициент полезного действия муфты

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_{12}}.$$

После подстановки в последнее выражение потерь и электромагнитной мощности P_{12} получим:

$$\eta = 1 - s. \quad (15)$$

Итак, чем выше скольжение муфты, тем ниже ее к. п. д.

Муфты, спроектированные на постоянную работу при минимальном скольжении, имеют к. п. д. такого же порядка, как и асинхронные муфты с независимым возбуждением (около 0,97 ... 0,98).

Заключение. Самовозбуждающаяся муфта с коллектором имеет ряд следующих преимуществ по сравнению с асинхронной муфтой независимого возбуждения: 1) отсутствие необходимости постороннего источника постоянного тока; 2) работа с постоянным скольжением независимо от тормозного момента; 3) возможность плавной регулировки скорости ведомой части муфты путем изменения сопротивления токовой цепи. Последнее свойство муфты с коллектором превращают ее в своеобразный редуктор, передаточное число которого можно плавно менять, регулируя внешнее сопротивление; 4) самовозбуждающаяся муфта может служить также предохранителем от перегрузок ведомой части муфты.

К недостаткам муфты с коллектором следует отнести:

а) достижение более высоких скольжений связано с уменьшением к. п. д.; б) несколько увеличенные размеры магнитопровода вследствие нормальной работы в ненасыщенном режиме; в) наличие коллектора у якоря приводит к некоторому удорожанию изготовления.

Самовозбуждающаяся электромагнитная муфта с коллектором может успешно применяться для привода в небольших установках (привод токарных, сверлильных станков, в некоторых операциях текстильного, бумагоделательного производства, в приборостроении), где необходимо широкое регулирование скорости, а потери в самой муфте в энергетическом отношении не имеют решающего значения.

Литература

1. Е. К. Мезин. Самовозбуждающаяся электромагнитная асинхронная муфта. Электричество, № 5, 1948.

[14. 11. 1951]



Регулятор замедления шахтной подъемной машины

Кандидат техн. наук, доц. Л. Г. ЖИВОВ

Северо-Кавказский горно-металлургический институт

1. Точность останова и получение малых скоростей составляют основную особенность автоматизации процесса замедления шахтной подъемной машины с асинхронным приводом. Задача правильного подбора параметров электрической и механической схемы оказалась неразрешенной в многочисленных регуляторах хода. Ниже приведен анализ работы осуществленного регулятора замедления, который дал положительные результаты.

Данные установки: подъемная машина (рис. 1) — двухбарабанная, с диаметром барабана 4 м. подъемный сосуд — опрокидной скип. Кроме главного имеется вспомогательный тормоз, действующий на вал двигателя. Давление регулируется в обоих тормозных цилиндрах регулятором давления. Мощность асинхронного двигателя подъемной машины 400 квт. С валом подъемного двигателя через текстропную передачу соединен тахогенератор ТГ (рис. 1), в свою очередь, электрически соединенный с тормозным двигателем ТД.

Принципиальная электрическая схема регулятора замедления приведена на рис. 2.

Импульс на включение схемы осуществляет сигнальное реле РС. При замыкании его контактов реле 1РП включает контактор пуска КПП (или КРН) и подготавливает цепь для включения контактора реверсера В (или Н). Контактор рабочего тормоза КТР включается контактом РВ и растормаживает от главного тормоза машину.

Электроventиль ЭВ (контакт реле ускорения магнитной станции ТРУ-3 еще замкнут) рас-

Дан анализ переходных режимов регулятора замедления. Рассмотрен весь процесс — от начала замедления до полной остановки. Приведены расчетные кривые и осциллограммы, подтверждающие расчет.

тормаживает подъемную машину от вспомогательного тормоза. Подъемный двигатель приключается к сети. При подходе скипа к фиксированной

на профилях указателя глубины точке начала периода замедления подъемной системы размыкается контакт путевого выключателя ЗВК и реле 1РП отключает двигатель. Величина свободного пробега системы есть функция статической нагрузки

$\alpha_1 = \frac{F_{cm}}{m}$, где F_{cm} — статическая нагрузка и m — приведенная к окружности барабана масса подъемной системы. В зависимости от величины замедления ток в цепи ТГ—ТД уменьшается с большей или меньшей скоростью.

Если замедление недостаточно, т. е. ток в цепи ТГ—ТД уменьшается незначительно, контакты реле замедления РЗ замкнуты, и после замыкания контакта РЗ ventиль ЭВ шунтируется, что означает выпуск сжатого воздуха в цилиндр вспомогательного тормоза и торможение системы.

Если же за период выдержки времени РВ ток в цепи ТГ—ТД уменьшается до величины, меньшей тока отпуска реле замедления РЗ, шунтирующая цепь остается разомкнутой и торможение не происходит.

Когда скип пройдет от ЗВК путь h_1 (рис. 1), начинает действовать командоаппарат КАП, шайбы которого выключают сопротивления, приключенные параллельно ТД. В этом случае регулятор замедления работает на принципе не только параметра замедления, но также пути и скорости. Если действительная скорость окажется больше заданной при включении ступени сопротивления КАП, ток РЗ превосходит ток втягивания РЗ, включается вспомогательный тормоз и замедление тогда определяется нагрузкой F_{cm} и тормозным усилием F_m .

При снижении скорости подъемной машины до v_{1pc} реле 1РС дает импульс на приключение к сети двигателя, который работает на одной из первых реостатных характеристик (в связи с отключением 1РП, рис. 2). На расстоянии $h_1 + h_2$ от ЗВК, приблизительно равном пути, проходному за период замедления от v_m до v_{1pc} при подъеме нормального груза, КАП отключается. При соблюдении равенства $F_{dv} = F_{cm}$ скип продолжает двигаться со скоростью $v_{F_{dv} = F_{cm}}$, причем

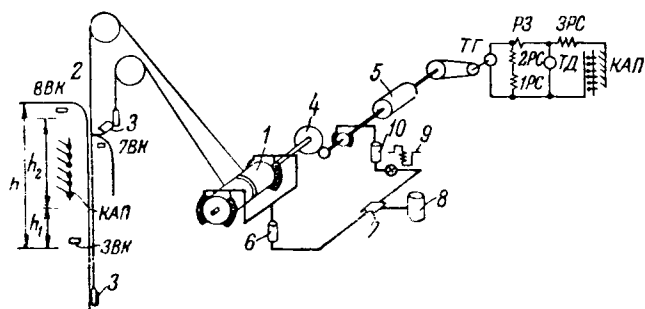


Рис. 1. Электромеханическая схема регулятора замедления.

1 — подъемная машина; 2 — разгрузочные кривые; 3 — скипы; 4 — редуктор; 5 — подъемный двигатель; 6 — рабочий тормозной цилиндр; 7 — регулятор давления; 8 — воздухоотборник; 9 — электроventиль; 10 — вспомогательный тормозной цилиндр.

A и B — коэффициенты, являющиеся функцией R_{κ} (приложение II), так же, как и I_{0i} и I' .

б) Замедление подъемной системы при включении вспомогательного тормоза и нарастающем тормозном усилии. Тормозное давление с учетом атмосферного [Л. 1],

$$P_2 - 1 = \int q \psi (P_2 - p_0) dt, \quad (4)$$

где P_2 — абсолютное давление в тормозном цилиндре;

q — величина, пропорциональная площади отверстия воздухопровода и первоначальному давлению в воздухосборнике;

$$\psi = \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]},$$

где $k=1,41$ — показатель истечения;

$\sigma = \frac{Q_1}{Q_2}$, где Q_1 — объем воздухосборника (м^3) и Q_2 — объем тормозного цилиндра;

P_1 — абсолютное давление в воздухосборнике;
 P_0 — абсолютное давление в воздухосборнике до начала торможения (кг/см^2).

Уравнение (4) решается графическим интегрированием, так как ψ переменная величина и зависит от соотношения $\frac{P_2}{P_1}$. Для давления $P=6,5$ и 4 ат для трех значений q построены $P_2 - 1 = f(t)$ (рис. 3). Они почти прямые для тех отрезков времени, которые представляют интерес для исследования. Поэтому можно принять, что нарастание тормозного усилия пропорционально времени t ; если еще учесть, что у любого тормоза необходимо усилие H на преодоление холостого хода то:

$$F_m = \frac{F_{m, \text{м}}}{T} t - H. \quad (5)$$

Замедление при нарастающем тормозном усилии

$$a = \frac{F_{cm}}{m} + \left[\frac{F_{m, \text{м}}}{mT} t - \frac{H}{m} \right] = \frac{F_{cm} - H}{m} + \frac{F_{m, \text{м}}}{mT} t$$

или

$$a = a'_1 + a't, \quad (6)$$

где $a'_1 = \frac{F_{cm} - H}{m}$; $a'_1 = \frac{F_{m, \text{м}}}{mT}$ — максимальное приращение замедления от действия тормоза. Используя уравнение (6) (приложение II), будем иметь:

$$I_{pz} = I_0 + I'_1 A \left(1 - e^{-\frac{kt}{T_{m, \partial}}} \right) + I'_1 B t + I''C \left(1 - e^{-\frac{kt}{T_{m, \partial}}} \right) + I''Dt + I''Et^2, \quad (7)$$

где

$$I'_1 = \frac{C_2 T_{m, \partial}}{R} \left(\frac{F_{cm} - H}{m} \right); \quad I'' = \frac{C_2 T_{m, \partial}}{R} a'$$

и A, B, C, D, E — функции R_{κ} . Первые три члена правой части (7) есть уравнение (2), определяю-

щее знак тока у реле замедления при постоянном a'_1 ; два последних члена характеризуют изменение тока PZ при нарастании тормозного усилия.

Уравнение (7) справедливо для случая одновременного начала процессов замедления и торможения. В случае неодновременного наступления замедления и торможения (7) может быть выражено:

$$I_{pz} = I_0 + I'_1 A \left(1 - e^{-\frac{kt}{T_{m, \partial}}} \right) + I'_1 B t + I''C \left(1 - e^{-\frac{kt'}{T_{m, \partial}}} \right) + I''Dt' + I''Et'^2, \quad (8)$$

где t' — время действия нарастающего тормозного усилия.

в) При установившемся тормозном усилии, заменив в (8) t' на T — на полное время нарастания тормозного усилия, будем иметь:

$$I_{pz} = I_{0i} + I'_1 A \left(1 - e^{-\frac{kt}{T_{m, \partial}}} \right) + I'_1 B t + I''C \left(1 - e^{-\frac{kT}{T_{m, \partial}}} \right) + I''DT + I''ET^2 \quad (9)$$

Анализ формул (8) и (9) показывает, что ток PZ обусловлен главным образом величиной I_{0i} .

При расчетах необходимо учитывать собственные времена срабатывания реле замедления t_{pz} , вентиля $t_{\text{вн}}$ и вспомогательного тормоза $t_{\text{эм}}$.

Третий период. После отключения КАП и приключения двигателя ток реле замедления определяется из выражения

$$I_{pz} = I_{0i} + I''_1 \left(1 - e^{-\frac{kt}{T_{m, \partial}}} \right) + I''_2 \left(1 - e^{-\frac{kt}{T_{m, \partial}}} \right), \quad (10)$$

где

$$I''_1 = \frac{C_2 T_{m, \partial}}{R_1} a_1; \quad I''_2 = \frac{C_2 T_{m, \partial} F_{\partial \partial}}{R_1 m}.$$

В случае легкого груза ($F_{\partial \partial} > F_{cm}$) включается тормоз и ток PZ при совместной работе двигателя и тормоза определится:

$$I_{pz} = I_{0i} + I'''_1 \left(1 - e^{-\frac{kt}{T_{m, \partial}}} \right) + I''_2 \left(1 - e^{-\frac{t''}{T_{m, \partial}}} \right) + I'_3 \left(1 - e^{-\frac{t''}{T_{m, \partial}}} \right), \quad (11)$$

где

$$I'_3 = \frac{C_2 T_{m, \partial}}{R_1} a';$$

$$I'''_1 = \frac{C_2 T_{m, \partial}}{R_1} \left(\frac{F_{cm} - H}{m} \right),$$

причем $t \neq t' \neq t''$ и $R_1 = R_2 + R_{m, \partial}$.

При значениях $t \neq t' \neq t''$, больших $4-5T_{m, \partial}$, ток реле замедления может быть определен по формуле:

$$I_{pz} = I_{0i} \pm k_i \Delta F,$$

где $k_i = \frac{C_2 T_{m, \partial}}{R_1 m} = \text{const}$ при условии $m = \text{const}$,

$$\Delta F = F_{\partial \partial} \pm F_{cm} - F_m.$$

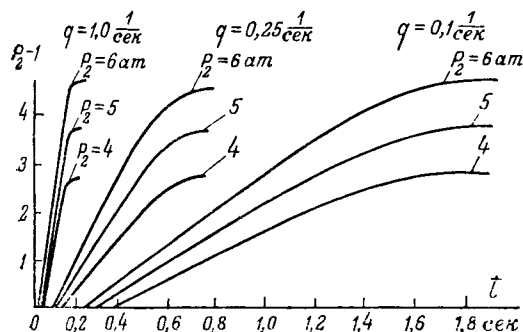


Рис. 3. Зависимость $P_2 = f(t)$.

Подъемная система может достигать скорости v_{1pc} , и включение двигателя может наступить до входа подъемного сосуда на разгрузочные кривые. В этом случае ток реле замедления определяется аналитически по приведенным формулам. Скорость и путь скипа от момента выключения двигателя конечным выключателем ЗВК определяются по формулам:

$v_i = v_{i-1} - a_1 t'$ — при свободном выбеге (1 период);
 $v_i = v_{i-1} - (a_1 + a') t'$ — при установившемся тормозном усилии;

$$h_i = h_{i-1} + v_{i-1} t' - \frac{a_1 t'^2}{2} - \frac{a' t'^3}{6T},$$

где v_{i-1} и h_{i-1} — скорость и путь при $t' = 0$;
 v_i и h_i — то же в момент t' .

Время t' отсчитывается с момента начала данного процесса.

При входе подъемного сосуда на разгрузочные кривые постоянство статического усилия $F_{ст}$ нарушается. Слип опораживается на разгрузочных кривых и, кроме того, часть своего веса передает на них, в связи с чем второй слип будет неуравновешен. Поэтому в конце подъема статические усилия могут быть отрицательными (см. ниже рис. 10).

Для определения скорости скипа и токов РЗ на участке разгрузочных кривых необходимо, очевидно, применить графоаналитический метод расчета (принцип пропорций) ввиду того, что $F_{ст} = f(h)$, а $F_{дв} = f(v)$.

На рис. 4 приведены для всего периода замедления подъемной системы расчетные кривые $v = f(t)$ и $I_{P3} = f(t)$ при $F_{ст} = F_{ст.н}$ и $F_{ст} = 0,8 F_{ст.н}$ для следующих параметров: $T_{м.д} = 0,12$ сек; $C_{м.д} = 0,105$; $C_z = 47,5$; $T = 0,5$ сек; полный путь замедления $h = 22$ м; величина тока втягивания реле $I_{P3 вт} = 4$ а; ток отпуска реле $I_{P3 от} = 2,25$ а; ток холостого хода $I_0 = 3,7$ а; $F_{т.м} = 3960$ кг; $v_m = 5,25$ м/сек; $R_{P3} = 0,18$ ом; $R_{я.т.з} = 0,87$ ом; $R_{щ.т.з} = 0,1$ ом; $R_{я.т.д} = 0,55$ ом; $R_{щ.т.д} = 0,1$ ом; R_k на седьмом метре пути составляет 0,7 ом; на 10,1—80 ом, на 14,6—45 ом; на 17—36 ом; на 19—27 ом; на 20,1—20,8 ом.

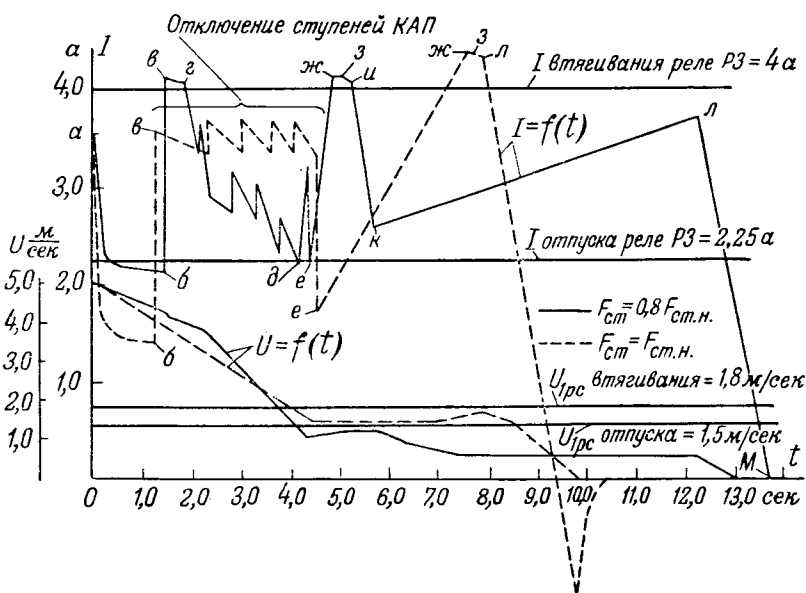
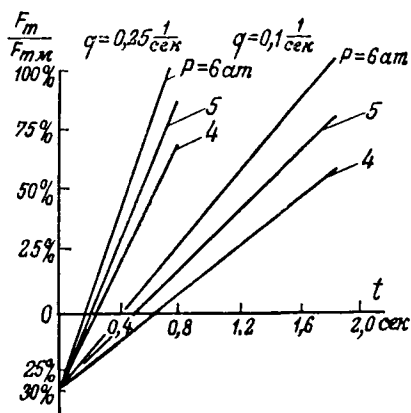
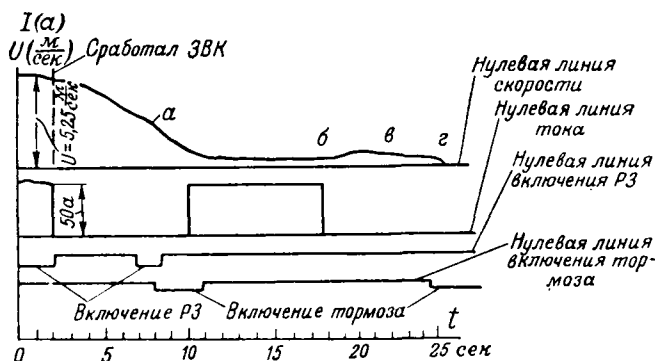
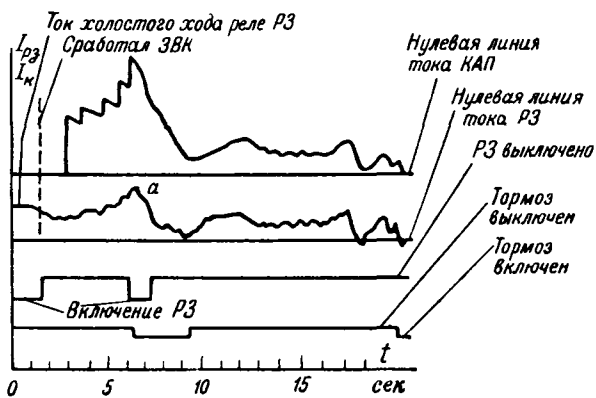


Рис. 4. Расчетные кривые тока реле замедления и скорости подъемной машины для двух случаев: $F_{ст} = 0,8 F_{ст.н}$ и $F_{ст} = F_{ст.н}$.

Первый период замедления (от точки а до б) характеризуется замедлением свободного выбега [формула (1)]. Через 1,46 сек после срабатывания ЗВК и отключения двигателя подключается КАП, ток реле РЗ превосходит ток втягивания реле РЗ, контакты реле РЗ замыкаются, вентиль шунтируется и, спустя $t_{P3} + t_{эв}$ (точки в и г), включается вспомогательный тормоз.

Ступени КАП продолжают отключаться одна за другой [формулы (2), (7), (8), (9)], однако скорость подъемной системы вследствие наложения тормоза уменьшается, и поэтому ток РЗ снижается ниже тока отпуска реле РЗ (точка д), в связи с чем снимается тормоз. Скорость снижается до величины v_{1pc} . Двигатель приключается к сети (точка е), причем для нашего случая усилие двигателя $F_{дв} > F_{ст} = 0,8 F_{ст.н}$, скорость подъемной системы, а следовательно, и ток РЗ, поэтому вновь увеличиваются, что вызывает включение вспомогательного тормоза (точки ж, з и и). Подъемный сосуд движется по разгрузочным кривым (точки к и л). В конце разгрузочных кривых при скорости $v \approx 0,47$ м/сек накладывается главный тормоз и подъемная система стопорится.

Для этих же расчетных условий и случая $F_{ст} = 0,7 \dots 0,8 F_{ст.н}$ сняты осциллограммы тока подъемного двигателя, скорости подъемной системы, отсечки реле РЗ и вспомогательного тормоза (рис. 6) и кривые тока РЗ и КАП, отсечки РЗ и тормоза (рис. 7). На рис. 5 показано, что при срабатывании ЗВК отключается от сети двигатель и РЗ. На шестой секунде (при начавшемся выключении ступеней КАП) действительная скорость превосходит заданную, в связи с чем ток РЗ (рис. 7) превышает ток втягивания РЗ, и реле РЗ шунтирует вентиль ЭВ. Накладывается тормоз. Скорость резко падает (точка а на рис. 6 и 7). При снижении скорости до v_{1pc} включается двигатель. В конце разгрузочных кривых вследствие

Рис. 5. Зависимость $F_m = f(t)$.Рис. 6. Осциллограммы тока двигателя, скорости, отсечки реле P_3 и тормоза для $F_{ст} \approx 0,7 \dots 0,8 F_{ст.н}$.Рис. 7. Осциллограммы тока P_3 , КАП, отсечки P_3 и тормоза для $F_{ст} \approx 0,7 \dots 0,8 F_{ст.н}$.

неуравновешенности мертвого веса подъемных сосудов скорость несколько увеличивается (точки б и в, рис. 6). В конце цикла подъема накладывается тормоз (точка г, рис. 6).

На рис. 8 приведена осциллограмма для $F_{ст} = F_{ст.н}$. В этом случае тормоз ни разу не был включен. Включение двигателя вызвало увеличение тока P_3 (точка а, рис. 8), однако не до величины тока втягивания P_3 .

Анализ осциллограмм и рис. 4 показывают, что расхождение расчетных и экспериментальных кривых незначительное. Экспериментальные кривые

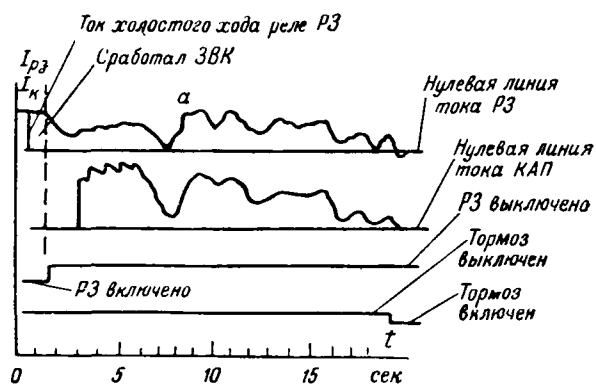
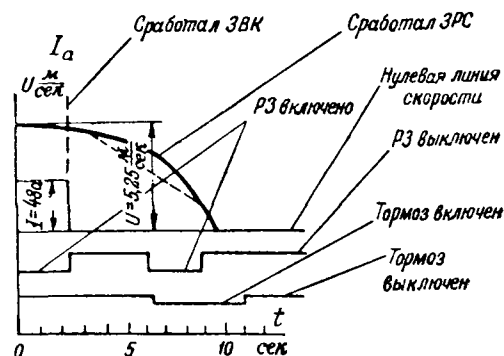
Рис. 8. Осциллограммы тока P_3 , КАП, отсечки P_3 и тормоза для $F_{ст} = 1,0 \dots 1,1 F_{ст.н}$.

Рис. 9. Осциллограмма скорости при срабатывании предохранительного тормоза.

вые имеют больший во времени период замедления (14...15 сек, рис. 4 и 18...19 сек, рис. 6, 7 и 8). При тяжелом грузе тормоз накладывается два раза (расчет) вместо одного (эксперимент, рис. 7). Однако невозможно в условиях работы действующей подъемной установки добиться полного соответствия между расчетными и экспериментальными данными, поэтому сопоставление результатов расчета и эксперимента можно считать удовлетворительным, так как нельзя точно определить вес полезного ископаемого в подъемном сосуде, коэффициент вредных сопротивлений, к. п. д. зубчатой передачи и т. д.

Регулятор замедления, воздействующий на вспомогательный тормоз, является комбинированным регулятором многократного действия по пути, скорости и замедлению.

Исследование и эксперимент показывают, что такой регулятор обеспечивает автоматическую работу в период замедления подъемной установки с асинхронным приводом, имеющей вспомогательный тормоз, отстраняя от управления машиной машиниста. Тормозной двигатель $TД$ служит для увеличения чувствительности системы реле P_3 — вспомогательный тормоз и характеризует замедление системы; КАП вносит корректив по пути и скорости. Работа регулятора замедления на главный тормоз такого же эффекта, как со вспомогательным тормозом, не дает ввиду низкой чувствительности главного тормоза. Необходимо исследовать на основании приведенного анализа

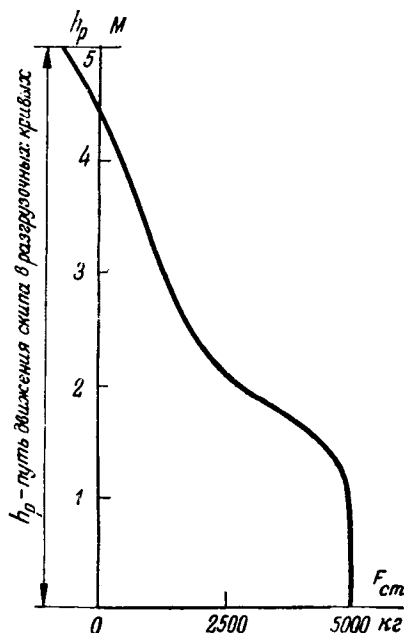


Рис. 10. Изменение статических усилий на разгрузочных кривых.

такую схему, где вообще не было бы торможения механическим тормозом. Схема управления с динамическим торможением асинхронного двигателя и с описанным регулятором замедления может дать практически правильное разрешение этой задачи.

Приложение I. Для определения изменения тока в цепи $TГ - TД$ в первый период, когда система замедляется статической нагрузкой $F_{см}$ при выключенном двигателе, необходимо совместно решить два уравнения:

$$E_z = TR' + E_{m,д} \quad (I,1)$$

$$M - M_0 = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (I,2)$$

$E_{m2} = C_z n$, где E_{m2} — э. д. с., а n — скорость вращения тахогенератора. Выразим n через линейную скорость каната подъемной машины:

$$n = \frac{60 \varphi_1 \varphi_2 v}{\pi D_6}$$

где φ — передаточное число между валом подъемной машины и двигателем, а φ_2 — передаточное число между двигателем и тахогенератором; D_6 — диаметр барабана подъемной машины (m); v — скорость каната ($m/сек$). Следовательно,

$$E_{m,д} = C_z v,$$

где

$$C_z = \frac{p}{a} \frac{N}{60} \Phi \cdot 10^{-8} \frac{60 \varphi_1 \varphi_2}{\pi D_6};$$

где $E_{m,д}$ — напряжение тормозного двигателя;

$n_{m,д}$ — скорость его вращения;

M, M_0 — моменты тормозного двигателя в период замедления и в период холостого хода:

$$M - M_0 = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (I,3)$$

GD^2 — маховой момент тормозного двигателя;

R' — сопротивление цепи тахогенератор — тормозной двигатель. Выразим (I,1) через I :

$$I = \frac{E_{m2}}{R'} - \frac{E_{m,д}}{R'} = \frac{C_z v}{R'} - \frac{C_{m,д} n_{m,д}}{R'}; \quad (I,4)$$

$$C_{m,д} I - C_{m,д} I_0 = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}, \quad (I,5)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{C_z}{R'} \frac{dv}{dt} - \frac{C_{m,д}}{R'} \frac{dn}{dt}. \quad (I,6)$$

Определив из (I,5) $\frac{dn}{dt}$ и подставив в (I,6), имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= \frac{C_z}{R'} a_1 - \frac{C_{m,д}^2}{1,03 R' GD^2} I + \frac{C_{m,д}^2 375 I_0}{1,03 R' GD^2}; \\ \frac{dI}{dt} &= \frac{C_z}{R'} a_1 - \frac{I}{T_{m,д}} + \frac{I_0}{T_{m,д}}. \end{aligned} \quad (I,7)$$

Решение этого уравнения при условии, что при $t = 0$ $I = I_0$:

$$I_{pз} = I_0 + I'_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{m,д}}} \right), \quad (I)$$

причем $R' = (R_{я,m2} + R_{щ,m2}) + R_{pз} + R_n + (R_{я,m,д} + R_{щ,m,д})$; $R_{я,m2}$ и $R_{я,m,д}$ — сопротивление якоря тахогенератора и тормозного двигателя; $R_{щ,m2}$ и $R_{щ,m,д}$ — сопротивление щеток $TГ$ и $TД$; $R_{pз}$ — сопротивление катушки реле замедления; R_n — сопротивление проводов главной цепи $TГ$ и $TД$.

Приложение II. В период установившегося замедления при свободном выбеге могут быть составлены четыре уравнения:

$$I_{pз} = I_1 + I_2; \quad (II,1)$$

$$E_{m2} = I_{pз} R_z + I_1 R_{m,д} + E_{m,д} \quad (II,2)$$

$$E_{m,д} = I_2 R_k - I_1 R_{m,д}, \quad (II,3)$$

$$E_{m2} = I_{pз} R_z + I_2 R_k, \quad (II,4)$$

где $R_z = R_{я,m2} + R_{щ,m,д} + R_{pз} + R_{n,к}$ и $R_{m,д} = R_{я,m,д} + R_{щ,m,д} + R'_{n,к}$, $R'_{n,к}$ — сопротивление проводов от зажимов $TД$ до $КАП$. Из (II,1) и (II,4), приняв, что $1 + \frac{R_z}{R_k} = K$, имеем:

$$I_1 = I_{pз} K - \frac{E_{m2}}{R_k}; \quad (II,5)$$

аналогично можем написать, что:

$$I_{0i} = I_0 K - \frac{E_{0m2}}{R_k}. \quad (II,6)$$

После несложных преобразований, приняв, что $1 + \frac{R_{m,д}}{R_k} = \varphi$ и $R = \frac{R_z (R_{m,д} + R_k) + R_k R_{m,д}}{R_k}$, получим уравнение для тока реле замедления

$$I_{pз} = \varphi \frac{E_{m2}}{R} - \frac{E_{m,д}}{R}. \quad (II,7)$$

Из (I,3) аналогично приложению I, получим:

$$\frac{dI}{dt} = \varphi \frac{C_z}{R} \frac{dv}{dt} - \frac{C_{m,д}}{R} \frac{dn}{dt}. \quad (II,8)$$

Подставив в (I,3) вместо $M = C_{m,д} I_1$ и $M_0 = C_{m,д} I_0$ значения I_1 и I_{0i} , из (II,5) и (II,6) имеем:

$$\begin{aligned} C_{m,д} K (I_{pз} - I_{0i}) - \frac{C_{m,д}}{R_k} [E_{m2} - E_{0m2}] = \\ = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \end{aligned} \quad (II,9)$$

Определив из (II,9) $\frac{dn}{dt}$ и подставив в (II,8), имеем, учитывая, что

$$v = v_m + a_1 t, E_{m2} - E_{0m2} = C_2 v_m + C_2 a_1 t - C_2 v_m = C_2 a_1 t$$

и

$$T_{m,0} = \frac{1,03 R G D^2}{C^2_{m,0} 375}$$

$$\frac{dI}{dt} = \varphi \frac{C_2}{R} a_1 - \frac{K}{T_{m,0}} (I - I_0) + \frac{C_2}{R_K T_{m,0}} a_1 t; \quad (II,10)$$

при $t = 0, I_{p3} = I_0$. Интеграл уравнения (II,10):

$$I_{p3} = I_{0i} + I' A \left(1 - e^{-\frac{kt}{T_{m,0}}} \right) + I' B t,$$

где

$$A = \frac{\varphi}{k} - \frac{R}{k^2 R_K} \quad \text{и} \quad B = \frac{R}{T_{m,0} R_K K}.$$

Подставив в (II,10) значение a' из (6) и приняв, что постоянная интегрирования определится при $t = 0$ и $I = I_0$, получим в результате интегрирования (II,10) с учетом (6) уравнение (7), причем

$$C = \frac{2 T_{m,0} R}{k^2 T R_K} - \frac{\varphi}{T} \frac{T_{m,0}}{k^2}; \quad D = \frac{\varphi}{T K} - \frac{2 R}{k^2 R_K T};$$

$$E = \frac{R}{R_K T K T_{m,0}}.$$

Некоторые обозначения:

- $F_{ст}$ — статическая нагрузка.
- $F_{ст-н}$ — номинальная статическая нагрузка.
- $F_{дв}$ — усилие, развиваемое двигателем.
- m — приведенная масса системы.
- a_1 — замедление свободного выбега.
- a_1 — замедление свободного выбега с учетом холостого хода тормоза.
- a' — замедление от максимального тормозного усилия.
- I_{p3} — ток, протекающий в катушке реле P3.
- I_0 — ток холостого хода тормозного двигателя.
- I_{0i} — ток холостого хода тормозного двигателя при выключении ступеней КАП.
- I' — составляющая тока P3 при замедлении a_1 и сопротивлении R.
- I'_1 — составляющая тока P3 при a'_1 и R.
- I'' — составляющая тока P3 при a' и R.
- I''_1 — составляющая тока P3 при a_1 и R_1 .
- I'''_1 — составляющая тока P3 при a'_1 и R_1 .
- I'_2 — составляющая тока P3 от ускорения системы при включении двигателя и сопротивлении R_1 .
- I'_3 — составляющая тока P3 от a' и R_1 .
- $T_{мд}$ — электрохимическая постоянная времени.
- v — линейная скорость подъемной системы.

Литература

1. В. Б. Уманский и В. С. Тулин. Теоретические основы шахтной подъемной машины, ч. I, Вопросы управления защиты, Гос. научн. техиздат Украины, 1933.

[26. 10. 1951]



Повышение устойчивости работы передвижных электростанций при пуске электродвигателей соизмеримой мощности

Кандидат техн. наук И. В. ТИХОМИРОВ

Москва

Передвижные электростанции трехфазного тока мощностью от 5 до 100...150 кВа находят все возрастающее применение в ряде отраслей народного хозяйства (лесо-заготовительная и строительная промышленность, железнодорожный транспорт, сельское хозяйство и т. д.).

Для передвижных станций характерен режим работы на резко изменяющуюся нагрузку. Часто встречается необходимость прямого пуска от них короткозамкнутых электродвигателей соизмеримой мощности. Возникающие при этом пусковые токи настолько значительны, что напряжение на станции без принятия специальных мер может уменьшиться до значений, при которых устойчивая работа включенных потребителей становится невозможной, а включаемые двигатели разгоня-

ются слишком медленно или вовсе не трогаются с места.

Приводятся средние расчетные параметры синхронных генераторов, применяемых на передвижных электростанциях, и расчетные формулы для определения максимального падения напряжения при компаундировании возбуждения генераторов и регулирования возбуждения с помощью электрохимических регуляторов. Даются практические рекомендации по повышению устойчивости передвижных электростанций при пуске короткозамкнутых асинхронных двигателей соизмеримой мощности.

Проблема прямого пуска короткозамкнутых двигателей от станций ограниченной мощности была рассмотрена в ряде работ советских исследователей [Л. 1, 2]. В этих трудах основное внимание уделено переходным процессам в асинхронном двигателе в пусковой период с учетом изменения напряжения на его зажимах, а также общей методологии изучения переходных явлений в синхронном генераторе при пуске от него электродвигателей соизмеримой мощности.

Известно, что наиболее чувствительным потребителем к снижению напряжения и к длительности этого снижения является асинхронный двигатель, работающий с некоторой нагрузкой на валу. Было показано, например, что наиболее

дователей [Л. 1, 2]. В этих трудах основное внимание уделено переходным процессам в асинхронном двигателе в пусковой период с учетом изменения напряжения на его зажимах, а также общей методологии изучения переходных явлений в синхронном генераторе при пуске от него электродвигателей соизмеримой мощности.

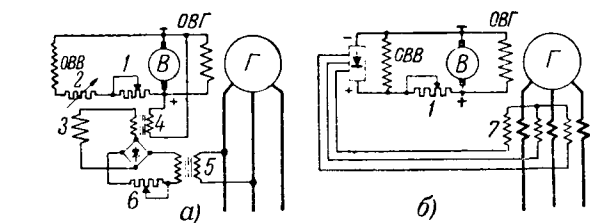


Рис. 1. Основные схемы автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов передвижных станций с машинным возбудителем.

а—схема с электромеханическим регулятором; б—с простейшим компаундирующим устройством.
1—ресстат ручной регулировки; 2—переменное сопротивление регулятора; 3—электромагнит регулятора; 4—стабилизирующий трансформатор; 5—понижающий трансформатор; 6—ресстат уставки; 7—компаундирующий трансформатор.

распространенные в практике сельскохозяйственной электрификации асинхронные двигатели мощностью до 15 кВт при постоянном статическом моменте нагрузки, равном номинальному вращающему моменту, по условиям сохранения устойчивости допускают снижение напряжения на 50 %, в лучшем случае не более чем на 0,2 сек.

Отсюда становится очевидным, какие жесткие требования должны быть предъявлены к генераторам и регуляторам маломощных передвижных электростанций по допустимой величине и длительности снижения напряжения.

В статье рассматривается изменение напряжения синхронных одиночно работающих передвижных электростанций при пуске от них короткозамкнутых электродвигателей при различных системах автоматического регулирования возбуждения их генераторов.

В результате аналитического исследования отдельных параметров генераторов и регуляторов возбуждения, оказывающих влияние на величину и длительность падения напряжения, даются практические рекомендации по повышению устойчивости передвижных электростанций в указанном режиме их работы. При определении максимального падения напряжения не учитывается падение напряжения вследствие некоторого снижения скорости вращения первичного двигателя стан-

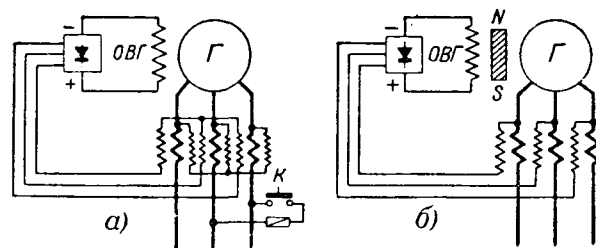


Рис. 2. Основные схемы автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов передвижных станций с возбуждением посредством полупроводниковых выпрямителей.

а—схема с трехобмоточным трансформатором и кнопкой k для начального возбуждения; б—с автотрансформатором и магнитными прокладками $N-S$ для начального возбуждения.

ции, которое составляет при современных регуляторах скорости вращения в случае пуска двигателей соизмеримой мощности не больше 4...5 % от полного падения напряжения.

Средние эксплуатационные и расчетные параметры синхронных генераторов, применяемых на передвижных электростанциях, заметно отличаются от средних параметров крупных генераторов, как это показано ниже в таблице.

Наиболее распространенными системами автоматического регулирования возбуждения маломощных синхронных генераторов являются системы с регуляторами электромеханического типа, в частности с угольными, и системы с различными компаундирующими устройствами.

Основные принципиальные схемы этих систем регулирования для генераторов передвижных электростанций с машинными возбудителями и с возбуждением через полупроводниковые выпрямители приведены на рис. 1 и 2.

При внезапном увеличении тока в обмотке статора генератора, вызванном включением электродвигателя, напряжение на зажимах статора резко уменьшается. Величиной, которая не меняется мгновенно при включении двигателя, является э. д. с. E'_d за переходным индуктивным сопротивлением генератора. Электродвижущая сила E'_d — некоторая условная величина, propor-

Средние параметры синхронных генераторов

Параметры	X_d	X_q	X'_d	X_s	X_2	X_0	r_a	g	T_{d0}	T'_d	T_a
Тип генераторов	∂/ϵ	∂/ϵ	∂/ϵ	∂/ϵ	∂/ϵ	∂/ϵ	∂/ϵ	∂/ϵ	сек	сек	сек
Крупные генераторы	1,15	0,75	0,35	0,31	0,55	0,04...0,25	0,007	0,13	6,6	2,0	0,3
Генераторы передвижных электростанций . .	1,3	0,7	0,2	0,1	0,4	0,07...0,3	0,04	0,3	1,0	0,153	0,033

Примечания:

1. Средние параметры крупных генераторов приведены по данным М. П. Костенко и П. С. Жданова [Л. 3, 4] для машин с выступающими полюсами без демпферной обмотки.
2. Средние параметры генераторов передвижных электростанций выведены автором на основании исследований ряда маломощных генераторов и обобщения собранных заводских данных.
3. Относительные значения индуктивных сопротивлений даны для ненасыщенных машин.
4. Относительное насыщение по характеристике холостого хода g представляет собой отношение ампервитков, необходимых для протекания потока через сталь генератора, к общим ампервиткам холостого хода.

циональная результирующему потокоцеплению обмотки возбуждения генератора, которая не может измениться мгновенно в начале нарушения стационарного режима генератора.

Взаимосвязь между э. д. с. E'_d и напряжением на зажимах статора генератора U в любой момент времени при некотором значении внешней нагрузки может быть выражена следующим уравнением, если исходить из векторной диаграммы двух реакций синхронного генератора:

$$U(t) = Z_s \frac{\sqrt{X_{q\Sigma}^2 + r_\Sigma^2}}{X'_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma} + r_\Sigma^2} \cdot E'_d(t), \quad (1)$$

где $Z_s = \sqrt{X_s^2 + r_s^2}$ — сопротивление подключаемого электродвигателя;

$$X'_{d\Sigma} = X'_d + X_s; \quad X_{q\Sigma} = X_q + X_s; \quad r_\Sigma = r_a + r_s.$$

Здесь предполагается, что пуск двигателя производится непосредственно от зажимов генератора или через сеть с сопротивлением, много меньшим, чем сопротивление двигателя. При значительном сопротивлении сети его влияние на изменение напряжения генератора легко учесть соответственным увеличением X_s и r_s .

В отдельных случаях можно пренебрегать активными сопротивлениями обмотки статора r_a и нагрузки r_s . Тогда взаимосвязь между E'_d и U приобретает простой вид:

$$U(t) = \frac{X_s}{X'_d + X_s} \cdot E'_d(t). \quad (2)$$

Пользуясь этими уравнениями в относительных единицах и зная входящие в них параметры генератора и нагрузки, легко определить начальное падение напряжения на зажимах генератора при $t = 0$, которое в дальнейшем обозначим ΔU_0 .

Например, при пуске двигателя от ненагруженного генератора ($E'_{d0} = 1$) очевидно:

$$\Delta U_0 = 1 - z_s \frac{\sqrt{X_{q\Sigma}^2 + r_\Sigma^2}}{X'_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma} + r_\Sigma^2} \approx 1 - \frac{X_s}{X'_d + X_s}. \quad (3)$$

Отсюда следует, что начальное падение напряжения зависит только от параметров нагрузки и некоторых параметров генератора и совершенно не зависит от той или иной разновидности системы возбуждения и регулирования возбуждения.

При пуске двигателя от частично нагруженного генератора ($E'_{d0} > 1$) величина ΔU_0 уменьшается. Значение E'_{d0} при этом режиме может быть определено по следующему уравнению:

$$E'_{d0} = \frac{U + U(X'_d + X_q) I \sin \varphi + X'_d X_q I^2}{\sqrt{U^2 + 2UX_q I \sin \varphi + X_q^2 I^2}}, \quad (4)$$

где I и U — ток и напряжение генератора при предварительно заданной нагрузке; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности этой нагрузки.

При разбеге электродвигателя его сопротивление начинает возрастать, но до достижения двигателем примерно 50 % номинальной скорости вращения возрастание незначительно; сопротивление резко возрастает только после достижения двигателем 75—80 % его номинальной скорости вращения, что обуславливает сильное снижение пускового тока и соответственное уменьшение потери напряжения на зажимах генератора.

После начального падения напряжения приходит в действие система автоматического регулирования возбуждения генератора, которая и восстанавливает напряжение практически до первоначального его значения.

Все это вместе взятое дает сложную картину изменения напряжения на зажимах генератора во время разбега электродвигателя. Характер и величина изменения напряжения зависят не только от параметров генератора и нагрузки, но и от параметров системы возбуждения и его регулирования.

В качестве иллюстрации на рис. 3 приведены кривые изменения напряжения на зажимах генератора и напряжения возбуждения при прямом пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя мощностью 14 кВт от передвижной электростанции мощностью в 25 кВА, при раздельном и совместном действии угольного регулятора возбуждения и компаундирования. Первичный двигатель станции (тракторный дизель Д-35) снабжен быстродействующим регулятором скорости вращения.

Если принять, что сопротивление двигателя Z_s до момента максимального падения напряжения $\Delta U_{\text{макс}}$ остается неизменным и равным сопротивлению при заторможенном состоянии двигателя, то для определения потери напряжения в этом интервале времени, помимо постоянных параметров, остается необходимым знать только закон изменения $E'_d = f(t)$ при соответствующей системе регулирования возбуждения генератора.

Рассматривая переходные процессы, происходящие в синхронном генераторе без демпферных обмоток, можно прийти к следующему дифференциальному уравнению, описывающему изменение э. д. с. E'_d по продольной оси генератора во времени:

$$T_{d0} \frac{dE'_d}{dt} + \frac{T_{d0}}{T'_{d\Sigma}} E'_d = u_n - g, \quad (5)$$

где u_n — напряжение возбуждения генератора в относительных единицах;

T_{d0} — постоянная времени генератора при разомкнутой обмотке статора;

$T'_{d\Sigma}$ — переходная постоянная времени генератора с учетом сопротивления внешней нагрузки:

$$T'_{d\Sigma} = T_{d0} \frac{r_\Sigma^2 + X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}}{r_\Sigma^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \approx T_{d0} \frac{X'_d + X_s}{X_d + X_s}. \quad (6)$$

Если принять, что относительное насыщение генератора g — величина постоянная, то общее ре-

шение дифференциального уравнения (5) будет иметь следующий вид:

$$E'_d(t) = E'_{d0} e^{-\frac{t}{T'_{d\Sigma}}} + \frac{(u_{n0} - g) T'_{d\Sigma}}{T_{d0}} (1 - e^{-\frac{t}{T'_{d\Sigma}}}) + \Delta E'_d(t), \quad (7)$$

где E'_{d0} и u_{n0} — соответственно начальные значения э. д. с. за переходным сопротивлением и напряжения возбуждения.

В этом уравнении член $\Delta E'_d$ характеризует нарастание э. д. с. за переходным сопротивлением. Это нарастание обусловлено действием той или иной системы регулирования возбуждения генератора. Закон изменения $\Delta E'_d$ зависит от закона изменения напряжения возбуждения u_n .

Для нерегулируемого генератора $u_n = \text{const}$, и в этом случае $\Delta E'_d = 0$.

Для систем с регуляторами электромеханического типа (схема а, рис. 1) напряжение возбуждения вплоть до насыщения с хорошим приближением к опытным результатам изменяется в соответствии с уравнением следующего вида [Л. 6]:

$$u_n(t) = u_{n0} e^{\frac{t-h}{T_s}}, \quad (8)$$

где h — время запаздывания действия регулятора; T_s — постоянная времени возбудителя.

Подстановка $u_n(t)$ согласно (8) в дифференциальное уравнение (5) и его решение дает следующее выражение для добавочного значения $\Delta E'_d$:

$$\Delta E'_d = u_{n0} \frac{T'_{d\Sigma}}{T_{d0}} \left[\frac{T_s}{T'_{d\Sigma} + T_s} \left(e^{\frac{t-h}{T_s}} - e^{-\frac{t-h}{T'_{d\Sigma}}} \right) - (1 - e^{-\frac{t-h}{T'_{d\Sigma}}}) \right]. \quad (9)$$

Компаундирование возбуждения синхронного генератора с машинным возбудителем (схема б, рис. 1) можно рассматривать как систему регулирования с подвозбудителем, в цепи якоря которого при падении генераторного напряжения закорачивается очень быстродействующим регулятором некоторое добавочное сопротивление, и к обмотке возбуждения основного возбудителя мгновенно прикладывается дополнительное напряжение, пропорциональное скачку тока в статоре.

Тогда напряжение возбуждения вплоть до насыщения будет возрастать по следующему закону:

$$u_n(t) = u_{n0} + k u_{n0} (1 - e^{-\frac{t}{T_s}}), \quad (10)$$

где $k = k_k k_n$ — коэффициент компаундирования и относительной кратности пускового тока подключаемого электродвигателя.

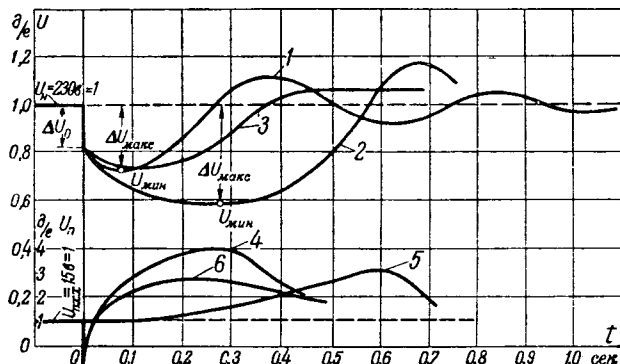


Рис. 3. Изменение напряжения передвигной электростанции мощностью 25 кВа в процессе пуска от нее короткозамкнутого двигателя мощностью 14 квт.

1 — напряжение генератора U при компаундировании и угольном регуляторе; 2 — при угольном регуляторе; 3 — при компаундировании; 4 — напряжение возбуждения u_n при компаундировании и угольном регуляторе; 5 — при угольном регуляторе; 6 — при компаундировании.

На самом деле скачок пускового тока не остается постоянным и в начальной стадии пуска электродвигателя убывает с некоторой постоянной времени, весьма близкой к $T'_{d\Sigma}$. Как показывают сравнительные расчеты, учет этого обстоятельства очень мало влияет в конечном итоге на точность вычисления $\Delta U_{\text{макс}}$, но приводит лишь к значительному усложнению расчетов.

Устройства для компаундирования возбуждения синхронных генераторов, не включающие каких-либо электромеханических деталей и значительных индуктивностей, подобно электронным регуляторам возбуждения, не имеют зоны нечувствительности и являются практически безинерционными регулирующими аппаратами. Вследствие этого в уравнение (10) нет необходимости вводить время запаздывания действия регулятора, как это, например, делалось при составлении уравнения (8) для электромеханических регуляторов.

Подставляя далее, как и раньше, значение $u_n(t)$ согласно (10) в уравнение (5) и решая его, будем иметь:

$$\Delta E'_d = k u_{n0} \frac{T'_{d\Sigma}}{T_{d0}} \left[\frac{T_s}{T'_{d\Sigma} - T_s} \left(e^{-\frac{t}{T_s}} - e^{-\frac{t}{T'_{d\Sigma}}} \right) + (1 - e^{-\frac{t}{T'_{d\Sigma}}}) \right]. \quad (11)$$

Компаундированный генератор с возбуждением через выпрямители (рис. 2) можно рассматривать как частный случай компаундированного генератора с машинным возбудителем, в котором $T_s = 0$.

Тогда соответственно

$$\Delta E'_d = k u_{n0} \frac{T'_{d\Sigma}}{T_{d0}} (1 - e^{-\frac{t}{T'_{d\Sigma}}}). \quad (12)$$

Пользуясь этими уравнениями и учитывая связь между E'_d и U согласно (1), можно аналитически построить и исследовать кривую изменения напряжения на зажимах генератора во время пуска электродвигателя вплоть до минимального значе-

ния напряжения. Для дальнейшего построения кривой изменения напряжения вплоть до окончания процесса пуска следует пользоваться методом последовательных интервалов; с одной стороны, будет сказываться влияние насыщения и члены $\Delta E'_d$ обусловят искаженные результаты вычислений, с другой стороны, сопротивление двигателя будет заметно возрастать и тем самым переходная постоянная времени $T'_{d\Sigma}$ будет непрерывно изменяться.

Для вычисления ΔU_{\max} нужно знать время, когда э. д. с. E'_d принимает свое минимальное значение. Это время находится обычным путем — приравняв производные от уравнений к нулю. Тогда:

для уравнения (7) при $\Delta E'_d = 0$ (нерегулируемый генератор): $t_{\min} = \infty$;

для уравнения (7) с учетом $\Delta E'_d$ по уравнению (9)

$$t_{\min} = \frac{T'_{d\Sigma} T_s}{T'_{d\Sigma} + T_s} \times \ln \left\{ \frac{[E'_{d0} T_{d0} - (u_{n0} - g) T'_{d\Sigma}] (T'_{d\Sigma} + T_s) + u_{n0} T'^2_{d\Sigma} e^{\frac{h}{T'_{d\Sigma}}}}{u_{n0} T'^2_{d\Sigma} e^{\frac{h}{T_s}} - \frac{h}{T_s}} \right\}; \quad (13)$$

для уравнения (7) с учетом $\Delta E'_d$ по уравнению (11)

$$t_{\min} = \frac{T'_{d\Sigma} T_s}{T'_{d\Sigma} - T_s} \times \ln \left\{ \frac{k u_{n0} T'^2_{d\Sigma}}{[(u_{n0} + k u_{n0} - g) T'_{d\Sigma} - E'_{d0} T_{d0}] (T'_{d\Sigma} - T_s) + k u_{n0} T'_{d\Sigma} T_s} \right\}; \quad (14)$$

для уравнения (7) с учетом $\Delta E'_d$ по уравнению (12) $t_{\min} = 0$.

Вычисление ΔU_{\max} производится в следующем порядке: после определения t_{\min} при этом времени вычисляется $E'_{d\min}$ по уравнению, соответствующему данной системе регулирования, а затем по уравнению (1) определяется $\Delta U_{\max} = 1 - U_{\min}$.

Пользуясь приведенными выше уравнениями, было исследовано влияние на ΔU_{\max} основных параметров генераторов, возбудителей, регуляторов и нагрузки, а именно: индуктивного сопротивления по продольной и поперечной осям генератора X_d и X_q ; переходного индуктивного сопротивления X'_d ; активного сопротивления обмотки статора r_a ; относительного насыщения g ; постоянной времени генератора T_{d0} ; постоянной времени возбудителя T_s ; времени запаздывания действия регулятора h ; коэффициента компаундирования k_k ; эквивалентного сопротивления нагрузки z_g и пускового коэффициента мощности

нагрузки $\cos \varphi_n$. Анализ производился путем изменения в определенных границах какого-либо одного исследуемого параметра и постоянных средних значениях всех остальных параметров.

В качестве средних значений параметров были взяты следующие¹: $X_d = 1,3$; $X_q = 0,7$; $X'_d = 0,2$; $r_a = 0,04$; $g = 0,3$; $T_{d0} = 1$ сек; $T_s = 0,25$ сек; $h = 0,07$ сек; $k_k = 1,25$; $z_g = 0,25$; $\cos \varphi_n = 0,4$.

Исследование показало, что параметры X_q , r_a и g при изменении их в весьма широких пределах почти не влияют на изменение ΔU_{\max} . Также практически не сказывается и $\cos \varphi_n$ в интервале его измерения от 0 до 0,5.

Отсюда следует, что практические расчеты максимального падения напряжения при пуске электродвигателей с высоким коэффициентом соизмеримости можно производить по упрощенным формулам, приведенным выше [см. уравнения (2), (3), (6)], полагая, что включаемый электродвигатель представляет собой чисто индуктивную нагрузку и пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора генератора и его насыщением в уравнениях для определения E'_d и $\Delta E'_d$.

Ошибка при таких упрощенных вычислениях ΔU_{\max} в худшем случае не превосходит 3—3,5 %.

При пуске электродвигателей с небольшим коэффициентом соизмеримости (порядка 0,1) системы с компаундированием возбуждения и системы с электромеханическими регуляторами дают по величине максимального падения напряжения один и тот же эффект ($\Delta U_{\max} \approx 27\%$). При дальнейшем уменьшении мощности пускаемого электродвигателя или при относительно длинных питательных линиях применение систем с электромеханическими регуляторами становится даже более выгодным (рис. 4, д).

С точки зрения сохранения устойчивости включенных потребителей при пуске электродвигателей с коэффициентом соизмеримости 0,2 и выше наиболее благоприятны системы с компаундированием возбуждения.

Оптимальным режимом системы с компаундированием возбуждения при средних эксплуатационных и расчетных параметрах, приведенных выше, является пуск электродвигателей с коэффициентом соизмеримости порядка 0,5 ... 0,65.

В этом диапазоне соизмеримости мощностей расчетное значение ΔU_{\max} составляет:

для компаундирования без машинного возбудителя	44% при $t_{\min} \approx 0$
для компаундирования с машинным возбудителем	52% при $t_{\min} \approx 0,15$ сек
для системы с электромеханическим регулятором	66% при $t_{\min} \approx 0,3$ сек

¹ Сопротивление нагрузки в относительных единицах $z_g = 0,25$ эквивалентно подключению электродвигателя с коэффициентом соизмеримости около 0,6. При этом кратность пускового тока $k_n = \frac{1}{z_g} = 4$.

Однако только одно компаундирование, если учитывать дополнительное снижение напряжения вследствие уменьшения скорости вращения первичного двигателя станции и потерь напряжения в питательной сети, не является достаточно радикальным решением вопроса. Поэтому помимо компаундирования возбуждения, как это следует из аналитического исследования, для еще большего повышения динамической устойчивости передвижных электростанций в указанном режиме их работы необходимо осуществить следующие мероприятия, касающиеся основных параметров существующих генераторов и возбудителей:

1. Снижение, насколько это возможно в конструктивном отношении, переходного сопротивления генератора X'_d .

2. Некоторое снижение синхронного сопротивления генератора X_d (увеличение ОКЗ). Здесь необходимо отметить, что это требование в меньшей степени относится к системе с компаундированием возбуждения и в большей степени к системе с электромеханическим регулятором (рис. 4, а).

3. Увеличение постоянной времени генератора T_d — особенно, если это время меньше 1 сек.

4. Уменьшение постоянной времени возбудителя T_a — особенно, если это время больше 0,4...0,5 сек; одновременно желательно возможно больше увеличить „потолок“ напряжения возбуждения.

Что касается коэффициента компаундирования, то его следует увеличивать только в том случае, если постоянная времени возбудителя значительна (больше 0,3...0,4 сек). При средней постоянной времени возбудителя в 0,25...0,3 сек вполне достаточен нормальный коэффициент компаундирования, при котором обеспечивается номинальное напряжение в двух точках внешней характеристики генератора — при холостом ходе и при номинальной нагрузке с номинальным коэффициентом мощности.

Влияние времени запаздывания действия электромеханических регуляторов относительно невелико. Например, при увеличении его вдвое от средней величины 0,07 сек максимальное падение напряжения увеличивается всего на 4...4,5%.

Расчеты показывают, что соответствующее изменение указанных выше основных параметров в реально осуществимых пределах (например, уменьшение X_d с 1,3 до 1,1, X'_d с 0,2 до 0,11, T_d с 0,25 сек до 0,15 сек и увеличение T_a с 1 сек до 1,3 сек)² может дать дополнительное уменьшение максимального падения напряжения на 10...12%, что уже значительно повышает динамическую устойчивость передвижной станции. При этом вес активных материалов генератора при сохранении того же к. п. д. и тех же тепловых нагрузок увеличивается не более чем на 8...9%.

² Такие параметры имеют лучшие генераторы из исследованных при определении средних параметров.

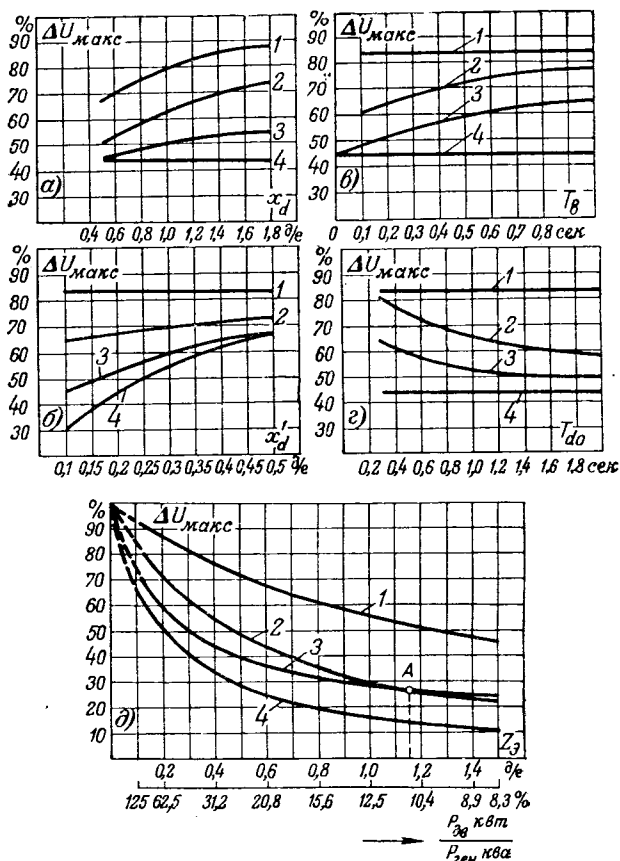


Рис. 4. Влияние основных параметров генератора и нагрузки на величину максимального падения напряжения при пуске электродвигателей соизмеримой мощности (коэффициент соизмеримости порядка 0,6).

1—без регулятора; 2—с угольным регулятором; 3—компаундирование; 4—падение напряжения в момент включения (ΔU_0 при $t=0$).

В виде временной меры для существующих станций с генераторами, имеющими машинный возбудитель, может быть рекомендовано также одновременное применение электромеханического регулятора и простейшего компаундирующего устройства как элемента весьма быстродействующей форсировки возбуждения (рис. 3).

Помимо указанного случая такое комбинированное регулирование особенно целесообразно в таких условиях работы, где одновременно требуется и быстрый пуск двигателей, и высокая точность регулирования напряжения во всех точках внешней характеристики генератора; последнее, как известно, затруднительно получить только при одном компаундировании.

Несомненно, что синхронные генераторы специальных конструкций (например, компенсированные или очень сильно насыщенные), которые здесь не рассматриваются, могут быть построены с такими параметрами, которые обусловят еще более высокую устойчивость станций при пуске электродвигателей соизмеримой мощности.

Приложение. Пример расчета максимального падения напряжения

Требуется определить ΔU_{\max} при пуске короткозамкнутого электродвигателя МА-203-2/4 непосредственно от зажимов ненагруженного генератора ДГС-92,4, снабженного простейшим компаундирующим устройством.

Каталожные данные электродвигателя: $P_{д.н} = 28,5 \text{ кВт}$; $U_{д.н} = 220 \text{ в}$; $\eta = 0,89$; $\cos \varphi_n = 0,89$; $I_n / I_n = 6,5$.

Данные генератора: $P_{г.н} = 62,5 \text{ кВА}$; $U_{г.н} = 230 \text{ в}$; $X_d = 1,32$; $X'_d = 0,214$; $T_{d0} = 0,9 \text{ сек}$; $T_a = 0,33 \text{ сек}$; компаундирование — нормальное.

Расчет произведем по приближенным формулам.

Предварительно необходимо определить: k_k , k_n , k , z_a , $T'_{дэ}$.

1. Коэффициент нормального компаундирования в относительных единицах определяется по уравнению $k_k = E_{дн} - 1$ [Л. 4], где э. д. с. $E_{дн}$ при номинальной нагрузке может быть найдена графически из векторной диаграммы. Практически можно брать $k_k \approx X_d$. В данном случае при определении по векторной диаграмме $k_k = 1,28$.

2. Пусковая кратность тока k_n определяется как отношение пусковой мощности электродвигателя в киловольт-амперах к номинальной мощности генератора в киловольт-амперах по следующей формуле:

$$k_n = \frac{I_n \cdot P_{д.н} (\text{кВт})}{I_n \cdot \frac{h_n \cos \varphi_n}{P_{г.н} (\text{кВА})}} \cdot \left(\frac{U_g}{U_d} \right)^2 = 4,1.$$

3. $k = k_k \cdot k_n = 1,28 \cdot 4,1 = 5,25$.

4. Полагая, что $\cos \varphi_n = 0$, находим $z_a = X_a = \frac{1}{k_n} = \frac{1}{4,1} = 0,244$. Находим по формуле (6) $T'_{дэ} = 0,264 \text{ сек}$.

Далее по формуле (14), полагая, что $E'_{d0} = 1$, $u_{n0} = 1$ и $g = 0$, определяем: $t_{мин} = 0,134 \text{ сек}$.

Затем по уравнениям (7) и (11) при данном $t_{мин}$ определяем:

$$E'_{д мин} = 0,839.$$

Наконец, по уравнению (2)

$$\Delta U_{макс} = 1 - U_{мин} = 1 - \frac{0,244}{0,214 + 0,244} \cdot 0,839 = 0,554,$$

т. е. $\Delta U_{макс} = 55,4\%$.

Литература

1. Н. А. Сазонов. Переходные явления при пуске короткозамкнутых электродвигателей. Электричество, № 12, 1949.
2. И. А. Сыромятников. Режимы работы асинхронных двигателей. Госэнергоиздат, 1950.
3. М. П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть. Госэнергоиздат, 1949.
4. П. С. Жданов. Устойчивость электрических систем. Госэнергоиздат, 1948.
5. Anderson. Изменение напряжения внезапно нагруженных генераторов. GER, № 8, 1945.
6. Harder and Cheek. Регулирование генераторов переменного тока с внезапно приложенными нагрузками. El. Eng., № 6, 1944.

[18. 2. 1952]



Антенный емкостный отбор энергии от линий электропередачи

Кандидат техн. наук В. Д. ЮРЕНКОВ

Москва

Введение. Одним из возможных способов электроснабжения мелких потребителей, расположенных вблизи трассы высоковольтной линии, является антенный емкостный отбор электроэнергии от линий электропередачи.

Сущность этого способа состоит в том, что в электрическом поле проводов линии электропередачи параллельно им помещается изолированный провод (антенна), на котором вследствие электрического влияния наводится напряжение. Это напряжение, в несколько раз меньшее рабочего напряжения линии, с помощью трансформатора понижается до напряжения бытовых токоприемников и энергия антенны используется для электроснабжения потребителей, удаленных от распределительных сетей трехфазного тока.

Выгодность такого способа электроснабжения заключается в том, что вместо повышающего трансформатора на рабочее напряжение линии 110 или 220 кВ применяется трансформатор 6 или 10 кВ, благодаря чему стоимость всего понижающего устройства уменьшается в сотни и даже тысячи раз.

Приводится опыт эксплуатации установок емкостного отбора мощности. Даются выражения для определения потенциала и емкости антенны. Рассматриваются оптимальные условия работы схемы отбора. Приводятся соображения о выборе стандартного трансформатора для емкостного отбора. Дается методика определения токораспределения в схеме и методика расчета установок емкостного отбора.

Сопоставление экономичности питания потребителей, удаленных от электрических сетей, показывает, что антенные установки мощностью, например, 5 кВт становятся

более выгодными, чем такие же по мощности трехфазные устройства, уже при удалении потребителей от распределительной сети 6 или 10 кВ более чем на 15...16 км, а при использовании в качестве антенны грозозащитного троса линии электропередачи — на 2...3 км. Особенно выгодными будут устройства антенного отбора от линии 400 кВ, так как отбираемая мощность возрастает приблизительно пропорционально квадрату напряжения линии.

При использовании в качестве антенны грозозащитного троса мощность, получаемая от 1 км антенны, в установках на одноцепных линиях электропередачи 110 кВ составляет 50...60 Вт, а в установках на двухцепных линиях 110 кВ и одноцепных 220 кВ — 150...160 Вт. В установках с отдельными, расщепленными на три провода антеннами на линиях электропередачи 110 кВ эта мощность равна 200...250 Вт.

В настоящее время в энергосистемах Советского Союза эксплуатируется более 80 установок антенного отбора мощностью от 200 до 500 *вт*. Большая часть их предназначена для освещения монтерских и линейных пунктов. Только отдельные установки имеют мощность 2,5...3,2 *квт*.

Наряду с установками, надежно работающими в течение многих лет, в некоторых установках имеют место повреждения понизительных трансформаторов вследствие недопустимо высокой индукции в стали сердечников (170...190% $B_{\text{ном}}$). Кроме того, большинство установок имеет круто спадающую нагрузочную характеристику, что является одним из наиболее существенных недостатков рассматриваемых устройств.

Анализ аварийности показывает, что за последнее пятилетие (1946—1951 гг.) на линиях электропередачи имели место три аварии, связанные с наличием устройств антенного отбора. Но эти аварии не компрометируют идеи антенного отбора, а лишь доказывают необходимость более ответственного проектирования и выполнения устройств отбора.

Однако проектирование установок отбора затруднено ввиду отсутствия ясности в таких вопросах, как определение напряжения и емкости антенн, установление оптимальных режимов работы антенных схем, расчет схем с учетом насыщения магнитопроводов понизительных трансформаторов, определение роли дросселей, влияние на условия отбора транспонирования линий, учет нестационарных явлений и др.

В настоящей статье рассмотрены результаты исследования некоторых из этих вопросов и приведена методика расчета антенных устройств.

Потенциал и емкость антенны. Схема антенного отбора, основанная на физических представлениях (рис. 1, а), неудобна для технических расчетов. Приведение ее к более удобному виду можно осуществить путем объединения части или всех параллельных ветвей подобно тому, как это делается при расчете сложных сетей с несколькими источниками питания, имеющими разные э. д. с.

В зависимости от тех или иных задач исследования в преобразованной схеме можно выделить или одну ветвь нагрузки, что было предложено Г. Н. Баскаковым [1], или кроме этой ветви выделить еще ветвь собственной емкости антенны относительно земли. Первый вариант схемы (рис. 1, б) позволяет проводить анализ всех стационарных процессов, а второй (рис. 1, в) — анализ и моделирование некоторых переходных процессов.

Эквивалентное напряжение для схемы (рис. 1, б)

$$\dot{U}_s = \frac{\sum_{m=1}^{m=n} \dot{U}_m C_{Am}}{C_{AA} + \sum_{m=1}^{m=n} C_{Am}}. \quad (1)$$

При отсутствии нагрузки ($Z_H = \infty$) \dot{U}_s равно

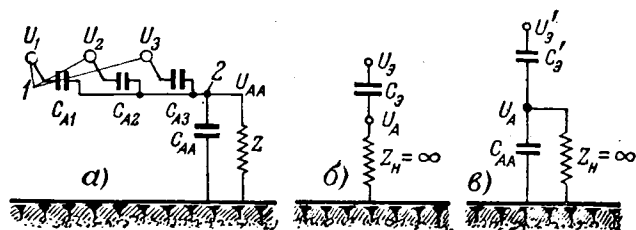


Рис. 1. Схема антенного емкостного отбора мощности.

а — до преобразования; б и в — после преобразования.
1 — провода линии электропередачи; 2 — антенна.

напряжению антенны U_A и может быть измерено прибором.

В случае трехфазной линии ($n=3$) с одной антенной уравнение (1) приобретает следующий вид:

$$\dot{U}_s = \dot{U}_\phi \frac{\Delta_{A1} - 0,5(\Delta_{A2} + \Delta_{A3}) - j0,866(\Delta_{A2} - \Delta_{A3})}{\Delta_{AA}}, \quad (2)$$

где емкости между проводами линии и антенной, а также емкости по отношению к земле заменены алгебраическими дополнениями определителя, составленного из потенциальных коэффициентов первой системы уравнений Максвелла. Эти коэффициенты, как известно, определяются через геометрические размеры соответствующих элементов линии электропередачи.

Заменяя с известным приближением действительные емкости проводов относительно земли и емкости между проводами их средними геометрическими значениями, можно получить расчетную формулу для определения напряжения антенны через геометрические размеры линии электропередачи

$$\dot{U}_A = \dot{U}_\phi \frac{\lg \frac{D_{A1}^2 d_{A2} d_{A3}}{d_{A1}^2 D_{A2} D_{A3}} - jV 3 \lg \frac{D_{A2} d_{A3}}{d_{A2} D_{A3}}}{2 \lg \frac{D_{11} c_p a_{12} c_p}{D_{12} c_p r}}. \quad (3)$$

Обозначения геометрических размеров даны на рис. 2.

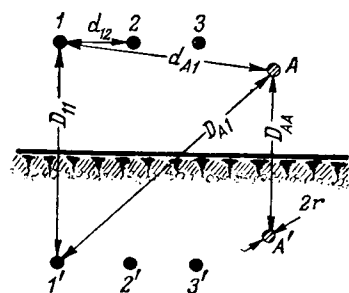
Формула (3) позволяет определить напряжение антенны с точностью 8...12% и может применяться для приближенных расчетов.

Наконец, если построить кривые равного потенциала для типовых линий электропередачи, например, по уравнению (3), то определение напряжения антенны может быть сведено к непосредственному отсчету. Такие кривые для линии

Рис. 2. К определению напряжения антенны через геометрические размеры линии электропередачи.

$$d_{12cp} = \sqrt[3]{d_{12} d_{13} d_{23}},$$

$$D_{11cp} = \sqrt[3]{D_{11} D_{22} D_{33}}.$$



110 кВ с горизонтальным расположением проводов даны на рис. 3.

При наличии на линии электропередачи нескольких антенн они будут оказывать взаимное влияние на величину и фазу их напряжений. Так, при двух антеннах A и B , симметрично расположенных относительно вертикальной плоскости, проходящей через средний провод линии, напряжение одной из антенн может быть определено из следующего выражения:

$$U_A = U_\phi \frac{\left[\Delta_{A1} - 0,5(\Delta_{A2} + \Delta_{A3}) - j \frac{\sqrt{3}}{2}(\Delta_{A2} - \Delta_{A3}) \right] \Delta_{AA} + \left[\Delta_{A3} - 0,5(\Delta_{A2} + \Delta_{A1}) - j \frac{\sqrt{3}}{2}(\Delta_{A2} - \Delta_{A1}) \right] \Delta_{AB}}{\Delta_{AA}^2 - \Delta_{AB}^2} \quad (4).$$

Расчеты и измерения показывают, что если в качестве антенн используются грозозащитные тросы одиночной линии с горизонтальным расположением проводов, то при разземлении одного троса напряжение другого снижается на 8...10%. Это объясняется тем, что электрическое поле разземляемого троса противоположно полю ранее разземленного троса и ослабляет его.

На двухцепных линиях с согласованным шагом транспозиции напряжения разземленных тросов равны по величине и фазе. Напряжение каждого троса при разземлении одного из них обычно возрастает на 20...25%. Напряжение антенн на этих линиях зависит не только от их геометрического расположения по отношению к проводам, но и от наличия напряжения на каждой из цепей, а также от степени изоляции проводов от земли. Напряжение антенны на двухцепной линии для

различных случаев может быть определено из уравнений (5)...(9) приведенных в таблице.

Основными факторами, влияющими на величину напряжения антенны, являются рабочее напряжение линии и расположение антенны относительно проводов. Из рис. 3 видно, что наиболее выгодно размещать антенны с наибольшей несимметрией относительно проводов линии электропередачи. Из этих же кривых видно, что грозозащитные тросы на линиях с горизонтальным

расположением проводов, используемые в качестве антенн, работают в невыгодных условиях так как расположены во впадинах эквипотенциальных кривых. Наоборот, на двухцепных линиях с согласованным шагом транспозиции тросы, расположенные почти в плоскости проводов соответствующих цепей, при использовании их в качестве антенн будут находиться в условиях, близких к оптимальным.

Определение потенциальных коэффициентов по наивысшей или по наинизшей точке провода приводит к недопустимо большим (20...25%) отклонениям от действительного их значения. Поэтому целесообразно провисающий в пролете провод заменить эквивалентным по своему электростатическому влиянию прямолинейным проводом. Такая замена может быть произведена на основании эквивалентности потенциального коэф-

Схема расположения проводов и антенн (тросов)	Расчетные формулы
	$U_B = U_\phi \frac{(\Delta'_{B1} + \Delta''_{B1}) - 0,5(\Delta'_{B2} + \Delta''_{B2} + \Delta'_{B3} + \Delta''_{B3}) - j0,866(\Delta'_{B2} + \Delta''_{B2} - \Delta'_{B3} - \Delta''_{B3})}{\Delta_{BB}} \quad (5)$
	$U_B = U_\phi \frac{\Delta''_{B1} - 0,5(\Delta''_{B2} + \Delta''_{B3}) - j0,866(\Delta''_{B2} - \Delta''_{B3})}{\Delta_{BB}} \quad (6)$
	$U_B = U_\phi \frac{\Delta''_{B1} - 0,5(\Delta''_{B2} + \Delta''_{B3}) - j0,866(\Delta''_{B2} - \Delta''_{B3})}{\Delta_{BB} + \Delta'_{B1} + \Delta'_{B2} + \Delta'_{B3}} \quad (7)$
	$U_B = U_\phi \frac{\Delta'_{B1} - 0,5(\Delta'_{B2} + \Delta'_{B3}) - j0,866(\Delta'_{B2} - \Delta'_{B3})}{\Delta_{BB}} \quad (8)$
	$U_B = U_\phi \frac{\Delta'_{B1} - 0,5(\Delta'_{B2} + \Delta'_{B3}) - j0,866(\Delta'_{B2} - \Delta'_{B3})}{\Delta_{BB} + \Delta''_{B1} + \Delta''_{B2} + \Delta''_{B3}} \quad (9)$

Условные обозначения:

● — провод включенной линии (гепи);
 ○ — провод отключенной линии (цепи);
 Δ_{Bn} — алгебраическое дополнение определителя, составленного из потенциальных коэффициентов первой системы уравнений Максвелла для проводов линии, в котором вычеркнут n столбец и B строка;
 Δ'_{Bn} ; Δ''_{Bn} — индексы, псказывают к первой или второй цепи двухцепной линии относятся алгебраические дополнения Δ_{Bn} .

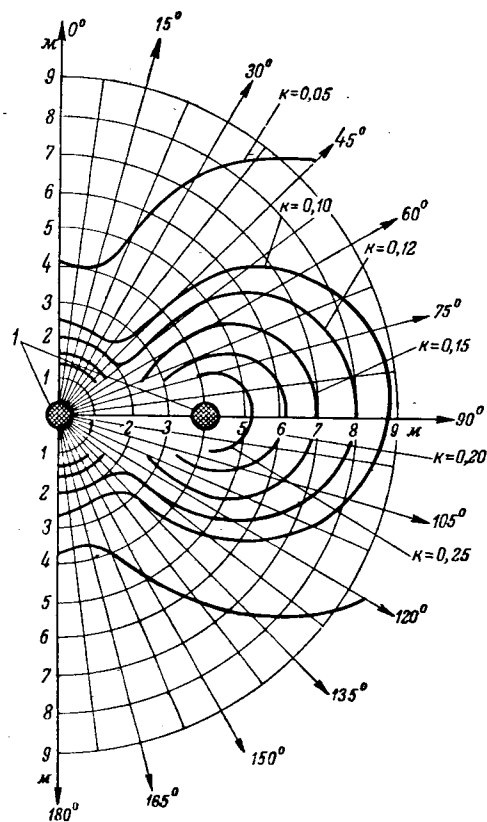


Рис. 3. Эквипотенциальные кривые для линии электропередачи 110 кВ с горизонтальным расположением проводов.

1—провода линии электропередачи; $k = \frac{U_{\text{антенны}}}{U_{\text{фазы}}}$.

коэффициента, соответствующего собственной емкости провода относительно земли. Эта емкость по величине в 1,5...2 раза превосходит сумму остальных емкостей и, следовательно, определяет величину напряжения антенны.

Высота эквивалентного провода

$$h_s = h e^{-0,67 \frac{f}{h}}, \quad (10)$$

где h —высота подвеса реального провода;

f —стрела провеса в середине пролета.

При обычных отношениях $\frac{f}{h}$, находящихся в пределах 0,1...0,6, снижение высоты эквивалентного провода $b = h - h_s$ может быть принято приблизительно равным $0,6f$. Вывод формулы (10) дан в приложении.

Емкость антенны C_a' при точных расчетах определяется из системы уравнений Максвелла. Для практических же расчетов может быть рекомендована следующая приближенная формула:

$$C_a' = \frac{(a_{11cp} + 2a_{12cp})(a_{11cp} - a_{12cp})}{18[a_{AA}(a_{11cp} + 2a_{12cp})(z_{11cp} - a_{12cp}) - a_{11cp}(a_{A1}^2 + a_{A2}^2 + a_{A3}^2)]}, \quad (11)$$

где a_{11cp} —среднее арифметическое из потенциальных коэффициентов, характеризующих собственную емкость проводов линии относительно земли;

a_{12cp} —среднее арифметическое из потенциальных коэффициентов, характеризующих взаимную емкость между проводами.

Погрешность в величине емкости, вычисленной по формуле (11) для типовых конструкций линий электропередачи, не превышает 3...4%.

Для увеличения мощности отбора следует увеличивать емкость антенны, например, путем расщепления последней на несколько проводов. На величину емкости влияют форма и размеры пучка проводов, а также число проводов в нем. Исследования показывают, что наиболее выгодно провода пучка располагать по линиям одинакового потенциала. Однако, если их расположить по окружности или по прямоугольнику, то разница в емкости будет не особенно велика (15...20%).

Оптимальное число проводов в пучке должно определяться для конкретных линий. Расчеты показывают, что брать число проводов в антенне больше четырех при диаметре пучка до 700 мм и больше 5...6 при больших диаметрах нецелесообразно.

Для выяснения вопроса о стабильности емкости антенны при изменении метеорологических условий были поставлены опыты по измерению в течение нескольких месяцев зарядного тока разземленных тросов линий электропередачи. Этот ток при неизменных частоте и напряжении линии пропорционален емкости антенны. В результате опытов было установлено, что изменение емкости антенны определяется в основном изменением влажности воздуха, от которой, как известно, зависит диэлектрическая проницаемость последнего. Колебания емкости в связи с изменением метеорологических условий не превышают 7...7,5%. Изменения температуры, оказывающие влияние на величину стрелы провеса проводов, мало влияют на величину емкости антенны.

Оптимальные условия работы схемы антенного отбора мощности. Расчетная схема антенного отбора (рис. 4,а) состоит из емкостного сопротивления x_a , сопротивления нагрузки r_n , а также активной r_p и реактивной x_p слагающих сопротивления ветви намагничивания схемы замещения понизительного трансформатора. Индуктивностями рассеяния и активными сопротивлениями обмоток можно без особых погрешностей пренебречь. Вначале для удобства анализа схемы индуктивность трансформатора будем считать постоянной.

Для схемы (рис. 4,а) можно написать уравнение напряжений

$$\dot{U}_a = U_n - j(I_a - jI_p)x_p. \quad (12)$$

Из векторной диаграммы, соответствующей уравнению (12) (рис. 4,б), можно заключить, что в схемах емкостного отбора энергии напряжение нагрузки U_n в общем случае может быть и меньше эквивалентного напряжения U_a и больше его.

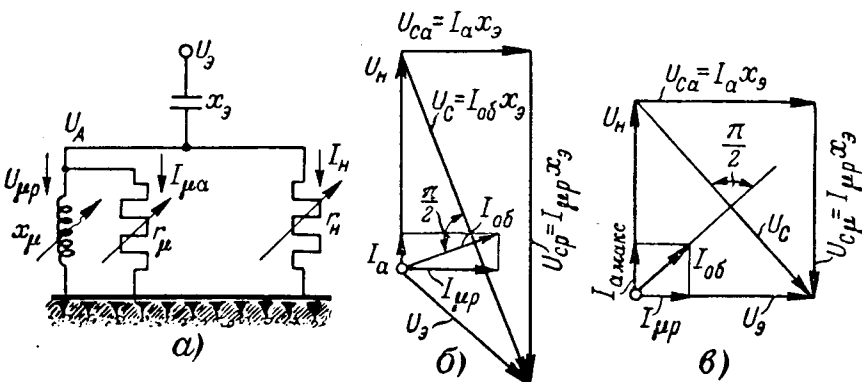


Рис. 4.

а—расчетная схема антенного отбора; б—векторная диаграмма расчетной схемы; в—векторная диаграмма, соответствующая оптимальному режиму установки антенного отбора.

С точки зрения возможности получения максимальной мощности наибольший интерес представляет режим при $x_\mu = x_3$. Векторная диаграмма для этого режима представлена на рис. 4, в.

При этом режиме и при изменении нагрузки от холостого хода до короткого замыкания величина тока в ветви нагрузки остается неизменной и равной $\frac{U_3}{x_3}$, а напряжение на зажимах нагрузки

U_n возрастает от нуля до бесконечно больших значений. Такой режим соответствует своеобразному резонансу тока и является оптимальным для работы антенных схем. При нарушении равенства $x_\mu = x_3$ в результате уменьшения или увеличения x_μ максимально возможная мощность отбора резко снижается. Например, при $x_\mu = 0,5x_3$ (или при $x_\mu = 1,5x_3$) она становится равной $\frac{U_3^2}{x_3}$, т. е. весьма незначительной величине.

Токораспределение в схеме отбора с учетом насыщения стали трансформатора. Для нахождения токораспределения в реальных схемах при практических расчетах удобно пользоваться графоаналитическим способом.

Предварительно необходимо получить зависимость тока намагничивания I_μ и активной мощности P_a от напряжения понижительного трансформатора при холостом ходе. По этим данным строим (рис. 5) кривые $U = \varphi_1(I_{\mu a})$ и $U = \varphi_2(I_{\mu p})$. Затем строим прямую падения напряжения $I_{\mu p}x_3$ и кривую OQP , представляющую собой разность ординат прямой падения напряжения $I_{\mu p}x_3$ и кривой $U = \varphi_2(I_{\mu p})$. Задав произвольно напряжением U_n , меньшим напряжения холостого хода трансформатора установки $U_{n, x}$, найдем на кривой $U = \varphi_2(I_{\mu p})$ точку A и построим линию BC как перпендикуляр из точки A на ось абсцисс. Проведем из точки M , лежащей на пересечении линий BC и QP , дугу радиусом U_3 (в масштабе напряжений) до пересечения с осью абсцисс в точке H . Тогда отрезок CH будет равен падению напряжения $I_a x_3 = (I_{\mu a} + I_n) x_3$. Соединим точки B и H прямой линией и опустим на эту

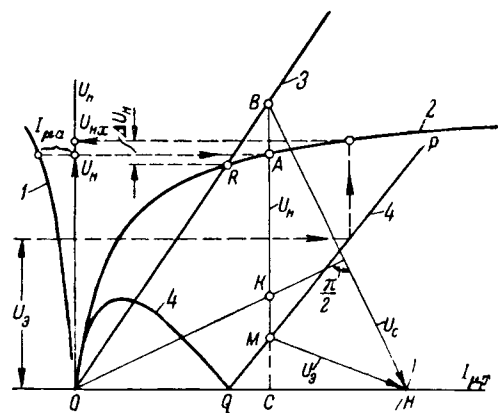


Рис. 5. Графоаналитический метод нахождения токораспределения в схеме отбора с учетом насыщения стали трансформатора.

1. $U = \varphi_1(I_{\mu a})$; 2. $U = \varphi_2(I_{\mu p})$; 3. $I_{\mu p} x_3$; 4. $U - I_{\mu p} x_3 = \varphi(I_{\mu p})$.

линию перпендикуляр из начала координат O . Отрезок CK даст в принятом масштабе величину активного тока схемы I_a .

Справедливость построений, представленных на рис. 5, вытекает из того, что в треугольнике BMH стороны BM и MH равны соответственно U_n и U_3 по построению. Сторона BH должна быть равна U_c , так как она соответствует U_n и U_3 , а также отрезкам $EC = I_{\mu p} x_3$ и $CH = I_a x_3$, т. е. всем элементам треугольника напряжений векторной диаграммы (рис. 4, б).

Треугольник OKC подобен треугольнику токов векторной диаграммы (рис. 4, б), так как его сторона OC в соответствующем масштабе представляет ток намагничивания $I_{\mu p}$ при напряжении нагрузки U_n , а сторона OK по условиям построения соответствует общему току схемы I_{o6} , опережающему вектор падения напряжения U_c на угол $\frac{\pi}{2}$. По току I_a и току $I_{\mu a}$, соответствующему напряжению U_n и взятому из графика $U = \varphi_1(I_{\mu a})$, можно найти ток I_n в ветви нагрузки:

$$I_n = I_a - I_{\mu a}. \quad (13)$$

Для нахождения напряжения потребителей при режиме холостого хода $U_{n, x}$ следует отложить напряжение антенны U_3 на оси ординат и тогда величина $U_{n, x}$ определяется так, как показано на рис. 5 стрелками.

Максимальной мощности соответствует напряжение, определяемое точкой R , в которой индуктивное сопротивление трансформатора $x_{\mu p}$ равно x_3 . Активный ток при этом режиме равен:

$$I_{a \text{ макс}} = \frac{U_3}{x_3}. \quad (14)$$

Таким образом, в схеме с трансформатором, имеющим насыщенный сердечник, имеют место те же соотношения, что и в схеме с постоянной индуктивностью. Однако получить при этой схеме большую мощность нельзя, так как малейшее изменение на-

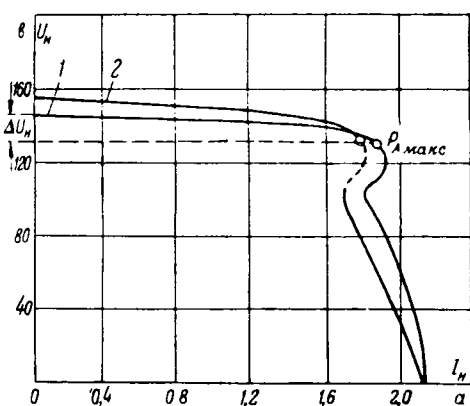


Рис. 6. Нагрузочная характеристика действующей установки емкостного отбора мощности от линии электропередачи 220 кВ.

1 — построена на основании расчетных данных; 2 — снята опытным путем.

пряжения нагрузки изменяет ток намагничивания и выводит схему из оптимального режима работы.

Величина тока нагрузки при коротком замыкании определяется равенством (14), что следует непосредственно из схемы (рис. 4, а).

На рис. 6. показана построенная на основании расчетных данных нагрузочная характеристика (кривая 1) одной из действующих установок антенного отбора энергии от линии электропередачи. Там же приведена нагрузочная характеристика этой установки, снятая опытным путем (кривая 2).

Как видно из рис. 6, нагрузочная характеристика на участке от холостого хода до точки максимальной мощности представляет довольно пологую кривую. Падение напряжения, соответствующее максимальной мощности, равно ΔU_n . После точки максимальной мощности кривая имеет характерную впадину, которая соответствует области неустойчивой работы установки. Глубина и характер этой впадины определяются соотношением между длиной (емкостью) антенны, ее напряжением U_a и параметрами трансформатора.

Действительно, при возрастании нагрузки и перемещении по участку NT кривой намагничивания за точку L (рис. 7) угол α между напряжением нагрузки U_n и напряжением антенны U_a в векторной диаграмме схемы отбора становится меньше $\frac{\pi}{2}$ (рис. 8). Минимальное значение угла α соответствует точке T кривой намагничивания. При дальнейшем возрастании нагрузки и уменьшении U_n угол α опять возрастает до $\frac{\pi}{2}$, как это видно из рис. 9.

На рис. 8 показана зависимость тока нагрузки в конце неустойчивой части нагрузочной характеристики κI_n от напряжения антенны U_a . При уменьшении напряжения антенны, но при неизменной ее длине и том же понизительном трансформаторе угол $\alpha_{мин}$ уменьшается и при некотором напряжении U_{a3} становится равным нулю. Соответственно уменьшается и ток в конце неустой-

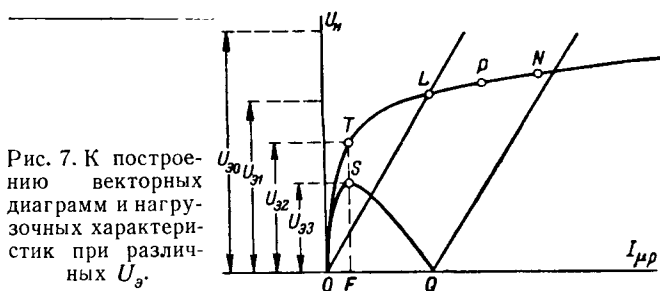


Рис. 7. К построению векторных диаграмм и нагрузочных характеристик при различных U_a .

чивой части нагрузочной характеристики. Этот ток с максимальным током нагрузки связан равенством

$$I_n' = I_n \sin \alpha_{мин}. \quad (15)$$

На рис. 10 представлены нагрузочные характеристики, соответствующие различным U_a , рис. 7. Из рис. 10 видно, что при большом напряжении

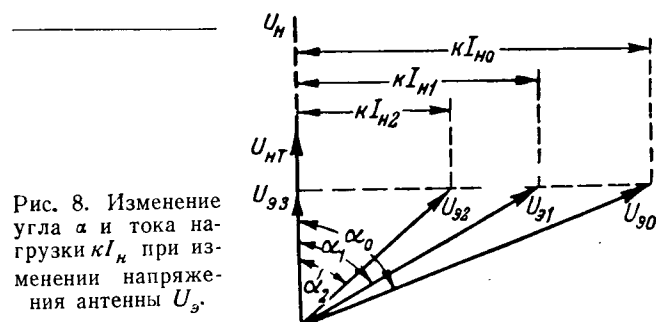


Рис. 8. Изменение угла α и тока нагрузки κI_n при изменении напряжения антенны U_a .

антенны U_{a0} уменьшение тока нагрузки в неустойчивой части характеристики I_{n0} весьма незначительно, и наоборот, при малом напряжении антенны U_{a3} ток I_{n3} уменьшается до нуля. Нагрузочная характеристика в последнем случае распадается на две не связанные между собой части, из которых рабочей является нижняя. Это приводит к тому, что при некоторых соотношениях

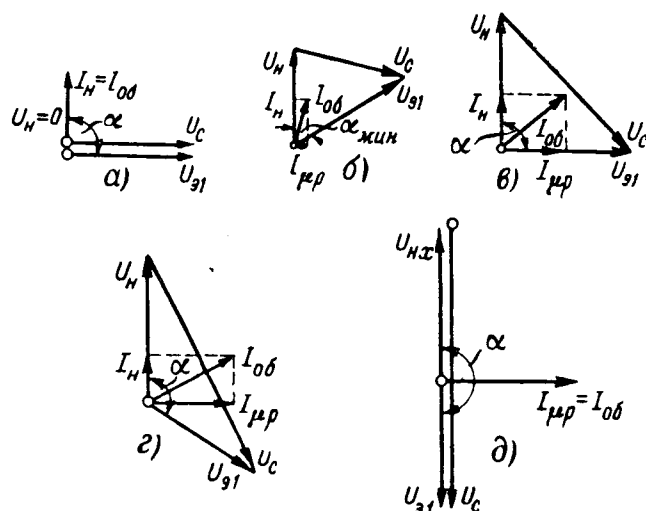


Рис. 9. Векторные диаграммы напряжений и токов установки отбора, соответствующие следующим точкам намагничивания (рис. 7).

а — точке O (короткое замыкание); б — точке T (неустойчивая часть нагрузочной характеристики); в — точке L (максимальная мощность); г — точке P (область рабочей части нагрузочной характеристики); д — точке N (холостой ход).

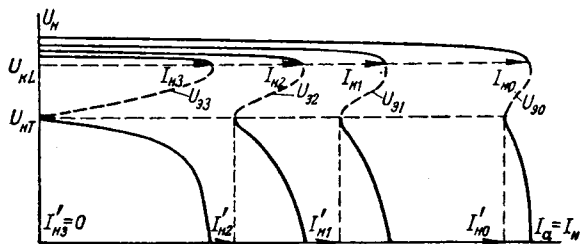


Рис. 10. Нагрузочные характеристики, соответствующие различным напряжениям антенны U_a , показанным на рис. 7.

x_a и U_a одна и та же установка может иметь различные нагрузочные характеристики и разную мощность отбора.

При напряжении антенны U_{a1} (рис. 11) напряжение нагрузки, например, при холостом ходе равно $U_{n.x1}$. Если же напряжение антенны уменьшить до U_{a2} , то соответствующее ему $U_{n.x2}$ будет значительно меньше $U_{n.x1}$. Это объясняется тем, что на кривой 3 (рис. 11) имеется „порог возбуждения“ OBQ и попасть на участок QR этой кривой при напряжении U_{a2} не представляется возможным. Такой режим работы установки можно назвать невозбужденным. Возбудить схему можно лишь путем искусственного возбуждения колебаний в магнитной цепи трансформатора, например, кратковременным закорачиванием его выходных зажимов. При этом происходит „перескакивание“ через вершину участка OBQ кривой 3 и увеличение напряжения холостого хода нагрузки с $U_{n.x2}$ до $U'_{n.x2}$.

При расчете схем отбора целесообразно ввести коэффициент возбуждения, который определяется как отношение отрезка, соответствующего напряжению U_a , к отрезку ED (рис. 11). Это позволит проектировать более экономичные и мощные установки. По данным опытов на модели установки антенного отбора коэффициент возбуждения равен 0,55...0,65.

Проверка приведенного метода расчета на действующих антенных установках и на модели показала его достаточную точность. Разница между напряжениями в рабочей части характеристики, полученными экспериментально и с помощью расчета, не превышает 6...9%. Примерно такая же разница получается и в отношении токов. Таким образом, приведенный метод расчета позволяет определить мощность отбора при умеренных насыщениях стали трансформатора с точностью до 12...17%.

Напряжение у потребителей и мощность отбора. На величину и колебание напряжения у потребителей U_n и ΔU_n можно воздействовать изменением параметров антенны и трансформатора, а также включением дросселей. Наиболее эффективным средством воздействия на напряжение у потребителей U_n и на колебание этого напряжения ΔU_n является уменьшение сечения магнитопровода трансформатора в сочетании с удлинением антенны. Уменьшением сечения достигается уменьшение индуктивности трансформатора и сни-

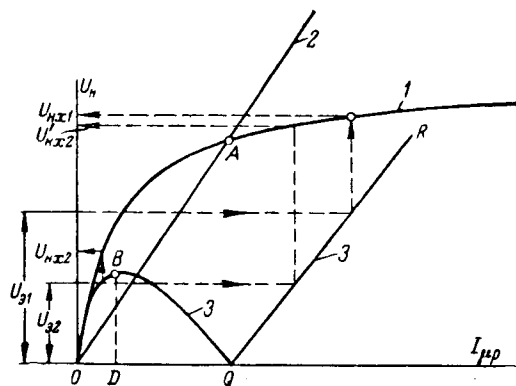


Рис. 11. К определению напряжения холостого хода нагрузки $U_{n.x}$ при различных напряжениях антенны U_a .

1. $U_n = \varphi(I_{np})$; 2. $I_{np}x_a$;
3. $U_n - I_{np}x_a = \psi(I_{np})$.

жение напряжения U_n до желательной величины, а соответствующим выбором длины антенны — нужная величина ΔU_n и отбираемой мощности.

Расчеты и опыты на модели показывают, что стандартный трансформатор в схеме антенного отбора используется при нормальных индукции $B_{ном}$ и токе холостого хода $I_{np.ном}$ очень плохо. Действительно, при этих условиях индуктивное сопротивление трансформатора $x_{np} = x_a = \frac{U_{ном}}{I_{np.ном}}$. Следовательно, получаемая от транс-

форматора мощность, учитывая потери в стали, почти не связана с его номинальной мощностью. Мощность, отбираемая от стандартных силовых и измерительных высоковольтных трансформаторов при нормальной индукции, не превышает 200...300 *вт* и составляет незначительную часть их номинальной мощности. Осуществить при номинальном напряжении этих трансформаторов отбор сколько-нибудь значительных мощностей не представляется возможным.

Улучшить использование стандартных трансформаторов в схеме отбора можно путем повышения индукции в их сердечниках. Но так как при этом повышается напряжение у потребителей, целесообразно так уменьшить сечение сердечников, чтобы индукция в них была предельно допустимой в отношении потерь и температуры трансформатора.

Нормальная индукция в сердечниках мелких измерительных трансформаторов находится в пределах 10...11,5 тыс. *гс*, а в сердечниках мелких силовых — 11...13 тыс. *гс*. Учитывая значительные запасы в отношении температуры стали и масла, индукция может быть увеличена до 14,5...16 тыс. *гс* при условии устройства в магнитопроводах охлаждающих масляных каналов. В случае необходимости повысить индукцию сверх этих значений необходимо производить тепловой расчет или испытание трансформатора.

Другим и притом наиболее целесообразным путем повышения мощности отбора от стандартных трансформаторов является увеличение их

тока холостого хода, что может быть достигнуто увеличением воздушных зазоров в магнитопроводе.

При выборе трансформатора следует учитывать, что при его работе в схеме отбора нагрузка первичной обмотки примерно в 2 раза больше вторичной.

На базе стандартного трансформатора типа ОМ-5/15 автором был построен опытный трансформатор, с помощью которого на модели, имитирующей грозозащитный трос, подвешенный на линии электропередачи 220 кВ, протяженностью 8 км, получена мощность около 5 кВт, т. е. достигнута удельная мощность отбора свыше 600 Вт/км. Разработка специального трансформатора позволит увеличить эту мощность в еще большей степени.

В процессе исследования была выяснена эффективность применения в схеме отбора дросселей, включенных параллельно или последовательно с понизительным трансформатором. Было установлено, что параллельно включенный дроссель уменьшает напряжение нагрузки и мощность отбора и может быть рекомендован лишь при необходимости уменьшить нагрузку первичной обмотки понизительного трансформатора или снизить напряжение у потребителей. Последовательно включенный дроссель с насыщенным стальным сердечником увеличивает напряжение трансформатора и отбираемую мощность, но создает очень высокие насыщения в стали, резко искажает форму кривой напряжения, а также обуславливает весьма низкую способность схемы к самовозбуждению. Это ограничивает возможность широкого применения последовательно включенных дросселей.

Транспонирование линий электропередачи ограничивает возможную длину антенны одним участком цикла транспозиции. Однако в отдельных случаях можно применить транспозицию антенны или тросов на смежных участках цикла и увеличить длину антенны до 2, а иногда и до 3 участков. Наличие транспозиции проводов при стандартном трансформаторе с уменьшенным сечением сердечника или увеличенным током холостого хода ограничивает возможную мощность отбора в одном месте 6...15 кВт на одноцепных линиях электропередачи 220 кВ и 8...15 кВт на двухцепных линиях электропередачи 110 кВ. На линиях 400 кВ эта мощность будет при тех же условиях составлять 35...60 кВт.

Методика расчета установок антенного отбора. Исходными данными для расчета являются величина отбираемой мощности P_a и напряжение токоприемников U_n .

Первым этапом расчета является определение величины напряжения троса или антенны, которое производится по формулам (2)...(9). В антенных установках этому должно предшествовать конструктивное размещение антенны относительно проводов линии электропередачи.

Затем с помощью системы уравнений Максвелла или уравнения (11) вычисляется удельная эквивалентная емкость антенны (троса) C'_a . Для увеличения емкости следует использовать рас-

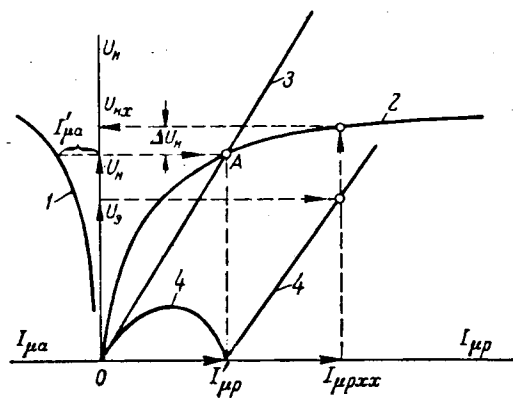


Рис. 12. К определению максимальной мощности, получаемой от трансформатора, длины антенны и числа понизительных трансформаторов.

1. $U = \varphi_1(I_{\mu a})$; 2. $U = \varphi_2(I_{\mu p})$; 3. $I_{\mu p} x_a$; 4. $U - I_{\mu p} x_a = \psi(I_{\mu p})$.

щепление антенны на несколько отдельных проводов.

После определения напряжения антенны U_a и ее емкости C'_a следует перейти к выбору трансформатора. Номинальная мощность стандартного трансформатора должна быть равна не менее чем двойной величине заданной мощности отбора, а номинальное напряжение равно или больше напряжения антенны U_a .

На основании зависимостей $U = \varphi_1(I_{\mu a})$ и $U = \varphi_2(I_{\mu p})$, построенных для выбранного трансформатора¹ и приведенных к ступени низшего или высшего напряжения, следует определить длину антенны и число понизительных трансформаторов. Для этого на оси ординат (рис. 12) откладывается U_n и находится точка А на кривой 2. Через эту точку и начало координат проводится прямая, представляющая собой падение напряжения $I_{\mu p} x_a$. Сопротивление эквивалентной емкости

$$x_a = x_{\mu p} = \frac{U_n}{I_{\mu p}}. \quad (16)$$

Максимальная мощность, получаемая от трансформатора,

$$P_{a. \max} = U_n \left(\frac{U_a}{x_a} - I'_{\mu a} \right) = U_n U_a \omega C'_a - I'_{\mu a}, \quad (17)$$

где $I'_{\mu a}$ — активный ток в намагничивающей ветви трансформатора при напряжении нагрузки U_n . Минимальная длина антенны, обеспечивающая отбор этой мощности, определяется из выражения

$$l = \frac{1}{x_a \omega C'_a k^2}, \quad (18)$$

где k — коэффициент трансформации трансформатора;

C'_a — емкость 1 км антенны.

Если мощность $P_{a. \max} < P_a$, следует проверить возможность повышения мощности, отбираемой от одного трансформатора, путем увеличения

¹ Заводами-изготовителями данные для построения этих зависимостей обычно не публикуются, поэтому их приходится определять опытным путем.

длины антенны и увеличения индукции в сердечнике трансформатора до 14,5...16 тыс. гс при нормальной трансформаторной стали или до 16...17 тыс. гс при холоднокатанной стали. Следует также проверить соответствие тока холостого хода первичной обмотки $I_{\mu p. x}$ сечению провода этой обмотки.

Если эта обмотка оказывается недогруженной, рекомендуется увеличить ток холостого хода трансформатора с таким расчетом, чтобы полностью нагрузить ее.

При использовании этих путей повышения мощности отбора нужно проверить, чтобы напряжение потребителей не увеличивалось значительно против принятого U_n . В противном случае следует увеличить коэффициент трансформации удалением части витков обмотки низшего напряжения.

Отношение

$$n = \frac{P_a}{P_{a \max}} \quad (19)$$

показывает соответствие максимальной мощности $P_{a \max}$, получаемой от одного трансформатора, мощности отбора P_a . При $n > 1$ следует включить параллельно такое число одинаковых трансформаторов, которое равно n , округленному до большего целого числа. В этом случае длина антенны, определенная по формуле (18), должна быть также увеличена в n раз.

На следующем этапе расчета проверяется возбуждаемость схемы отбора. В случае необходимости можно прибегнуть к режиму искусственного возбуждения с коэффициентом не менее 0,7...0,8.

В заключение следует проверить, чтобы падение напряжения в рабочей части нагрузочной характеристики ΔU_n не превосходило (0,1...0,15) U_n .

Ввиду того, что мощность, отбираемая от трансформаторов разного типа различна, рекомендуется провести несколько вариантов расчета установки при разных трансформаторах.

Приложение. Определение эквивалентной высоты подвеса провода. Расположим оси координат, как показано на рис. 13. Искажением поля, вызванным искривлением провода, пренебрегаем, так как провес провода во много раз меньше расстояния между опорами.

Ордината провеса провода y в любой точке пролета может быть выражена через абсциссу x и длину пролета, принятую за единицу, следующим образом:

$$y = x(1-x) \frac{\gamma}{2\sigma}; \quad (I,1)$$

здесь γ — удельная нагрузка провода, кг/мм²·м;

σ — напряжение в материале провода, кг/мм².

Потенциальный коэффициент α_{AA} , определяющий собственную емкость провода:

$$\alpha_{AA} = k \ln \frac{2h}{r}, \quad (I,2)$$

где k — коэффициент электростатической связи;

h — высота точек подвеса провода, м;

r — радиус провода, м.

Выразим коэффициент α_{AA} через высоту провода над землей в точке x , y и определим его среднюю величину:

$$\alpha_{AA \text{ ср}} = k \left\{ \int_0^1 \frac{2h}{r} dx + \int_0^1 \ln \left[1 + \frac{x(x-1)}{h} \frac{\gamma}{2\sigma} \right] dx \right\}. \quad (I,3)$$

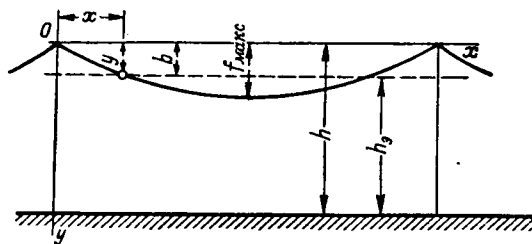


Рис. 13. К определению эквивалентной высоты подвеса провода.

Чтобы определить интеграл, который входит в выражение (I,3), представим его в виде суммы интегралов сходящегося ряда:

$$\begin{aligned} \alpha_{AA \text{ ср}} &= k \left[\ln \frac{2h}{r} \int_0^1 dx + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m-1} \left(\frac{\gamma}{2\sigma} \right)^m \frac{1}{m} \int_0^1 x^m (x-1)^m dx \right] = \\ &= k \left(\ln \frac{2h}{r} - 0,167 \frac{\gamma}{2\sigma h} \right). \end{aligned} \quad (I,4)$$

Из известного выражения для стрелы провеса провода в середине пролета определим значение

$$\frac{\gamma}{2\sigma} = 4f. \quad (I,5)$$

Подставив это значение $\frac{\gamma}{2\sigma}$ в уравнение (I,4), получим:

$$\alpha_{AA \text{ ср}} = k \left[\ln \frac{2h}{r} - 0,67 \frac{f}{h} \right]. \quad (I,6)$$

Коэффициент $\alpha_{AA \text{ ср}}$ может быть выражен через высоту прямолинейного провода:

$$\alpha_{AA \text{ ср}} = k \ln \frac{2h_2}{r}. \quad (I,7)$$

Из уравнений (I,6) и (I,7) находим высоту подвеса эквивалентного провода

$$h_2 = h e^{-0,67 \frac{f}{h}}. \quad (I,8)$$

При вычислении потенциальных коэффициентов вида α_{AB} , определяющих взаимные емкости между проводами, условия эквивалентности электростатического влияния для прямых проводов, строго говоря, будут другими. По аналогии с предыдущим эквивалентную высоту h_{2AB} можно определить из уравнения

$$h_{2AB} = \frac{h_A + h_B}{2} e^{-0,67 \frac{2f}{h_A + h_B}}, \quad (I,9)$$

где h_A — высота подвеса провода A;

h_B — высота подвеса провода B.

В этом случае эквивалентный потенциальный коэффициент

$$\alpha_{2AB} = k \left(\ln \frac{2h_{2AB}}{d_{AB}} + \ln \frac{\sqrt{4h_{2AB}^2 + S^2}}{2h_{2AB}} \right), \quad (I,10)$$

где d_{AB} — расстояние между проводами при одинаковых стрелах провеса;

S — проекция d_{AB} на горизонтальную плоскость.

Погрешность в величине коэффициентов вида α_{AB} , определенных по эквивалентности α_{AA} для типовых конструкций линии электропередачи, как показывают расчеты, очень невелика. Поэтому усложнять расчеты применением уравнений (I,9) и (I,10) не имеет особого смысла.

Литература

1. Г. Н. Баскаков. Емкостный отбор мощности от высоковольтных линий электропередачи. Госэнергоиздат, 1950.

[19. 9. 1951]

Дальняя телефонная высокочастотная связь по линиям электропередачи

Кандидат техн. наук И. К. БОБРОВСКАЯ, кандидат техн. наук Я. Л. БЫХОВСКИЙ, кандидат техн. наук К. П. ЕГОРОВ, инж. Б. С. КЛЕБАНОВ, инж. В. И. МЕДВЕДЕВ, инж. Н. Г. МЯКОЧИНА

Введение. В 1922 г. акад. А. А. Чернышев осуществил высокочастотную телефонную связь по линии электропередачи 110 кВ Кашира—Москва. В дальнейшем благодаря работам В. А. Дьякова,

А. М. Круглякова, В. И. Иванова, М. Н. Пантина и ряда других советских ученых и инженеров этот вид связи стал важнейшим средством диспетчерского управления энергосистемами.

Наибольшее распространение получила отечественная аппаратура типа ДПК, работавшая по методу передачи в линию токов несущей частоты и двух боковых полос при мощности передатчика, равной 5 Вт в телефонном режиме.

Бурный рост энергосистем в послевоенный период, повышение дальности передачи электроэнергии и необходимость значительного увеличения числа каналов как для телефонной связи, так и для телемеханики и защиты — все это потребовало разработки новых типов высокочастотной аппаратуры.

Эта работа была начата лабораторией связи ЦНИЭЛ МЭС в 1945 г. Образцы оконечной аппаратуры для телефонных каналов были разработаны заводом Министерства промышленности средств связи в сотрудничестве с кафедрой дальней связи Электротехнического института связи им. Бонч-Бруевича при участии ЦНИЭЛ. Новой аппаратуре присвоена марка ЭПО-1 (связь по линиям электропередачи, однополосная, на 1 телефонный канал).

Условия связи по линиям электропередачи. Для дальней связи по линиям электропередачи 110 и 220 кВ применяются токи с частотами от 50 до 300 кГц. Переходные затухания между отдельными линиями электропередачи, несущими высокочастотные токи, невелики. Для линий, отходящих от общей подстанции, при включении аппаратуры по схеме фаза—земля переходное затухание составляет около 2 неп. Ввиду этого для связи по различным линиям необходимо использовать различные полюсы частот; повторение частот на линиях одной энергосистемы допустимо лишь в исключительных случаях.

Обеспечение все возрастающих потребностей энергосистем в каналах телефонной связи, защиты и телемеханики возможно лишь при условии весьма экономного использования спектра частот.

Рассмотрены основные данные аппаратуры ЭПО-1, предназначенной для организации каналов высокочастотного телефонирования по линиям электропередачи. Примененный в аппаратуре метод передачи на одной боковой полосе и ряд других усовершенствований позволяют значительно увеличить длину высокочастотных связей, их надежность и степень использования высоковольтных линий для целей телефонирования.

Это обстоятельство является весьма важным при проектировании связи по линиям электропередачи.

Второй, не менее существенной особенностью линий электропередачи, рассматриваемых в качестве

линий связи, являются весьма высокие уровни помех, обусловленных эффектом короны, разрядами на изоляторах и различными переходными процессами. На линиях 110 кВ уровень помех в полосе шириной 2,5 кГц равен—4,85 неп, а на линиях 220 кВ—2,85 неп.

В настоящее время техника связи знает много методов модуляции и детектирования. Наибольшую экономию спектра частот при сохранении относительно высокой помехоустойчивости дает метод, при котором в линию передаются только токи одной из боковых полос амплитудной модуляции; токи же другой боковой полосы и несущий ток подавляются в преобразователях частоты и фильтрах. Этот метод был положен в основу при проектировании аппаратуры ЭПО-1.

Сравнение аппаратуры ЭПО-1 с постами типа ДПК, А-24 и др., работающими по методу передачи в линию тока несущей частоты и двух боковых полос, показывает, что переход на систему с одной боковой полосой позволяет при той же степени влияния помех увеличить затухание линии на 1,05...1,32 неп, что соответствует выигрышу в мощности передатчика в 8...14 раз (в зависимости от глубины модуляции в старых системах).

На рис. 1 показана скелетная схема высокочастотного канала. Затухание линейного тракта может быть определено по приближенной формуле:

$$b = lk \sqrt{f} + 0,8 n + 0,65 + \beta_k l_k, \quad (1)$$

где l —общая длина линии электропередачи, км; $k = 1,3 \cdot 10^{-3}$ для линий 110 кВ и $0,72 \cdot 10^{-3}$ для линий 220 кВ; f —частота, кГц; n —число обходных устройств; l_k —общая длина высокочастотного кабеля на передающем конце и на всех обходных устройствах (обычно около 0,5 км); β_k —километрическое затухание кабеля (от 0,142 до 0,445 неп/км в диапазоне от 50 до 300 кГц).

Для частоты 150 кГц затухание высокочастотного тракта на линиях 110 кВ длиной 200 км с

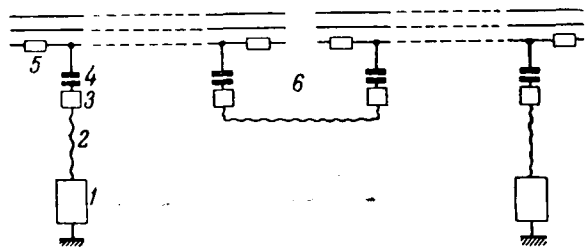


Рис. 1. Скелетная схема высокочастотного канала.

1 — оконечный пост; 2 — высокочастотный кабель; 3 — фильтр присоединения; 4 — конденсатор связи; 5 — высокочастотный заградитель; 6 — обходное устройство.

двумя обходными устройствами составляет около 5,5 *неп*, на линиях 220 *кв* длиной 300 *км* с одним обходом — около 4,2 *неп*.

Если взять за основу линию 220 *кв*, то, считая согласно сказанному выше уровень помех равным 2,85 *неп* и довольствуясь защищенностью 3 *неп* (опыт эксплуатации показывает, что качество приема речи получается при этом хорошее), получим уровень передачи на входе высокочастотного тракта равным +4,35 *неп*, что соответствует мощности передатчика однополосной аппаратуры около 6 *вт*. Необходимость работы на частотах до 300 *кГц* заставляет увеличивать мощность передачи до 9...10 *вт*.

Высокочастотные каналы связи по линиям электропередачи не должны выходить из строя в случае повреждения линий. Благодаря наличию между фазами электромагнитной связи затухание тракта высокочастотной передачи при большинстве повреждений возрастает всего на 2...3 *неп*. Так как при повреждении высокое напряжение с линии электропередачи снимается и уровень помех значительно понижается, связь, при условии создания в аппаратуре достаточно совершенной автоматической регулировки усиления, может работать бесперебойно.

Спектр частот аппаратуры. Аппаратура ЭПО-1 работает в диапазоне частот от 51 до 303 *кГц*. Этот диапазон подразделяется на 84 полосы шириной 3 *кГц* каждая: 51...54 *кГц*, 54...57 *кГц* и так до 300...303 *кГц*. Для осуществления двустороннего телефонного разговора могут быть использованы любые две полосы шириной по 3 *кГц* при условии, что они отстоят друг от друга не менее чем на 12 *кГц*. Настройка аппаратуры является фиксированной, однако в ней предусмотрена возможность производить взаимную перемену местами полос частот приема и передачи. Полоса частот, эффективно передаваемых в тональном диапазоне, находится в пределах от 0,3 до 2,7 *кГц*.

Преобразование разговорных частот осуществляется двумя ступенями. В первой ступени могут применяться несущие частоты: 6, 9, 12, 15 *кГц*. В результате первого преобразования разговорная полоса переносится в диапазоны 3...6, 6...9, 9...12, 12...15 *кГц*.

С помощью второго преобразования разговорная полоса переносится в то место частотного спектра 51...303 *кГц*, которое она должна занимать на линии. Во второй ступени преобразования могут применяться несущие частоты: 66, 78, 108, 120, 150, 162, 192, 204, 234, 246, 276, 288 *кГц*.

На выходе преобразователя полосным фильтром выделяется либо нижняя, либо верхняя боковая полоса. Выбор номиналов несущих частот в двух ступенях преобразования производится в зависимости от того, какие полосы частот должны быть использованы на линии. В приемной части аппаратуры преобразование частот совершается в обратном порядке. Распределение частот аппаратуры ЭПО-1 приведено в таблице.

Частота квари а, кГц	Номера каналов
66	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10
78	5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14
108	15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24
120	19, 20, 21, 22, 25, 26, 27, 28
150	29, 30, 31, 32, 35, 36, 37, 38
162	33, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 42
192	43, 44, 45, 46, 49, 50, 51, 52
204	47, 48, 49, 50, 53, 54, 55, 56
234	57, 58, 59, 60, 63, 64, 65, 66
246	61, 62, 63, 64, 67, 68, 69, 70
276	71, 72, 73, 74, 77, 78, 79, 80
288	75, 76, 77, 78, 81, 82, 83, 84

Примечание. Канал № 1 занимает полосу частот от 51 до 54 *кГц*, канал № 2 — от 54 до 57 *кГц* и т. д. вплоть до канала № 84, который занимает полосу от 300 до 303 *кГц*.

Нормированные положения боковой полосы вводятся в практику связи по линиям электропередачи впервые. Это усовершенствование позволяет серьезно улучшить дело организации связи в больших энергосистемах.

Скелетная схема аппаратуры ЭПО-1 и уровня передачи и приема. Скелетная схема аппаратуры ЭПО-1 изображена на рис. 2.

Разговорные токи, пройдя через контакты реле автоматики и через удлинитель 0,4 *неп* (выключающийся при двухпроводном транзите), поступают через дифференциальную схему ДС на преобразователь 1-й ступени М-1. Этот преобразователь, как и все остальные, собран из купроксов по кольцевой схеме. Несущий ток 6, 9, 12 или 15 *кГц* подается от гармонического генератора ГНЧ с основной частотой 3 *кГц*, стабилизированного кварцем.

На выходе 1-го преобразователя включен полосный фильтр ПФ, выделяющий нижнюю боковую полосу (3...6, 6...9, 9...12, 12...15 *кГц*). Выделенные полосным фильтром токи через промежуточный усилитель ПУС поступают на преобразователь 2-й ступени М-2. Несущий ток к нему подается от кварцевого генератора КГВЧ, настроенного на одну из 12 частот (таблица).

На выходе преобразователя М-2 включен полосный фильтр Ф_{пер}, выделяющий боковую полосу для передачи в линию. Пройдя фильтр Ф_{пер}, токи усиливаются мощным усилителем передачи МУС и через линейный фильтр ЛФ поступают в линию.

При подаче на вход аппаратуры тональной частоты 800 *Гц* с уровнем—1 *неп* уровень, соответствующий боковой частоте на входе в линию, равен +4,6 *неп* (10 *вт*). Благодаря такому высокому уровню передачи разность между уровнем сигнала и средним уровнем помех на приемном конце составляет не менее 3,0 *неп*, при затухании канала связи по линиям 220 *кв* — до 4,45 *неп*, а

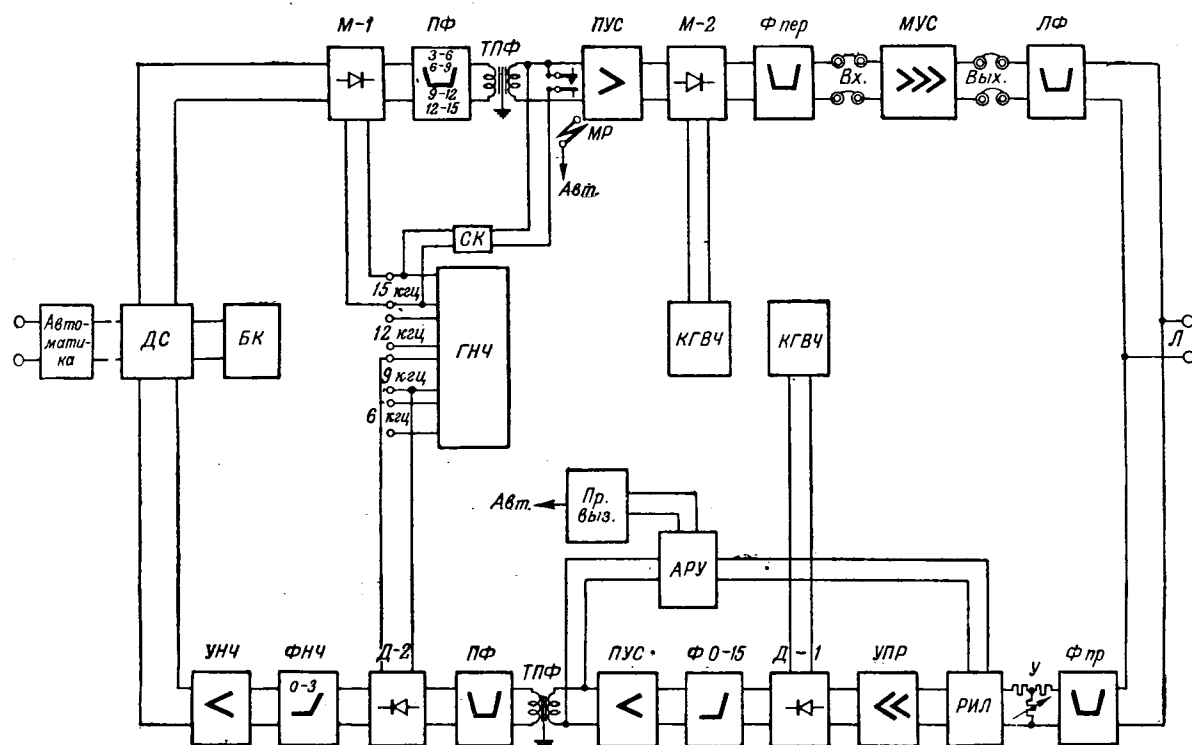


Рис. 2. Скелетная схема ЭПО-1.

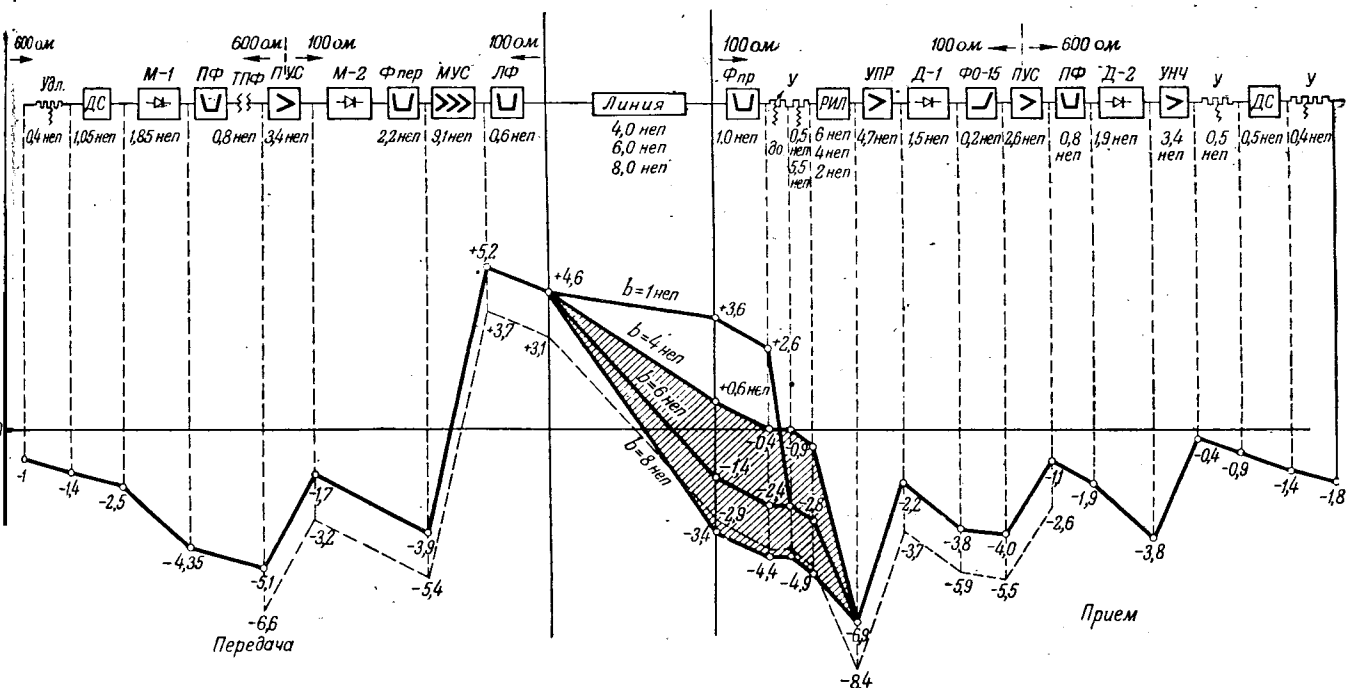


Рис. 3. Диаграмма уровней аппаратуры ЭПО-1.

по линиям 110 кв—до 6,45 неп. Минимальный уровень приема может быть равен—3,4 неп, что обеспечивает в аварийных случаях связь по линии с затуханием до 8 неп.

Приходящие с линии токи поступают в приемную часть аппаратуры через полосный фильтр ЛФ и удлинитель У, затухание которого можно регулировать в пределах от 0 до 5 неп ступенями

по 0,5 неп. С помощью удлинителя У устанавливается нормальный уровень приема на входе регулируемой искусственной линии РИЛ. Суммарное затухание линии и удлинителя должно быть около 6 неп.

Колебания затухания линии в пределах ± 2 неп компенсируются автоматически соответствующим изменением затухания РИЛ, управ-

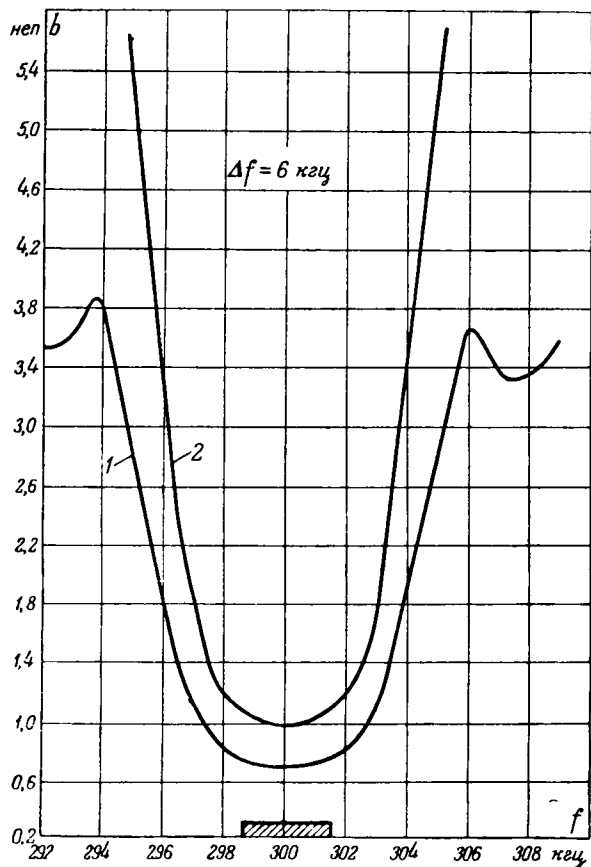


Рис. 4. Характеристика затухания однозвенного (1) и двухзвенного (2) фильтров передачи и приема.

ляемой контрольным током. В качестве последнего используется несущий ток первой ступени преобразования, который подается от ГНЧ в обход первого преобразователя на промежуточный усилитель ПУС. Уровень контрольного тока на входе в линию равен $+3,1$ неп.

Автоматическая регулировка уровня осуществляется путем изменения смещения на купроксах, входящих в схему РИЛ. Пройдя РИЛ и усилитель УПР, токи высокой частоты поступают на приемный преобразователь первой ступени Д-1.

После преобразователя включен фильтр низкой частоты ФО-15, пропускающий частоты до $14,7$ кГц, и промежуточный усилитель приема ПУС.

К выходу ПУС присоединен приемник контрольного тока АРУ. Постоянный ток с выхода этого приемника поступает на РИЛ и управляет ее затуханием в соответствии с изменением уровня контрольного тока, приходящего с линии. К приемнику АРУ включен также приемник вызывных сигналов Пр, выз., на выходе которого находится обмотка вызывного реле.

Разговорные токи через полосный фильтр ПФ поступают на преобразователь второй ступени Д-2, а затем через фильтр низкой частоты ФНЧ, усилитель низкой частоты УНЧ, дифференциальную систему ДС и автоматику — к абоненту.

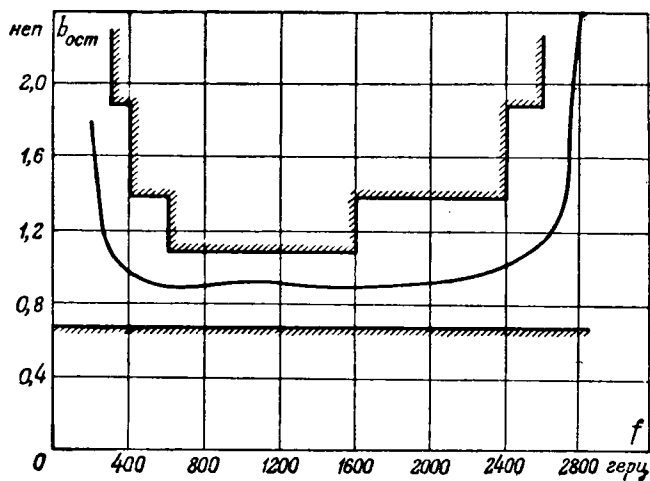


Рис. 5. Характеристика остаточного затухания канала $P_{\text{вх}} = -1,0$ неп.

При помощи УНЧ остаточное затухание канала на частоте 800 гц доводится до величины $0,8$ неп. Этот усилитель дает также возможность корректировать частотную характеристику остаточного затухания. Ряд блоков ЭПО-1, как, например, ГНЧ, УНЧ, некоторые фильтры и др. заимствован из стандартной аппаратуры типа В-3*, что упрощает промышленное освоение аппаратуры ЭПО-1.

Диаграмма уровней по каскадам передающего и приемного трактов аппаратуры ЭПО-1 показана на рис. 3.

Технические данные отдельных блоков и характеристики ЭПО-1. Фильтры передачи, приема а также линейный фильтр выполнены по дифференциально-мостиковой шестизаэлементной схеме. В тракте передачи фильтры однозвенные. Фильтр приема двухзвенный. Ширина полосы пропускания фильтров 6 кГц. Затухание одного звена в полосе пропускания от $0,25$ до $0,3$ неп в нижней части диапазона и до $0,6$ неп в верхней части.

Характеристика затухания одного из фильтров показана на рис. 4.

В фильтрах всех каналов применяется один и тот же набор индуктивностей. Перестройка фильтров производится путем замены емкостей.

Мощный усилитель передачи МУС обеспечивает подъем уровня на $8,7$ неп. Неравномерность частотной характеристики во всем диапазоне не превышает $\pm 0,05$ неп. Первые две ступени МУС на лампах 6АС7 являются усилителями напряжения на сопротивлениях. Третья, выходная ступень, являющаяся усилителем мощности, выполнена по двухтактной схеме на лампах П-50. Анодное напряжение на МУС подается только с момента снятия трубки абонентом или после получения сигналов вызова и снимается при отбое.

Характеристика остаточного затухания канала показана на рис. 5. Регулировочная характеристика канала, показывающая изменение уровня на выходе приемной части аппаратуры при

* В. Н. Амарантов и Г. В. Старицын. Трехканальная аппаратура высокочастотного телефонирования типа В-3. Связьиздат, 1950.

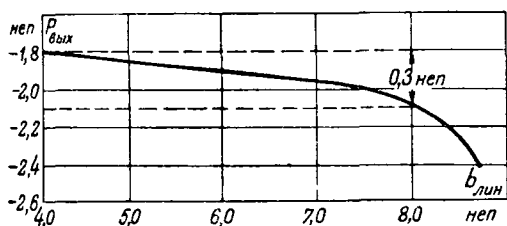


Рис. 6. Регулировочная характеристика канала.

изменении затухания линии от 4 до 8,5 *неп*, представлена на рис. 6.

Автоматика и электропитание аппаратуры ЭПО-1. Автоматика аппаратуры ЭПО-1 служит для осуществления автоматического избирательного вызова абонентов, включенных в канал высокочастотной связи по линиям электропередачи. Абонентам обеспечиваются те же удобства и простота пользования связью, которыми располагают абоненты обычных автоматических телефонных станций.

Все абоненты, включенные в один канал связи, имеют номера от 0 до 9, с тем чтобы вызов их мог производиться при помощи набора одной цифры. Перепринемному устройству присваивается один из этих 10 номеров. При вызове абонента соседнего канала набираются две цифры: номер перепринемного устройства и номер абонента соседнего канала. При вызове абонента, включенного через один канал, набираются три цифры и т. д.

К оконечной аппаратуре ЭПО-1 можно присоединить трех абонентов, которыми могут быть как обычные аппараты АТС, так и коммутаторы или приборы автоматического четырехпроводного переприма. В последнем случае предусматриваются специальные комплекты «телефонных» реле, которые могут быть смонтированы или в самой аппаратуре, или вне ее.

Указанные функции выполняются устройством автоматики, состоящим из 35 реле типа РМ, двух поляризованных реле типа РП-5 и одного искателя типа ШИ-11. Релейный комплект каждого абонента состоит из трех реле. Поляризованные реле использованы для манипуляции контрольной частоты в передатчике и для приема сигналов вызова, набора номера и отбоя в приемнике.

В спокойном состоянии аппаратуры передатчик выключен, выход контрольной частоты в тракт передачи закорочен контактами поляризованного реле, и приемник находится в состоянии максимальной чувствительности.

При снятии микрофонной трубки одним из абонентов происходит занятие канала посылой в линию контрольной частоты передатчиком вызывающей установки. В приемниках вызываемых установок происходит автоматическая установка уровня и срабатывает поляризованное реле приема, подготавливающее цепь звукового сигнала занятию. Вызывающий абонент получает сигнал готовности к набору номера. Набор номера производится перерывами посылки контрольной

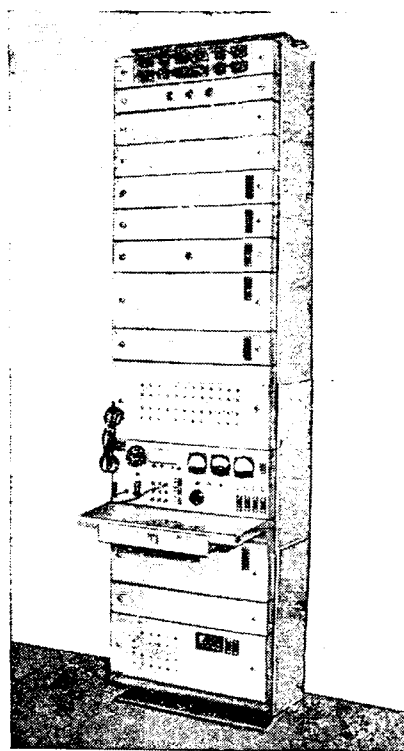


Рис. 7. Общий вид аппаратуры ЭПО-1.

ной частоты с помощью поляризованного реле в тракте передачи. Во время набора номера работа автоматической регулировки уровня (АРУ) не нарушается, так как соответствующая регулировка постоянных времени делает АРУ независимой от импульсов набора.

После набора номера включается передатчик вызванной установки, и абоненту периодически посылается вызывной сигнал переменного тока 50 *пер/сек*. С этого момента вызывающий абонент получает звуковой сигнал контроля посылки вызова, прекращающийся после снятия трубки вызванным абонентом. После разговора, при отбое, прекращается посылка в линию контрольных частот, т. е. происходит полное освобождение канала (двусторонний отбой). При этом абонент, не положивший еще трубку, блокируется и слышит звуковой сигнал отбоя.

Все служебные звуковые сигналы осуществляются посылкой абоненту звуковой частоты по той же паре проводов, которая используется для разговора.

Для контроля за работой автоматики в аппаратуре ЭПО-1 предусмотрена специальная контрольно-переговорная плата, состоящая из телефонного аппарата ЦБ-МБ и коммутационной панели. Телефонный аппарат может быть включен как в сторону аппаратуры вместо одного из абонентов, так и в сторону любого из них для проверки линии. Пользуясь гнездами коммутационной панели, можно включить линию любого абонента, выключить полностью дифференциальную систему низкой частоты, включить вход передатчика и выход приемника на отдельные выводы.

На коммутационной панели установлено реле, переключающее вход передатчика и выход приемника на четырехпроводную схему для автоматического переключения. В схеме автоматики предусмотрена возможность осуществления переключения устройства, состоящего из двух реле на каждое направление переключения.

Устройство аварийной сигнализации об отсутствии питающих напряжений постоянного тока 24, 220 и 450 в состоит из трех реле типа РМ. Сигналы подаются на световое табло и на внешнюю сигнализацию, питающуюся от независимого источника.

Питание всех реле и искателя автоматики осуществляется от селенового выпрямителя 24 в. Ток нагрузки доходит до 1,5 ... 1,75 а. Питание микрофонов абонентских аппаратов производится от отдельного селенового выпрямителя 48 в через катушки абонентского реле. Все напряжения постоянного и переменного тока, необходимые для работы ЭПО-1, получаются от блока электропитания, смонтированного в нижней части стойки. На блок подается переменный ток 50 гц напряжением 110, 127 или 220 в. Благодаря применению феррорезонансных стабилизаторов допустимые коле-

бания напряжения сети лежат в пределах—20.. +10%. Мощность, потребляемая из сети, составляет около 700 ватт.

Конструктивное оформление. Все оборудование аппаратуры ЭПО-1 размещено на стандартной стойке размерами 2500×650×400 мм. Конструкция всех узлов, кроме блока питания, МУС и АТС, выполнена по блочной системе. Общий вид аппаратуры ЭПО-1 показан на рис. 7.

Линейные испытания. Аппаратура ЭПО-1 испытывалась на линии 220 кв длиной 207 км. При выбранных частотах настройки 231 и 255 кГц затухание канала связи было 4,1 ... 4,3 неп. Уровень линейных помех в полосе шириной 2,5 кГц составлял от —3,0 до —2,2 неп. Кроме аппаратуры ЭПО-1, к конденсаторам связи были присоединены посты телемеханики, работавшие на частотах 165 и 281 кГц; влияние между каналами не ощущалось. Испытания дали положительные результаты в смысле качества передачи речи и надежности связи.

Опытные образцы ЭПО-1 переданы в постоянную эксплуатацию.

[19.10. 1951]



К вопросу о механизме импульсного разряда в длинном промежутке

Кандидат техн. наук В. П. ЛАРИОНОВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Большое значение для создания теории лидерного разряда имеют выяснение механизма развития ступеней и установление величины продольных градиентов потенциала в канале лидера. Исследователи расходятся в оценках величины градиентов. Это приводит к значительному различию между выдвигаемыми ими теориями. Явление ступенчатости лидера не получило еще удовлетворительного объяснения.

Описываемые ниже опыты по искусственному созданию ступеней в лидерной стадии разряда позволили расширить наши сведения о природе ступенчатости и экспериментально оценить величины средних продольных градиентов потенциала в канале лидера¹.

Излагается метод искусственного создания ступеней в лидерной стадии разряда и объясняется механизм их образования. Показывается, что искусственно созданная ступень в своих проявлениях аналогична главному разряду. Приводятся результаты измерения средних продольных градиентов потенциала в канале лидера.

Искусственные ступени. Схема опыта представлена на рис. 1. Источником напряжения служил импульсный генератор на 3 млн. в с емкостью в ударе 3660 пф

На выход импульсного генератора через тормозящее сопротивление R_m [Л. 1] включался искровой промежуток, верхним электродом которого служил заостренный стержень.

Внизу на заземленном медном поле Π устанавливалась на изоляторах металлическая плоскость Π_u , к которой присоединялся измерительный кабель. На другом конце кабель замыкался на омический делитель, напряжение с которого подводилось к пластинам явления осциллографа, записывающего лидерный ток. Общее сопротивление делителя и сопротивление, включенное между плоскостью Π_u и полем Π , равнялись по величине волновому сопротивлению кабеля z_k .

Напряжение на разрядном промежутке измерялось посредством емкостного делителя напряже-

¹ Настоящая работа представляет собой сокращенное изложение части диссертации, выполненной автором в 1949—1950 гг. под руководством Л. И. Сиротинского.

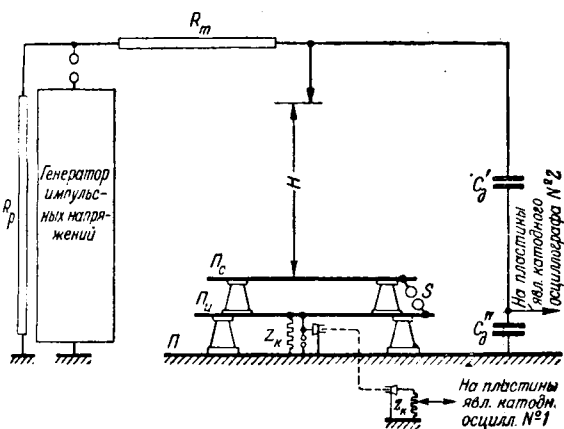


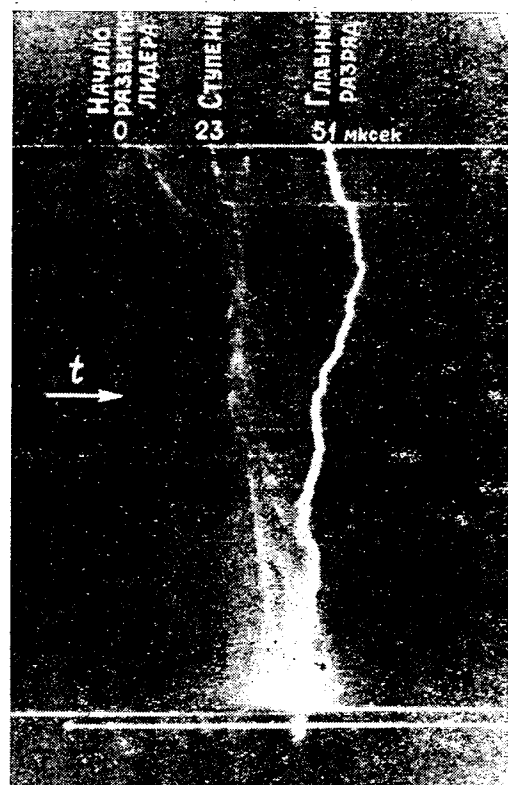
Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

ния. Опыты производились при минимальном напряжении, достаточном для образования разряда. Для записи фоторазверток разрядов применялась быстровращающаяся фотокамера барабанного типа, дававшая линейную скорость развертки до 120 м/сек [Л. 2]. Ступень в положительном лидере создавалась посредством плоскости Π_c , соединенной с измерительной плоскостью Π_u через шаровой разрядник S .

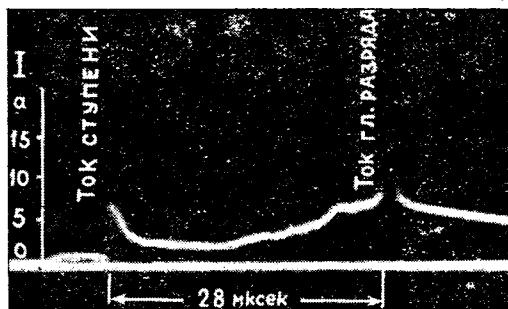
Плоскость P_c , находясь в электрическом поле развивающегося лидера, приобретает потенциал, величина которого растет по мере приближения к ней головки лидера. Разрядник S пробивается когда разность потенциалов между плоскостью P_c и соединенной с заземленным полем плоскостью P_u достигает величины его разрядного напряжения. Это приводит к уменьшению расстояния между головкой лидера и землей или, другими словами, к увеличению емкости канала лидера по отношению к земле. В результате должно произойти резкое уменьшение потенциала головки лидера, так как заряд последней не может измениться скачкообразно. Влияние оказывается главным образом на головку канала, потому что она расположена ближе к земле, обладает наибольшей плотностью зарядов и наименьшим возрастом ионизации [Л. 3]. Напряжение вдоль канала лидера резко возрастает, что вызывает протекание по нему кратковременного тока большой величины, дающего на фоторазвертке разряда яркую полосу свечения (ступень).

На рис. 2 показана фоторазвертка разряда с искусственно созданной ступенью и соответствующая ей осциллограмма лидерного тока. Пик тока в момент возникновения ступени, как и во время развития главного разряда, вышел за пределы экрана катодного осциллографа. Ток большой величины приводит канал лидера в дуговое состояние, характеризующееся увеличением ионизации и значительным снижением его сопротивления.

Дальше происходит перераспределение напряжений на элементах разрядной цепи (тормозящее сопротивление, канал лидера, воздушный промежуток), и канал разряда приходит опять в равновешенное состояние. Напряжение на разрядном промежутке резко снижается.



a)



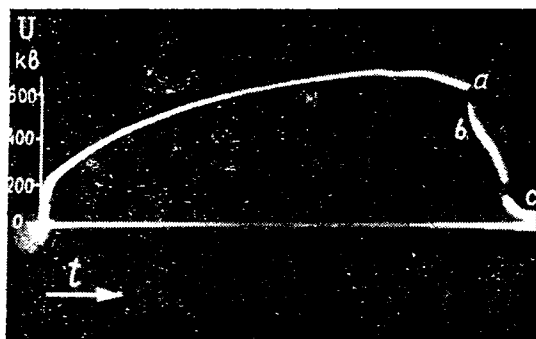
6)

Рис. 2. Фоторазвертка разряда с искусственно созданной ступенью в лидере (а) и соответствующая ей осциллограмма лидерного тока (б).

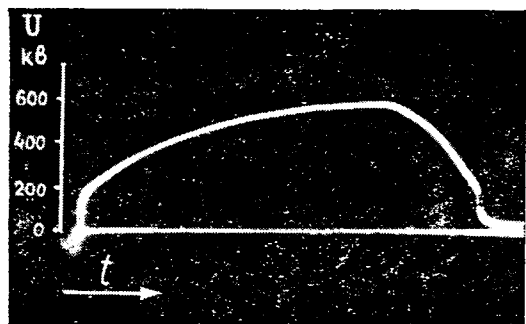
Воздушный промежуток стержень—плоскость; $H=185$ см;
 $R_m = 72\,000$ ом.

На рис. 3, *а* показана осциллограмма напряжения на промежутке для разряда со ступенью, а на рис. 3, *б* для сравнения приведена аналогичная осциллограмма для разряда без ступени.

Вследствие уменьшения продольных градиентов потенциала в канале потенциал головки лидера и напряженность электрического поля перед ней имеют теперь большую, чем прежде, величину. Качественно это можно заметить по изменению характера развития лидера: появление большого количества коротких ярких ветвей и свечение в окружающем лидер пространстве, свидетельствующее о бурной ионизации воздуха перед головкой канала, а количественно — по



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы напряжения на разрядном промежутке.

a — разряд с искусственно созданной ступенью в лидере (ab — срез напряжения, вызванный ступенью); b — разряд без ступеней в лидере. Воздушный промежуток стержень — плоскость; $H = 200$ см; $R_m = 303\,000$ ом.

росту величины лидерного тока (рис. 2) и резкому увеличению скорости лидера (рис. 4).

Устанавливая шаровой разрядник S на разные разрядные напряжения, можно произвольно менять момент возникновения ступени в лидере. На рис. 5 показана фоторазвертка разряда со ступенью, созданной незадолго до главного разряда. Можно также получать произвольное



Рис. 5. Фоторазвертка разряда с искусственно созданной ступенью в лидере. a — начало развития лидера; b — ступень; c — главный разряд. Воздушный промежуток стержень — плоскость; $H = 200$ см; $R_m = 400\,000$ ом.

число ступеней в лидере, устанавливая несколько плоскостей, соединенных разрядниками. По мере развития лидера шаровые разрядники последовательно пробиваются. В момент пробоя каждого из разрядников возникает ступень. На рис. 6 дана фоторазвертка разряда с двумя ступенями в лидере. Первая ступень, созданная на ранней стадии развития лидера, когда влияние пробоя между шарами S относительно невелико, получилась менее интенсивной, чем вторая.

Ступени такого же типа, как и вышеописанные, можно создать, закорачивая в некоторый момент развития лидера тормозящее сопротивление R_m или часть его. Очевидно, и в этом случае образование ступеней объясняется скачкообразным повышением напряжения на лидерном канале.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что искусственно создаваемые ступени в своих проявлениях аналогичны главному разряду. В самом деле: 1) развитие ступени, так же как и главного разряда, происходит в результате скачкообразного понижения потенциала головки канала разряда; 2) распространение ступени, как и главного разряда, сопровождается протеканием в канале разряда тока повышенной величины; 3) напряжение на разрядном промежутке резко снижается при распространении ступени, как и во время главного разряда; 4) распространение свечения ступеней положительного лидера происходит в том же направлении, что и развитие глав-

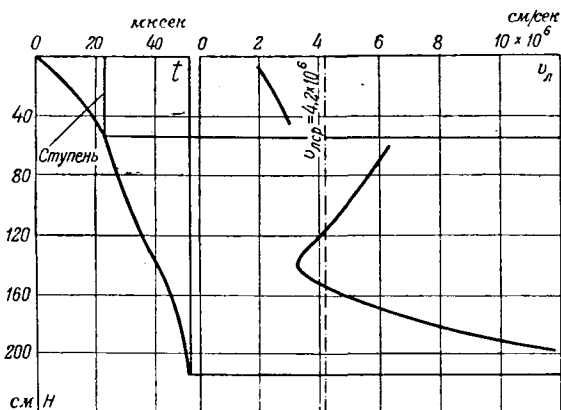


Рис. 4. Изменение скорости головки лидера при движении ее вдоль разрядного промежутка (для фоторазвертки рис. 2).

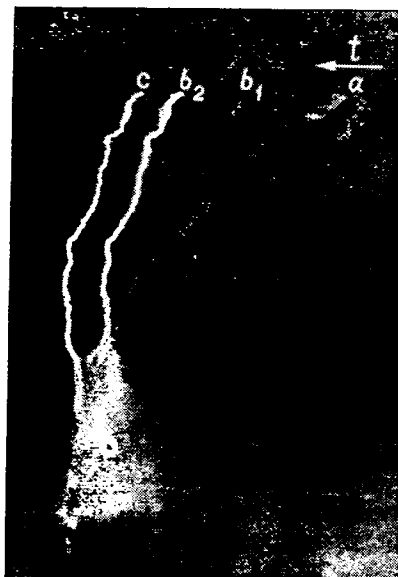


Рис. 6. Фоторазвертка разряда с двумя искусственными ступенями в лидере.

a — начало развития лидера; b_1 и b_2 — ступени; c — главный разряд. Воздушный промежуток стержень — плоскость;

$H = 125 \text{ см}$; $R_m = 400 \ 000 \ \text{ом}$.

ного разряда; 5) скорости ступеней весьма близки к скоростям главного разряда. На фоторазвертках ступени почти параллельны главному разряду.

Продолжительные ступени слабой интенсивности, наблюдавшиеся в положительных лидерах при включении емкости параллельно разрядному промежутку, имеют, по видимому, в основе механизма своего образования также повышение напряжения вдоль лидерного канала. Характерно, например, что при этих условиях в промежутке стержень — стержень на плоскости возникает лишь одна ступень, продолжающаяся, как это четко видно на фоторазвертке рис. 7, до главного разряда. Время возникновения этой ступени во всех случаях совпадает с началом развития встречного стримера. Механизм образования ее представляется следующим образом. По мере развития лидера происходит увеличение напряженности электрического поля на кончике стержня, установленного на плоскости. Когда напряженность поля достигает ионизационной величины, с нижнего стержня навстречу лидеру начинает расти стример. Рост вторичного стримера приводит к увеличению емкости лидера по отношению к земле и, следовательно, к снижению потенциала головки и возникновению ступени. Процесс увеличения емкости и снижения потенциала головки лидера продолжается вплоть до встречи лидера и стримера, т. е. до момента главного разряда, поэтому мы всегда получаем одну непрерывную ступень.

В этих опытах емкость, включенная параллельно разрядному промежутку, поддерживает потенциал верхнего электрода, способствуя большему повышению напряжения вдоль канала лидера. Характерно, что ступени такого рода, как и искусственные ступени, распространяются в

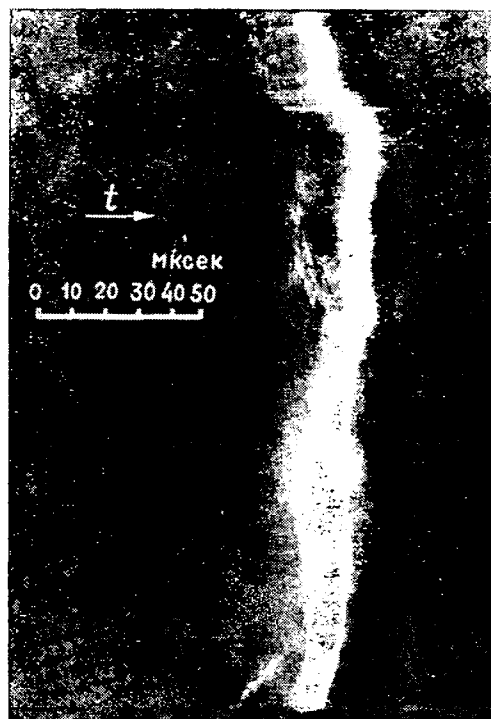


Рис. 7. Фоторазвертка разряда при включенной параллельно промежутку емкости. Воздушный промежуток стержень — стержень на плоскости;

$H = 200 \text{ см}$; $R_m = 300 \ 000 \ \text{ом}$.

направлении главного разряда и имеют скорости на один порядок величин больше, чем лидер [Л. 2]; возникновение их сопровождается протеканием в канале разряда тока повышенной величины (рис. 8).

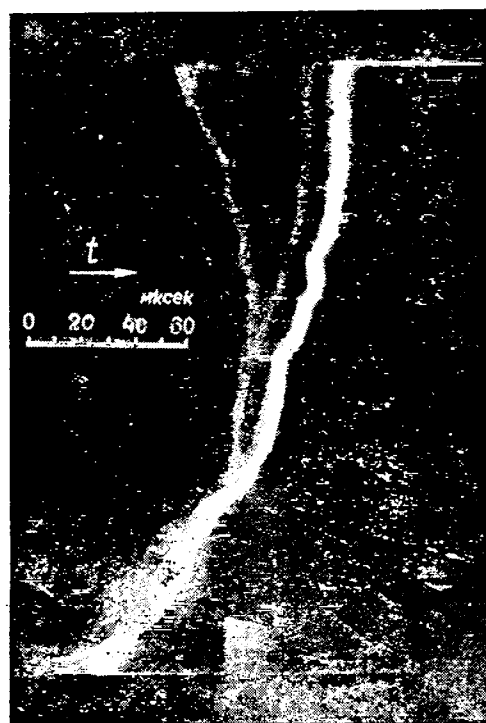
Средние продольные градиенты потенциала в канале лидера. Рассмотрим подробнее осциллограмму напряжения на искровом промежутке для разряда с искусственной ступенью в лидере (рис. 3, a). Напряжение U_a , соответствующее точке a осциллограммы, представляет собой сумму произведения среднего градиента потенциала вдоль канала лидера E_a на длину лидера в момент возникновения ступени l_a и потенциала головки лидера относительно земли φ_2 :

$$U_a = E_a l_a + \varphi_2. \quad (1)$$

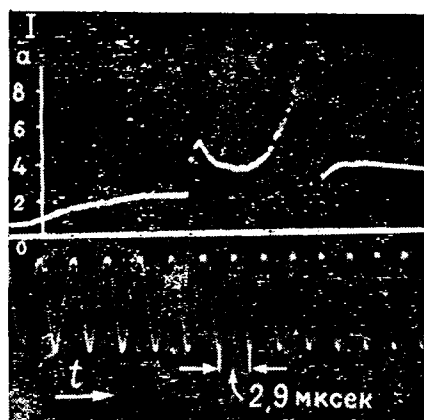
Учитывая, что ступень, как и главный разряд, приводит канал лидера в состояние повышенной проводимости, мы можем записать:

$$U_b = E' l_a + \varphi'_2, \quad (2)$$

где U_b — напряжение, соответствующее точке b осциллограммы, нижней точке среза напряжения на промежутке, вызванного ступенью; E' — средний градиент потенциала в канале разряда сразу же после возникновения ступени; φ'_2 — потенциал головки лидера после прохождения ступени.



а)



б)

Рис. 8. Фоторазвертка разряда в промежутке стержень—стержень на плоскости (а) и соответствующая осциллограмма лидерного тока (б). Параллельно разрядному промежутку включена емкость.

$H = 200 \text{ см}$; $R_m = 140\,000 \text{ ом}$.

Из уравнений (1) и (2) получаем выражение для среднего продольного градиента в канале лидера:

$$E_A = \frac{(U_a - U_b) + E' l_A + (\varphi'_2 - \varphi_2)}{l_A}. \quad (3)$$

Разность потенциалов $(U_a - U_b)$ оценивалась по осциллограммам напряжения (рис. 3, а). Следует заметить, что определение положения

точки b вызывало затруднение, так как при переходе от среза напряжения во время ступени к напряжению, остающемуся на промежутке после ее прохождения, на осциллограммах не имеется такого же резкого излома, как в точке a . За точку b принималась точка пересечения двух касательных, проведенных к кривой напряжения в точке a и на участке кривой после точки b .

Длина лидера в момент возникновения ступени l_A определялась по соответствующим фоторазверткам с учетом искривлений пути разряда. Во всех опытах l_A составляла приблизительно половину длины пути разряда ($H = 200 \text{ см}$).

Величина градиента E' зависит от ионизации канала разряда током ступени. Интенсивности свечения ступени длиной в половину промежутка на фоторазвертках почти такая же, как интенсивность свечения главного разряда (рис. 5). Это позволяет говорить об одинаковом порядке токов протекавших в обоих случаях. Значит, приблизительно градиент E' можно найти по напряжению на дуге, возникающей после главного разряда (участок c осциллограммы рис. 3, а). Найденный таким образом градиент E' оказался равным, в среднем, 250 в/см и мало изменяющимся в зависимости от величины тормозящего сопротивления в цепи разряда, что вполне естественно, так как в диапазоне $R_m = 140 \dots 400 \text{ тыс. ом}$, в котором производились измерения, величина тока главного разряда имеет один и тот же порядок ($60 \dots 30 \text{ а}$). Указанное значение $E' = 250 \text{ в/см}$ было принято при подсчетах E_A .

Выше отмечалось, что после прохождения ступени потенциал головки лидера повышается по сравнению с величиной, имевшейся до возникновения ступени. Это означает, что $(\varphi'_2 - \varphi_2) > 0$. Если считать, что φ'_2 не превосходит φ_2 и членом $(\varphi'_2 - \varphi_2)$ можно пренебречь, то значение средних продольных градиентов в канале лидера с уменьшением можно определять по формуле

$$E_A \approx \frac{(U_a - U_b) + E' l_A}{l_A}. \quad (4)$$

Градиенты E_A были измерены при разных величинах тормозящего сопротивления в цепи разряда. При уменьшении R_m от 400 до 140 тыс. ом E_A падает от ~ 1600 до $\sim 1200 \text{ в/см}$. На рис. 9 представлена кривая зависимости средних продольных градиентов в канале лидера E_A от величины тормозящего сопротивления в цепи разряда R_m для разрядов с электрода положительной полярности. Кривая построена по средним значениям из 7...22 измерений.

Для того чтобы выяснить изменение средних градиентов потенциала в канале положительного лидера в результате прохождения по нему ступени, в лидере создавались две ступени. Одна из них была предварительной; с помощью второй измерялись градиенты в лидере. Эти опыты непосредственно подтвердили снижение средних

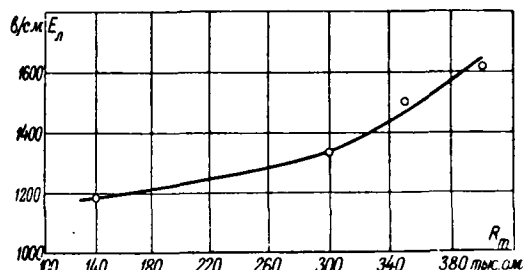


Рис. 9. Средние градиенты потенциала вдоль канала положительного лидера E_d в зависимости от величины тормозящего сопротивления в цепи разряда R_m .

градиентов потенциала в канале лидера в результате прохождения по нему ступени. Эксперименты также показали, что по мере дальнейшего (после прохождения ступени) развития лидера градиенты потенциала в его канале опять возрастают.

В одной из серий опытов при $R_m = 300$ тыс. ом градиенты измерялись в среднем через 5,2 мксек после возникновения ступени и оказались равными в среднем 1073 в/см, т. е. на 20% меньше измеренных при отсутствии предварительной ступени. Аналогичные измерения, произведенные через вдвое большее время после ступени, дали для E_d большую величину. На рис. 10 представлены средние градиенты потенциала в канале лидера в зависимости от времени измерения их после прохождения ступени. Из полученной зависимости видно, что через 15...20 мксек после прохождения ступени в канале лидера восстанавливались градиенты, которые существовали в нем до возникновения ступени (1320...1350 в/см).

В лидере отрицательного разряда можно искусственно создать ступени тем же методом, что и в положительном лидере. Моментам возникновения ступеней в этом случае также соот-

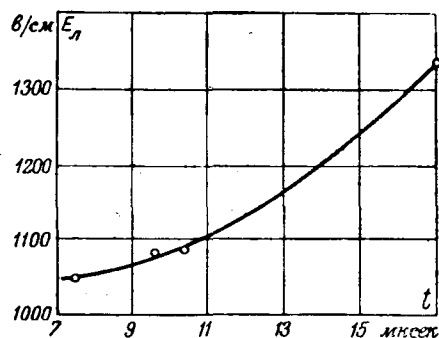


Рис. 10. Средние продольные градиенты в канале положительного лидера в зависимости от времени измерения их после возникновения ступени.
 $H = 170$ см; $R_m = 300$ (0) ом.

ветствуют взбросы лидерного тока и скачкообразные снижения напряжения на разрядном промежутке. Оценка величины средних продольных градиентов потенциала в канале отрицательного разряда была сделана при тормозящем сопротивлении $R_m = 175$ тыс. ом. Оказалось, что в отрицательном лидере продольные градиенты при равных условиях (длина промежутка 200 см, минимальное напряжение, достаточное для образования разряда) на 35...40% превосходят величины градиентов в положительном лидере.

Литература

1. И. С. Стекольников. Работы Академии наук и ВЭИ по изучению молнии в 1936 г. Электричество, № 2, 1937.
2. А. А. Акопян, В. П. Ларионов и Д. В. Разигов. Экспериментальное исследование индуцированных напряжений на модели линии. Электричество, № 11, 1950.
3. В. С. Комельков. Исследование импульсных искровых разрядов. Электричество, № 9, 1940.

[16. 4. 1951]



К расчету магнитных проводимостей поля вблизи воздушного зазора

Кандидат техн. наук, доц. Б. К. БУЛЬ

Московский энергетический институт им. Молотова

Точность расчета электрического прибора, аппарата или какого-либо другого электроме­ханизма, имеющего магнитную цепь, во многом за­висит от точности рас­чета магнитных проводи­мостей поля «выпучивания» вблизи воздушных промежутков. Эти проводимости в ряде случаев составляют значительную часть от полной про­водимости магнитной цепи. В то же время точное определение их представляет большие трудности ввиду трехмерности поля.

Для определения проводимости воздушного зазора широко используются кривые Шмиделя [Л. 11] — кривые коэффициентов, учитывающих поле «выпучивания» в зависимости от его вели­чины и ширины или длины полюса. Эти кривые построены для определения проводимости в случае расположения полюсов «полюс — полюс» и «полюс — плоскость». Пользование кривыми и расчет проводимостей с их помощью исключительно просты и удобны. Поэтому не удивительно, что они получили очень большое распространение [Л. 1—8].

Однако анализ, проведенный автором, показы­вает, что кривые не удовлетворяют ни принципу

Дается обоснование построенных автором расчетных кривых для определения магнитной проводимости воздушных зазоров с учетом координат поля «выпучивания». Приводятся уравнения для определения расчетных размеров полюса. На магнитных цепях реальных конструкций определяются координаты поля. Подвергаются критике широко распространенные кривые Шмиделя [Л. 11].

подобия магнитных си­ тем, ни методу зеркал­ ных изображений. Авт также провел исслед­ вание по этому вопро­ и построил расчет­ ные кривые, точно отвеча­ ющие требованиям подоб

и зеркального изображения. Рассмотрим сна­ чала кривые Шмиделя.

Если сфотографировать построенную в плас­ тике чертежа картину магнитного поля, а за­ тем ее увеличить, допустим в 5 раз, то магни­ ная проводимость на единицу длины ($b=1$, рис. 1) от этого не должна увеличиться, так как шири­ на полюса a и величина воздушного зазора δ уве­ личились в одно и то же число раз. Другое полу­ чается, если воспользоваться кривыми Шмиделя. Для примера возьмем $a_1=4$ мм и $\delta_1=3$ мм. Согласно кривой [Л. 2] для случая «полюс — плас­ кость» получим удельную проводимость $g_1=3,2$. При увеличении линейных размеров (мм) в 5 раз, когда $a_2=5a_1=20$ и $\delta_2=5\delta_1=15$, получим $g_2=2,1$ и $\frac{g_1}{g_2}=\frac{3,2}{2,1}=1,52$.

В действительности же это отношение долж­ но быть равным единице. Следовательно, погрешность составляет 52%. Для случая расположения «полюс — полюс» погрешности достигают также зна­ чительных величин.

Проверка по методу зеркальных изображений также дает несовпадение. Для случая «полюс — плоскость» удельная проводимость g_1 долж­ на быть в два раза больше проводимости g_2 при за­ зоре 2δ для «полюс — полюс». Так, для «полюс — плоскость» при $a=2$ мм и $\delta=1$ мм проводи­ мость $g_1=5$, а для «полюс — полюс» при $a=2$ мм и $2\delta=2$ мм проводимость $g_2=2,1$. Отноше­ ние $\frac{g_1}{g_2}=5/2,1=2,38$; погрешность составляет 19%.

Вместе с тем простое графическое построение картины магнитного поля показывает, что про­ водимости с граней сильно зависят от координат поля x' , x'' , y' и y'' или z'_a , z''_a , z'_b , z''_b и (рис. 1). Кривые же Шмиделя этого не учитывают.

Автор произвел сравнение проводимостей подсчитанных с учетом координат поля «выпучивания», с проводимостями, определенными по кривым

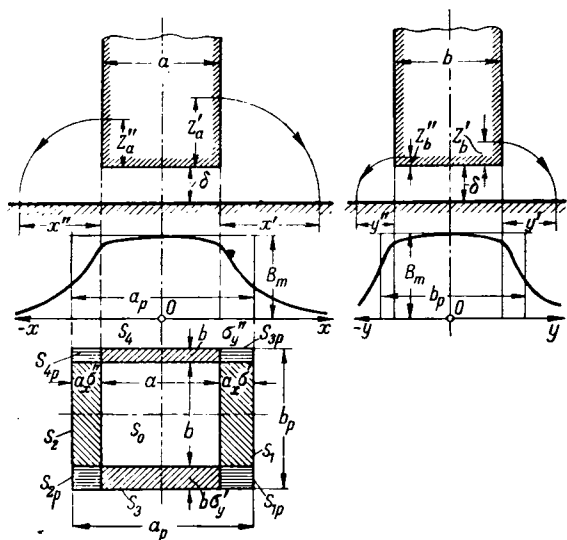


Рис. 1. К определению расчетных размеров полюсов.

вым Шмиделя. Оказалось, что кривые Шмиделя дают при определенных значениях координат большие погрешности. При $x' = 0,2a$ появляется отрицательная погрешность порядка 60%, а при $x' \approx 7a$ — положительная, достигающая до 50%. Наименьшая ошибка получается при $x' \approx 0,66a$. Кривые Шмиделя учитывают проводимость с граней только частично.

Автор же строил расчетные кривые коэффициентов с учетом координат поля вблизи зазора и в качестве основного расположения полюсов взял „полюс—плоскость“, а все другие виды расположения привел к этому случаю.

Случай „полюс—плоскость“. Наличие воздушного зазора между полюсом и плоскостью делает поле вдоль осей x и y неравномерным (рис. 1). Под серединой полюса поток максимальный, а к краям он убывает. Заметное ослабление поля происходит за пределами полюса (рис. 1). Однако под торцом полюса при отношении ширины полюса a к воздушному зазору δ , равном двум и больше, поле можно считать равномерным [Л. 13].

Прокоординируем магнитное поле, выходящее из каждой грани и входящее в ферромагнитную плоскость. Координаты z'_a, z''_a, z'_b и z''_b определяют выходящие из боковых граней a и b потоки¹. Эти координаты строго связаны с координатами x', x'', y' и y'' (рис. 2). Для того чтобы определить полную проводимость воздушного зазора, необходимо найти расчетные размеры полюса a_p и b_p . Для этой цели площадь, ограниченную кривой поля в воздушном зазоре и осью x , заменим равновеликой с высотой, равной максимальной индукции B_m и основанием a_p (рис. 1). Аналогично поступаем и в направлении оси y . Таким образом, сложное магнитное поле, распределенное вдоль осей x и y , заменим равномерно распределенным с той же максимальной индукцией. С граней и „ребер“ расчетных полюсов нет потока „выпучивания“.

В этом случае магнитный поток

$$\Phi = B_m a_p b_p = B_m S_p. \quad (1)$$

Расчетные размеры полюсов:

$$a_p = a'_p + a''_p \text{ и } b_p = b'_p + b''_p. \quad (2)$$

где

$$a'_p = \frac{a}{2} + \delta \frac{m'_a}{n_a} = \frac{a}{2} + a\sigma'_x;$$

$$a''_p = \frac{a}{2} + \delta \frac{m''_a}{n_a} = \frac{a}{2} + a\sigma''_x; \quad (3)$$

$$b'_p = \frac{b}{2} + \delta \frac{m'_b}{n_b} = \frac{b}{2} + b\sigma'_y;$$

$$b''_p = \frac{b}{2} + \delta \frac{m''_b}{n_b} = \frac{b}{2} + b\sigma''_y. \quad (4)$$

¹ Часть потоков с граней условно называем потоком „ребер“.

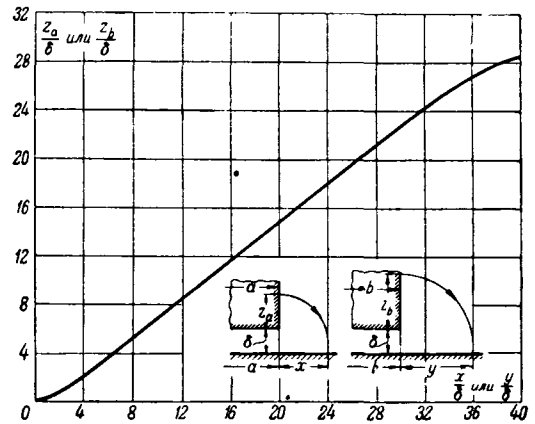


Рис. 2. Зависимость между координатами поля выпучивания.

Здесь m'_a, m''_a, m'_b, m''_b и n'_a, n''_a, n'_b, n''_b — соответственно числа элементарных и единичных трубок с граней a и b ; $\sigma'_x, \sigma''_x, \sigma'_y$ и σ''_y — коэффициенты, учитывающие увеличение размеров полюса за счет потоков с граней.

$$\sigma'_x = \frac{\delta}{a} g'_x = \frac{\delta}{a} \frac{m'_a}{n_a}; \quad \sigma''_x = \frac{\delta}{a} g''_x = \frac{\delta}{a} \frac{m''_a}{n_a}; \quad (5)$$

$$\sigma'_y = \frac{\delta}{b} g'_y = \frac{\delta}{b} \frac{m'_b}{n_b}; \quad \sigma''_y = \frac{\delta}{b} g''_y = \frac{\delta}{b} \frac{m''_b}{n_b}; \quad (6)$$

где g'_x, g''_x, g'_y и g''_y — удельные магнитные проводимости соответствующих граней.

Если теперь определить удельные магнитные проводимости графически [Л. 2, 6] или аналитически [Л. 12, 13], то легко будет найти и расчетные размеры полюса. Пользуясь аналитическим методом, автор построил расчетные кривые коэффициентов σ_x и σ_y в зависимости от относительной величины координат $\frac{x}{\delta}$ или $\frac{y}{\delta}$ при различных значениях $\frac{a}{\delta}$ или $\frac{b}{\delta}$ (рис. 3).

Расчетные размеры полюса и полная проводимость получаются при этом:

$$a_p = a(1 + \sigma'_x + \sigma''_x); \quad b_p = b(1 + \sigma'_y + \sigma''_y); \quad (7)$$

$$G = \frac{S_p}{\delta} = G_0(1 + \sigma'_x + \sigma''_x)(1 + \sigma'_y + \sigma''_y),$$

$$G_0 = \frac{ab}{\delta}. \quad (8)$$

Цифровые значения по вертикальной оси рис. 3 отложены для $2\sigma_x$ и $2\sigma_y$. Из рис. 1 можно найти соответственно проводимости с граней и „ребер“:

$$G_1 = \frac{S_1}{\delta} = G_0\sigma'_x; \quad G_2 = G_0\sigma''_x; \quad G_3 = G_0\sigma'_y;$$

$$G_4 = G_0\sigma''_y; \quad (9)$$

$$G_{1p} = \frac{S_{p1}}{\delta} = G_0\sigma'_x\sigma'_y; \quad G_{2p} = G_0\sigma''_x\sigma''_y;$$

$$G_{3p} = G_0\sigma'_x\sigma'_y; \quad G_{4p} = G_0\sigma''_x\sigma''_y. \quad (10)$$

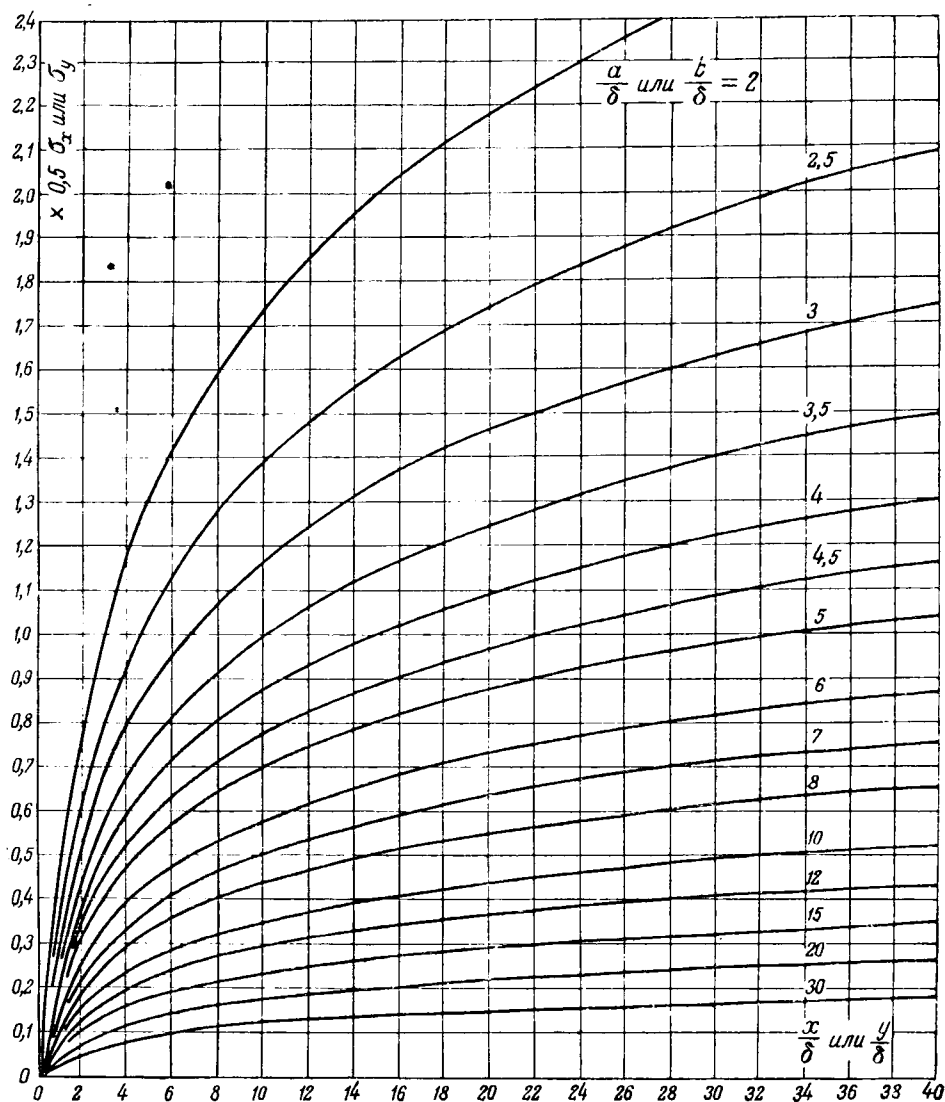


Рис. 3. Расчетные кривые для определения коэффициентов поля вблизи зазора по координатам x и y .

Расположение „полюс—полюс“. Пользуясь методом зеркального изображения, легко получить проводимость для случая „полюс—полюс“. Обозначая величину воздушного зазора между двумя полюсами равного сечения через $\delta_0 = 2\delta$, имеем:

$$G = \frac{1}{2} G_0 (1 + \sigma'_x + \sigma''_x) (1 + \sigma'_y + \sigma''_y), \quad (11)$$

где значения σ'_x , σ''_x , σ'_y и σ''_y определяются из кривых рис. 3 для $\delta = \frac{\delta_0}{2}$, т. е. берем $\frac{2a}{\delta_0}$; $\frac{2b}{\delta_0}$; $\frac{2x}{\delta_0}$ и $\frac{2y}{\delta_0}$.

В заключение рассмотрим определение координат поля вблизи зазора для реальных магнитных систем.

На рис. 4,а представлена магнитная цепь электромагнита, у которого поле, несмотря на простоту конструкций, очень сложно и трехмерно. Найдем (приблизительно) поле «выпучивания» у воздушного зазора δ_0 . Для левого полюса магнитная проводимость определяется по уравнению

(11), где с правой стороны его имеем „полюс—плоскость“, с левой — „полюс—полюс“. Значение σ'_x находится по $\frac{a}{\delta_0}$ и $\frac{x'}{\delta_0} = \frac{c}{2\delta_0}$. Значение же σ''_x определяется по $\frac{2a}{\delta_0}$ и $\frac{2x_a}{\delta_0}$. Величина $\sigma'_y = \sigma''_y$ определяется по $\frac{2b}{\delta_0}$ и $\frac{2x_a}{\delta_0} = \frac{2x_b}{\delta_0}$ (рис. 2).

Принятая нами картина поля для расчета проводимостей хорошо подтверждается спектром и железных опилок, полученным на подобной магнитной системе [Л. 10].

На рис. 4,б показано определение потока вблизи зазора у магнитной системы индукционного прибора с экраном, причем рассматриваются только те потоки, которые пронизывают диамагнитный диск. Расчетные размеры всего полюса a_p и b находятся согласно (7).

Значения σ'_x можно определить по $\frac{2x_a}{\delta_0}$, используя кривую рис. 2 и $\frac{2a}{\delta_0}$. Величина же σ''_x определяется по $\frac{2x''}{\delta_0}$ и $\frac{2a}{\delta_0}$.

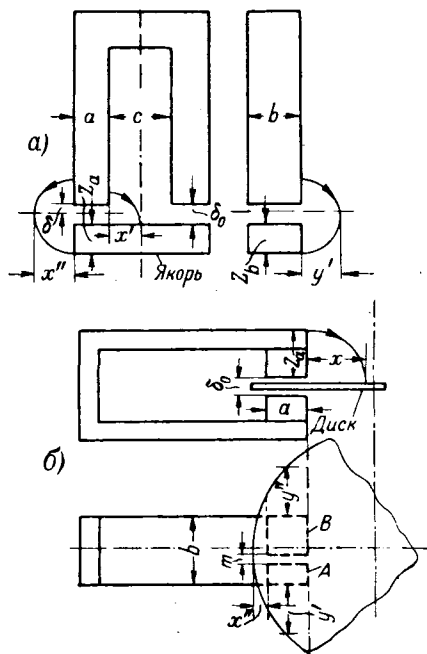


Рис. 4. К определению координат поля вблизи зазора.

Для определения $\sigma'_y = \sigma''_y$ берем $\frac{2b}{\delta_0}$ и $\frac{2y'}{\delta_0} = \frac{2y''}{\delta_0}$, так как диск относительно магнитопровода расположен симметрично.

Для определения величины вращающего момента индукционной системы [Л. 9] разобьем расчетный полюс на два (А и В) и учтем еще

проводимости прилегающих к пазу сторон этих полюсов.

За счет этого выпучивания ширина полюса А увеличивается на $b_A \sigma''_{yA}$, ширина полюса В — на $b_B \sigma'_{yB}$; σ''_{yA} определяем по $\frac{2b_A}{\delta_0}$ и $\frac{2m}{\delta_0}$, σ'_{yB} по $\frac{2b_B}{\delta_0}$ и $\frac{2m}{\delta_0}$.

Литература

1. А. Я. Буйлов. Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946.
2. Теория, расчет и конструирование электроизмерительных приборов. Под ред. Н. Н. Пономарева. Госэнергоиздат, 1943.
3. Н. Н. Шумиловский. Электрические счетчики. Расчет и конструкция. КУБУЧ, 1932.
4. Н. А. Лившиц, Д. В. Спицын и А. В. Данилин. Теория и расчет элементов автоматических систем. Реле. ГОНТИ, 1939.
5. В. О. Арутюнов. Расчет и конструкции электроизмерительных приборов. Госэнергоиздат, 1949.
6. Б. С. Сотсков. Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры. Госэнергоиздат, 1950.
7. А. М. Сенкевич. Постоянные магниты. Пособие к проектированию. Издание Военно-воздушной академии им. Жуковского, 1945.
8. Ф. А. Ступель. Реле защиты и автоматики. Госэнергоиздат, 1950.
9. Б. К. Буль. Теория индукционной системы с экраном. Электричество, № 7, 1947.
10. Ротерс. Электромагнитные механизмы. Госэнергоиздат, 1949.
11. K. Schmiedel. Wirkungsweise und Entwurf der Motor-Elektrizitätszähler, 1916.
12. W. Gram and N. Golderwood. The Calculation of Air-Space Flux. Journ. Inst. El. Engrs, v. 61, October, № 323, 1923.
13. K. Frey. Anwendungen der Konformen Abbildung auf praktische Probleme des Elektromaschinenbaues, 1925.

[15. 11. 1951]



Периодические процессы в нелинейных цепях

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

Москва

Расчеты мгновенных значений периодических токов в нелинейных цепях почти не встречаются в электротехнической практике. Распространено мнение, что эти расчеты очень важны и интересны, но результаты их покупаются непомерно высокой ценой. В настоящей статье сделана попытка разделить необходимую вычислительную работу на две части. Ряд вычислений входит без всяких изменений во все задачи данного типа независимо от строения схемы, от численных значений ее параметров, в частности от характеристик ее нелинейных элементов. Часть вычислений связана с индивидуальными особенностями решаемой задачи.

Показано, как находятся мгновенные значения периодического тока в цепях с нелинейными элементами. Дана такая вычислительная схема, где часть вычислений входит без всяких изменений в любую задачу данного типа.

Определить периодический ток $i(t) = i(t + T)$ это значит найти разумное число его мгновенных значений в промежутке времени $T > t \geq 0$. Тем самым предопределяется план действий. Надо составить надлежащее число уравнений с неизвестными i_0, i_1, i_2 , а затем эту систему решить.

Сделаем две оговорки. Чтобы не утяжелять статью, ограничимся такими задачами, где выполняется равенство

$$i\left(t + \frac{T}{2}\right) = -i(t), \quad (1)$$

означающее, при заданной точности, уменьшение вдвое числа неизвестных. Характеристики нели-

нейных элементов будем считать однозначными, так как учет гистерезиса целесообразно выделить в особую работу.

Разобьем полупериод на n равных частей. Число n берем таким, чтобы кривая тока удовлетворительно воспроизводилась многочленом n -ной степени. Ряд расчетов показал, что при не слишком „диких“ формах характеристик и кривых э. д. с. достаточная точность достигается при $n \leq 6$.

Введем обозначения

$$h = 2n; \quad \tau = ht, \quad (2)$$

где f — частота. Кривую тока можно изобразить рядом

$$i(\tau) = \sum_{k=0}^{n-1} i(k) \varphi_k(\tau), \quad (3)$$

где $i(k) = i_k$ — искомые мгновенные значения тока. Что касается функций времени $\varphi_k(\tau)$, то это многочлены n -ной степени, свойства которых ясны из формы записи уравнения (3). При всех целочисленных значениях $\tau = 0, 1, 2, \dots, n$, за исключением $\tau = k$, функция $\varphi_k(\tau)$ обращается в нуль,

$$\begin{aligned} i_0^* &= -0,771 i_1 - 0,096 i_2 - 0,971 i_3 - 0,096 i_4 - 0,771 i_5; \\ i_1^* &= 0,330 i_0 + 0,305 i_1 - 0,865 i_2 - 0,351 i_3 - 0,431 i_4 - 0,667 i_5; \\ i_2^* &= 0,311 i_0 + 0,721 i_1 - 0,088 i_2 - 0,620 i_3 - 0,310 i_4 - 0,702 i_5; \\ i_3^* &= 0,319 i_0 + 0,675 i_1 + 0,422 i_2 - 0,422 i_4 - 0,675 i_5; \\ i_4^* &= 0,311 i_0 + 0,702 i_1 + 0,310 i_2 + 0,620 i_3 + 0,088 i_4 - 0,721 i_5; \\ i_5^* &= 0,330 i_0 + 0,667 i_1 + 0,431 i_2 + 0,351 i_3 + 0,865 i_4 - 0,305 i_5. \end{aligned}$$

а при $\tau = k$ она равна единице. Например, при $n = 6$

$$\varphi_4(\tau) = \frac{1}{48} \tau(\tau-1)(\tau-2)(\tau-3)(\tau-5)(\tau-6).$$

Несколько иначе строится функция $\varphi_0(\tau)$, так как в силу условия (1) должны выполняться равенства $\varphi_0(0) = 1$ и $\varphi_0(n) = -1$. Для $n = 6$ получается:

$$\varphi_0(\tau) = -\frac{1}{120} (\tau-1)(\tau-2)(\tau-3)(\tau-4)(\tau-5).$$

Выясним, каким операциям можно подвергать ряды типа (3) и какие операции являются для них недопустимыми. Дозволено все, что не нарушает условия (1), например умножение рядов на постоянное число и их сложение друг с другом. Дифференцирование недопустимо, так как его результатом будет ряд, для которого условие (1) не выполняется. Интегрирование законно, ибо появляющуюся постоянную всегда можно подобрать так, чтобы условие (1) соблюдалось.

Условимся обозначать законно проинтегрированную функцию ее же символом с присоединением к нему надстрочной звездочки

$$i^*(\tau) = \int_0^{\tau} i(\xi) d\xi + \text{const}, \quad (4)$$

где постоянная выбрана, как указано выше. Результаты интегрирований по переменным t и τ отличаются лишь постоянным множителем

$$i^*(\tau) = h i^*(t) \quad (5)$$

[см. формулу (2)].

Допустим, что нам надо рассчитать ток в цепи, состоящей из последовательно соединенных линейного сопротивления r и нелинейной индуктивности. Характеристика $\Psi(i)$ может быть задана каким угодно способом — формулой, графиком или таблицей.

Уравнение такой цепи

$$e(t) = ri(t) + \frac{d\Psi(i)}{dt} \quad (6)$$

надо привести к удобному для вычислений виду. Для этого освобождаемся от производных, переходим от переменной t к переменной τ

$$e^*(\tau) = r i^*(\tau) + h \Psi(i) \quad (7)$$

и теперь надо выразить мгновенные значения проинтегрированной функции через мгновенные значения исходной функции.

Эти вычисления выполняются по формулам (3) и (4). Они очень скучны, но зато делаются раз и навсегда. Например, при $n = 6$ получается следующая система

Сделаем одно попутное замечание. Предположим, что форма кривой э. д. с. задана не аналитически, а чертежом. Сняв с этого чертежа ординаты e_0, e_1, e_2, \dots , мы можем по нашим таблицам найти нужные нам значения $e_0^*, e_1^*, e_2^*, \dots$

Чтобы составить систему уравнений, достаточно переписать формулу (7) n раз, полагая в ней $\tau = 0, 1, 2, \dots, n-1$. Прием решения такой системы достаточно показать на одном конкретном примере. Для этой цели возьмем схему чуть-чуть посложнее.

Рассмотрим последовательное соединение линейных сопротивления r и емкости C с нелинейной индуктивностью. Уравнение цепи

$$e(t) = ri(t) + u(t) + \frac{d\Psi(i)}{dt}, \quad (8)$$

причем напряжение на конденсаторе u связано с током соотношением

$$u(\tau) = \frac{1}{hC} i^*(\tau). \quad (9)$$

Освобождаясь от производных в уравнении (8), имеем:

$$e^*(\tau) = r i^*(\tau) + \frac{1}{hC} i^{**}(\tau) + h \Psi(i), \quad (10)$$

где $i^{**}(\tau)$ — символ двухкратного интегрирования. Результаты такого интегрирования при $n=6$ следующие:

в правые части системы, находят новые значения x_0, x_1 и снова подставляют их в правые части. Этот процесс продолжается до тех пор, пока

$$\begin{aligned} i_0^{**} &= -0,879 i_0 - 1,543 i_1 - 0,096 i_2 & + 0,096 i_4 + 1,543 i_5; \\ i_1^{**} &= -0,634 i_0 - 1,837 i_1 - 0,618 i_2 - 0,620 i_3 - 0,191 i_4 + 0,831 i_5; \\ i_2^{**} &= -0,315 i_0 - 1,238 i_1 - 1,178 i_2 - 1,109 i_3 - 0,558 i_4 + 0,146 i_5; \\ i_3^{**} &= & -0,542 i_1 - 0,922 i_2 - 1,508 i_3 - 0,922 i_4 - 0,542 i_5; \\ i_4^{**} &= +0,315 i_0 + 0,146 i_1 - 0,558 i_2 - 1,109 i_3 - 1,178 i_4 - 1,238 i_5; \\ i_5^{**} &= +0,634 i_0 + 0,831 i_1 - 0,191 i_2 - 0,620 i_3 - 0,618 i_4 - 1,837 i_5. \end{aligned}$$

Пусть при промышленной частоте $e(t) = 300 \sin \omega t$, $r=6$ ом, $C=10^{-4}$ ф, а характеристика $\Psi(i)$ сведена в таблицу:

в левой части не получаются те же числа, которые были подставлены в правые. Ясно, что та же вычислительная схема пригодна и для нели-

i	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30
100 Ψ	8,0	15,6	22,8	29,3	35,3	40,6	50,0	57,8	64,8	70,1	75,2	79,7	83,8	92,5	99,7

Имеем:

$$e^*(\tau) = -\frac{6}{\pi} \cdot 300 \cos \frac{\pi \tau}{6},$$

откуда $e_0^* = -573,0$; $e_3^* = 0$; $e_5^* = -e_2^* = 496,2$; $e_4^* = -e_1^* = 286,5$. Любопытно, что в точности те же числа получаются из первой таблицы коэффициентов, если в нее подставить $e_0 = 0$; $e_1 = 300$; $e_2 = 150$; $e_3 = 0$; $e_4 = 259,8$. Перепишем 6 раз уравнение (10) и для удобства вычислений умножаем почленно все равенства на $\frac{1}{6}$. Получается система:

$$\begin{aligned} F_0 &= +95,5 + 100 \Psi_0 - 2,440 i_0 - 5,057 i_1 - 0,364 i_2 - 0,971 i_3 + 0,172 i_4 + 3,514 i_5 = 0; \\ F_1 &= +82,7 + 100 \Psi_1 - 1,432 i_0 - 4,797 i_1 - 2,581 i_2 - 2,074 i_3 - 0,962 i_4 + 1,642 i_5 = 0; \\ F_2 &= +47,8 + 100 \Psi_2 - 0,564 i_0 - 2,718 i_1 - 3,361 i_2 - 3,701 i_3 - 1,861 i_4 - 0,296 i_5 = 0; \\ F_3 &= & +100 \Psi_3 + 0,319 i_0 - 0,832 i_1 - 2,139 i_2 - 4,189 i_3 - 2,983 i_4 - 2,182 i_5 = 0; \\ F_4 &= -47,8 + 100 \Psi_4 + 1,186 i_0 + 1,108 i_1 - 1,241 i_2 - 2,461 i_3 - 3,186 i_4 - 4,159 i_5 = 0; \\ F_5 &= -82,7 + 100 \Psi_5 + 2,092 i_0 + 2,976 i_1 - 0,100 i_2 - 1,372 i_3 - 0,852 i_4 - 5,407 i_5 = 0. \end{aligned}$$

Теперь надо обдумать способ решения системы. Повидимому, нет ничего лучшего, чем способ итераций. Он подробно описан в очень интересной книге В. Н. Фаддеевой „Вычислительные методы линейной алгебры“, но, разумеется, не все имеющиеся там указания применимы к нелинейной задаче.

Для линейной задачи поступают так. Записывают систему уравнений в виде:

$$\begin{aligned} x_0 &= a_{00}x_0 + a_{01}x_1 + \dots + a_{0n}; \\ x_1 &= a_{10}x_0 + a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}; \\ &\dots \end{aligned}$$

в a — заданные числа), задаются, хотя бы начав, значениями x_0, x_1, \dots , подставляют их

нейной задачи и затруднение лишь в том, чтобы предугадать, будет ли процесс сходящимся.

Для сходимости итерационного процесса в линейной задаче требуется, чтобы диагональные коэффициенты a_{00}, a_{11} были больше всех остальных коэффициентов соответствующей строки. В нашей системе дело усложняется наличием членов, пропорциональных потокоцеплениям. Можно, разумеется, написать $\Psi = Li$ и даже назвать коэффициент L индуктивностью, но делу это не помогает, так как „коэффициент“ этот переменный.

Неплохие результаты дает следующий прием. Исходная система заменяется другой, ей равносильной. Каждое уравнение новой системы представляет собой алгебраическую сумму трех функций F , целесообразно выбранных. Рассматривая столбец членов i_0 , мы видим, что наибольшие коэффициенты имеют функции F_1 и F_5 (функция F_0 в счет не идет). Составляем первое уравнение по схеме $F_0 - F_1 + F_5$. Знаки двух последних слагаемых выбираются так, чтобы коэффициент при i_0 оказался положительным и, по возможности, большим. В столбце членов i_1 преобладающие коэффициенты имеют функции F_0 и F_5 , и следующее уравнение строится по схеме $F_1 - F_0 + F_5$. Далее идут комбинации $F_2 - F_1 - F_3$; $F_3 - F_2 - F_4$;

$F_4 - F_2 - F_3$ и $F_5 + F_0 - F_4$. Такое преобразование дает систему:

$$\begin{aligned} 100 \psi_0 + 1,08 i_0 &= 69,9 + 100(\psi_1 - \psi_5) & -2,72 i_1 - 2,12 i_2 + 0,27 i_3 - 0,28 i_4 + 3,54 i_5 \\ 100 \psi_1 + 3,24 i_1 &= 95,5 + 100(\psi_0 - \psi_5) - 3,10 i_0 & + 2,32 i_2 + 2,48 i_3 + 1,99 i_4 + 7,28 i_5 \\ 100 \psi_2 + 1,36 i_2 &= 35,0 + 100(\psi_1 + \psi_3) - 0,55 i_0 - 2,91 i_1 & - 2,56 i_3 - 2,08 i_4 - 0,24 i_5 \\ 100 \psi_3 + 1,97 i_3 &= & + 100(\psi_2 + \psi_4) + 0,30 i_0 - 0,78 i_1 - 2,46 i_2 & - 2,06 i_4 - 2,27 i_5 \\ 100 \psi_4 + 1,66 i_4 &= 95,5 + 100(\psi_2 + \psi_3) - 1,43 i_0 - 4,66 i_1 - 4,26 i_2 - 5,43 i_3 & + 1,68 i_5 \\ 100 \psi_5 + 2,27 i_5 &= -60,5 + 100(\psi_4 - \psi_0) + 1,53 i_0 + 3,19 i_1 - 0,78 i_2 - 0,12 i_3 - 2,51 i_4 \end{aligned}$$

относительно которой можно предполагать, что итерационный процесс будет сходящимся: в левых частях члены, зависящие от токов и потокосцеплений, складываются, в правых — вычитаются.

Итерационный процесс сходится тем лучше, чем удачнее выбрано начальное приближение. Если рассчитывается серия вариантов, то каждый предшествующий результат может быть положен в основу расчета последующего. В нашем примере результат предугадать трудно и можно поступить двояко.

Можно начать с простейшего предположения, что все токи равны нулю и, следовательно, правые части уравнений равны свободным членам. Такое предположение заведомо не соответствует действительности, и процесс итерации будет сходиться медленно.

Можно попытаться получить не слишком точный, но все же правдоподобный результат, а затем отшлифовать его, начав с него итерационный процесс. Для этого надо проделать черновое вычисление, положив хотя бы $n=3$.

Для $n=3$ получаются такие таблицы коэффициентов:

$$\begin{aligned} i_0^* &= -0,562 i_1 - 0,562 i_2; \\ i_1^* &= 0,333 i_0 + 0,229 i_1 - 0,771 i_2; \\ i_2^* &= 0,333 i_0 + 0,771 i_1 - 0,229 i_2 \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} i_0^{**} &= -0,412 i_0 - 0,506 i_1 + 0,506 i_2; \\ i_1^{**} &= -0,165 i_0 - 0,752 i_1 - 0,165 i_2; \\ i_2^{**} &= +0,165 i_0 - 0,165 i_1 - 0,752 i_2, \end{aligned}$$

но надо помнить, что символами i_1, i_2 обозначаются уже другие ординаты кривой. Переписывая уравнение (10), надо брать для h величину вдвое меньшую, чем при $n=6$. Нашей черновой системой будет:

$$\begin{aligned} 4,58 i_0 &= 95,5 + 100 \psi_0 & - 6,75 i_1 + 4,50 i_2; \\ 7,90 i_1 &= 47,8 + 100 \psi_1 - 1,17 i_0 & - 3,38 i_2; \\ 8,81 i_2 &= -47,8 + 100 \psi_2 + 2,50 i_0 - 0,29 i_1 \end{aligned}$$

и она записана как раз в той форме, в которой будет вестись итерационный процесс.

Полагаем все токи равными нулю и шаг за шагом заполняем таблицку

№	i_0	i_1	i_2
1	20,8	6,0	-5,4
2	25,4	10,4	-4,0
3	21,8	11,5	-1,9
4	21,0	11,6	-1,3
5	21,2	11,5	-1,0
6	21,7	11,3	-0,7

и на шестой итерации заканчиваем процесс. В сущности его можно было прекратить уже после четвертой итерации — строки 3 и 4 мало отличаются друг от друга, — но интересно посмотреть насколько приближается к действительности грубое вычисление по трем ординатам.

Чтобы получить все шесть точек криво развертываем формулу (3) для $n=3$

$$\begin{aligned} i &= i_0 + (-2,167 i_0 + 3 i_1 - 1,5 i_2) \tau + \\ &+ (1,5 i_0 - 2,5 i_1 + 2 i_2) \tau^2 + \\ &+ (-0,333 i_0 + 0,5 i_1 - 0,5 i_2) \tau^3 \end{aligned}$$

и полагаем в ней $\tau=0,5; 1,5$ и $2,5$. Возвращая к старым обозначениям, выписываем значения все шести ординат

$$\begin{aligned} i_0 &= 21,7; i_1 = 16,2; i_2 = 11,3; i_3 = 6,0; \\ i_4 &= -0,7; i_5 = -9,5, \end{aligned}$$

которые и берем за исходное приближение в новом итерационном процессе.

После того как эти значения будут подставлены в систему при $n=6$, возникает необходимость решать уравнения вида $a\psi + bi = c$. Словом к тому много, и каждый вычислитель найдет свой собственный. При некотором навыке эта операция требует 40...50 сек.

Теперь получается такая табличка:

№	i_0	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5
0	21,7	16,2	11,3	6,0	-0,7	-9,5
1	18,8	18,7	12,0	5,1	-0,5	-9,2
2	17,8	19,5	11,3	4,8	-1,3	-7,7
3	17,9	19,8	11,3	3,7	-1,2	-7,8

и ясно, что продолжать вычисления нет надобности. Заслуживает внимания то обстоятельство, что вычисление по трем ординатам дало неожиданно высокую точность, и для получения окончательного результата потребовались три итерации. Если бы мы не произвели черного расчета то понадобилось бы 10...12 итераций.

Весьма вероятно, что предлагаемая здесь вычислительная схема может быть улучшена, но и в настоящем виде она достаточно проста. Характерной особенностью всех расчетов является полное изгнание из них рядов Фурье.

Характеристики электрических цепочных схем в переходном режиме

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

Одесский электротехнический институт связи

Введение. В теории искусственных линий, электрических многозвенных фильтров и во многих других задачах теоретической и прикладной электротехники нередко приходится сталкиваться с цепочными электрическими схемами.

Когда цепочная схема играет роль искусственной линии, тогда она однородна и состоит из симметричных секций; продольный элемент каждой секции должен имитировать активное сопротивление и индуктивность, а поперечный элемент — проводимость утечки и емкость участка реальной длиной линии. Для этого секции искусственной линии должны содержать индуктивность в продольных элементах и емкость в поперечных. Количество секций искусственной линии определяет степень приближения ее характеристик к характеристикам реальной линии, причем приближение возрастает с увеличением числа секций. Естественно поэтому относить однородные цепочные схемы из симметричных секций к категории искусственных линий при большом числе секций в каскаде и к симметричным низкочастотным электрическим фильтрам, если число секций в каскаде невелико. Очевидно, исследование искусственных линий тождественно с исследованием симметричных низкочастотных фильтров, если рассматривать и те и другие как n -звенные цепочные схемы.

Нам неизвестны работы по исследованию переходных процессов в искусственных линиях со сравнительно ограниченным числом секций (хотя только такие линии могут быть практически реализованы), а также в многозвенных электрических фильтрах, в которых учитываются активные потери на сопротивлениях продольного и поперечного элементов секций. Имеется лишь описание ряда частных случаев этой задачи [1, 1, 2, Л. 4... 8].

В настоящей работе указаны особенности расчета переходных характеристик как короткозамкнутых, так и разомкнутых на конце однородных пассивных цепочных схем, состоящих из четырехполюсников Т-образного типа.

Метод исследования. Цепочная схема рассматривается как линейная система, поскольку все составляющие ее элементы содержат сосредоточенные сопротивления, индуктивности и ем-

Обобщен метод расчета переходного процесса в цепочных электрических схемах, состоящих из секций Т-образного типа. Показана особенность решения короткозамкнутых схем и схем, разомкнутых на конце, и установлены правила перехода от одного решения к другому. Изложенные методы иллюстрированы примером и развернутой таблицей.

кости, не изменяющиеся во времени. Переходный процесс в линейной системе, имеющий место под действием произвольной совокупности внешних по отношению к ней э. д. с.

$E(t)$, наиболее просто анализируется на основании принципа наложения. Сначала определяется реакция системы на единичную функцию $I(t)$, т. е. закон изменения во времени интересующей нас в схеме электрической величины при приложении на входе схемы единичного постоянного напряжения. Эту функцию времени обычно обозначают $A(t)$, и называют взаимной переходной проводимостью¹. Затем с помощью интеграла Дюамеля отыскивают полное решение, соответствующее реакции схемы на приложенную э. д. с. $E(t)$.

При таком методе решения задачи ясно выступают особенности функции $A(t)$ как основной характеристики линейного четырехполюсника. Определение ее и является предметом настоящего исследования.

Пользуясь операторным методом, будем исходить из привившегося в отечественной электротехнической литературе преобразования

$$F(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt$$

вместо преобразования Лапласа, в котором множитель p отсутствует:

$$F(p) = p \Lambda(p),$$

и определять взаимную переходную проводимость с помощью теоремы разложения как оригинал операторной взаимной проводимости или обратной величины операторного взаимного сопротивления

$$A(t) = \frac{1}{Z(p)}.$$

Основные операторные соотношения. Пусть однородная цепочная схема, составленная из n Т-образных пассивных четырехполюсников, нагру-

¹ Следует обратить внимание на то, что взаимная переходная проводимость не всегда имеет размерность проводимости: при определении напряжений в схеме $A(t)$ оказывается величиной безразмерной.

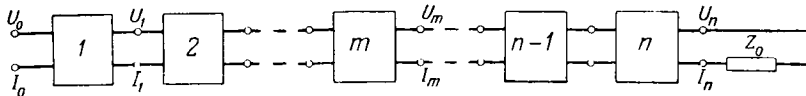


Рис. 1.

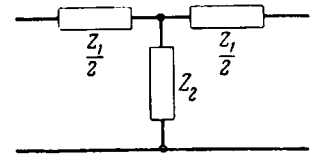


Рис. 2.

жена на выходе последней секции сопротивлением Z_0 (рис. 1).

Если обозначить сумму сопротивлений продольных элементов секции через Z_1 , а сопротивление поперечного элемента через Z_2 (рис. 2), то, пользуясь эквивалентностью каждого из четырехполюсников участку длинной линии с характеристиками

$$\operatorname{ch} \gamma = 1 + \frac{1}{2} \frac{Z_1}{Z_2}, \quad Z_c = Z_2 \operatorname{sh} \gamma, \quad (1)$$

можно записать [Л. 4] операторные выражения для тока на выходе m -й секции при включении схемы на единичное постоянное напряжение.

В режиме короткого замыкания ($Z_0 = 0$)

$$I_{m0}(p) = \frac{\operatorname{ch}(n-m)\gamma}{Z_2 \operatorname{sh} \gamma \operatorname{sh} n\gamma}, \quad (2)$$

в режиме холостого хода ($Z_0 = \infty$)

$$I_{m\infty}(p) = \frac{\operatorname{sh}(n-m)\gamma}{Z_2 \operatorname{sh} \gamma \operatorname{ch} n\gamma}. \quad (3)$$

Дальнейшее исследование удобно проводить для каждого из режимов в отдельности.

Режим короткого замыкания. В соответствии с выражением (2) теорема разложения для определения взаимной переходной проводимости приобретет вид:

$$A_{kz}(t) = \left[\frac{\operatorname{ch}(n-m)\gamma}{Z(p)} \right]_{p=0} + \sum_k \left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_k} \exp(p_k t), \quad (4)$$

причем все p_k определяются с помощью (1), как корни характеристического уравнения

$$Z(p) = Z_2 \operatorname{sh} \gamma \operatorname{sh} n\gamma = Z_2 2^{n-1} \prod_{k=0}^n \left(\operatorname{ch} \gamma_k - \cos \frac{k\pi}{n} \right) = 0, \quad (5)$$

которое удовлетворяется при выполнении условия

$$\gamma_k = j \frac{k\pi}{n} = j\gamma_k, \quad (6)$$

где k пробегает все целые положительные значения от 0 до n , если при этом $Z_2(p_k)$ остается конечной величиной.

Определение числителя общего члена разложения не представляет труда; при всех $p = p_k$

$$\operatorname{ch}(n-m)\gamma_k = \cos k\pi \cdot \cos m\gamma_k. \quad (7)$$

Для вычисления знаменателя общего члена разложения продифференцируем по p выражение

$Z(p) = Z_2 \operatorname{sh} \gamma \operatorname{sh} n\gamma$ и одновременно умножим результат на p . Тогда

$$p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} = p \frac{\partial Z_2}{\partial p} \operatorname{sh} \gamma \operatorname{sh} n\gamma + p Z_2 \operatorname{sh} \gamma \operatorname{ch} n\gamma n \frac{\partial \gamma}{\partial p} + p Z_2 \operatorname{sh} n\gamma \operatorname{ch} \gamma \frac{\partial \gamma}{\partial p}. \quad (8)$$

Принимая во внимание, что при всех $p = p_k$ первый член суммы (8) обращается в нуль, если $\left(\frac{\partial Z_2}{\partial p} \right)_{p=p_k}$ остается конечной величиной, и вводя обозначение

$$\zeta(p) = p Z_2 \operatorname{sh} \gamma \frac{\partial \gamma}{\partial p} = p Z_2 \frac{\partial (\operatorname{ch} \gamma)}{\partial p}, \quad (9)$$

получим с учетом (6):

$$\left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_k} = \zeta(p_k) \left(n \cos k\pi + \cos \frac{k\pi}{n} \frac{\sin k\pi}{\sin \frac{k\pi}{n}} \right). \quad (10)$$

При всех значениях k , отличных от нуля и n , второй член в скобках пропадает, поскольку при этом $\sin k\pi$ обращается в нуль. Если же выполняются условия $k=0$ или $k=n$, во втором члене образуется неопределенность. Раскрывая ее, находим, что оба члена в скобках одинаковы. В итоге получаем:

$$\left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_0} = 2n\zeta(p_0), \quad (11a)$$

при $k=0$;

$$\left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_k} = n\zeta(p_k) \cos k\pi, \quad (11b)$$

при $k=1, 2, \dots, n-1$;

$$\left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_n} = 2n\zeta(p_n) \cos n\pi \quad (11b)$$

при $k=n$.

Особенность, выражающаяся в том, что знаменатель общего члена суммы разложения (4) вдвое возрастает для первого ($k=0$) и последнего ($k=n$) членов, распространяется на любые возможные короткозамкнутые цепочные схемы, составленные из симметричных Т-образных секций, если только выражения $Z_2(p)$ и $\frac{\partial Z_2(p)}{\partial p}$ остаются конечными при всех $p = p_k$.

Пользуясь выражениями (7) и (11), можно записать свободную составляющую переходной

проводимости как сумму затухающих членов разложения (4) в виде:

$$[A_{xz}(t)]_{cs} = \frac{\exp(p_0 t)}{2\pi \zeta(p_0)} + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\cos m \gamma_k}{\zeta(p_k)} \exp(p_k t) + \frac{\cos m \pi \exp(p_n t)}{2\pi \zeta(p_n)}. \quad (12)$$

Удобно ввести обозначение Σ'_k , указывающее, что при суммировании по всем значениям k от 1 до n следует от последнего члена ($k=n$) взять его половину. Тогда можно записать, что

$$[A_{xz}(t)]_{cs} = \frac{\exp(p_0 t)}{2\pi \zeta(p_0)} + \frac{1}{n} \sum'_k \frac{\cos m \gamma_k}{\zeta(p_k)} \exp(p_k t). \quad (13)$$

В тех случаях, когда принужденная составляющая отсутствует, например, если $Z_1 = Z'_1 + \frac{1}{C_p}$, полученное значение свободной составляющей является полной переходной характеристикой схемы. Если же принужденная составляющая существует и подлежит определению, а непосредственный предельный переход в первом члене (4) при $p \rightarrow 0$ затруднителен, удобно рассмотреть схему в установившемся режиме и рассчитать в нем взаимную проводимость между входом схемы и выходом m -й секции.

Полное решение задачи в тех случаях, когда принужденная составляющая существует, можно получить также предварительным решением вспомогательной схемы, в которой она отсутствует. Рассматривается, например, фактический переходный процесс в схеме, секции которой состоят из сопротивлений $Z'_1 = Z_1 + \frac{1}{C_p}$, и Z_2 (рис. 3). Уравнение (13) дает для такой схемы полное решение. Из последнего легко получить переходную характеристику искомой схемы, если неограниченно увеличивать емкость ($C \rightarrow \infty$).

Режим холостого хода. Согласно выражению (3) теорема разложения для определения взаимной переходной проводимости в этом случае приобретает вид:

$$A_{x,x}(t) = \left[\frac{\text{sh}(n-m)\gamma}{Z(p)} \right]_{p=0} + \sum_k \frac{\text{sh}(n-m)\gamma_k}{\left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_k}} \exp(p_k t), \quad (14)$$

причем все p_k определяются с помощью (1) как корни характеристического уравнения

$$Z(p) = Z_2 \text{sh} \gamma \text{ch} n \gamma = Z_2 \text{sh} \gamma 2^{n-1} \prod_{k=1}^n \left(\text{ch} \gamma_k - \cos \frac{2k-1}{2n} \pi \right) = 0, \quad (15)$$

которое удовлетворяется при выполнении условия

$$\gamma_k = j \frac{2k-1}{2n} \pi = j \gamma_k, \quad (16)$$

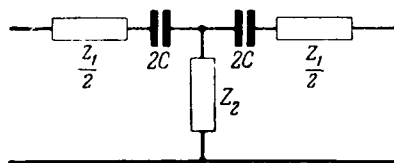


Рис. 3.

где k пробегает все целые положительные значения от 1 до n , если при этом $Z_2(p_k)$ остается конечной величиной².

При всех $p = p_k$ числитель общего члена разложения (14)

$$\text{sh}(n-m)\gamma_k = -j \cos k\pi \cdot \cos m \gamma_k. \quad (17)$$

Для вычисления знаменателя общего члена разложения необходимо, принимая во внимание (15), повторить преобразования типа (8)–(11). Если при всех $p = p_k$ величина $\frac{\partial Z_2(p)}{\partial p}$ остается конечной, то

$$\left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_k} = \zeta(p_k) (n \text{sh} n \gamma + \text{ch} n \gamma \text{ct} h \gamma), \quad (18)$$

где $\zeta(p)$ совпадает с функцией, определяемой уравнением (9). Второй член в (18) согласно (16) тождественно обращается в нуль при всех $p = p_k$, в силу чего

$$\left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_k} = -j n \zeta(p_k) \cos k\pi. \quad (19)$$

Выражения (17) и (19) позволяют записать свободную составляющую переходной проводимости как сумму затухающих членов теоремы разложения (14) в виде:

$$[A_{x,x}(t)]_{cs} = \frac{1}{n} \sum_k \frac{\cos m \gamma_k}{\zeta(p_k)} \exp(p_k t). \quad (20)$$

В отличие от короткозамкнутой схемы все слагаемые в уравнении свободного режима единообразны, и поэтому объединяются общим знаком суммы, распространяемой на все значения k от 1 до n .

Для нахождения полного решения необходимо либо обратиться к вспомогательной задаче (рис. 3), либо определить принужденную составляющую как взаимную проводимость между входом схемы и выходом m -й секции ее в установившемся режиме.

Сопоставление окончательных формул для свободных составляющих переходного процесса в короткозамкнутых цепочных схемах (13) и схемах, разомкнутых на конце (20), а также воз-

² Уравнение $\text{sh} \gamma = 0$, которое удовлетворяется при $\gamma = 0$, не определяет корня характеристического уравнения. В этом случае, как видно из (17), числитель также обращается в нуль, поскольку в обозначениях уравнения (16) $k = \frac{1}{2}$.

возможность определения принужденной составляющей через посредство вспомогательной схемы, в которой имеется только свободная составляющая, позволяет сделать весьма полезное заключение.

Полное решение для схемы, находящейся в режиме холостого хода, непосредственно получается из соответствующего решения для короткозамкнутой схемы, если опустить в последнем член, содержащий p_k , и вместо операции \sum_k выполнить операцию \sum_k , т. е. провести суммирование общего члена разложения по всем значениям k от 1 до n .

Приложение. В качестве примера рассмотрим искусственную линию или низкочастотный цепочный фильтр (рис. 4) с сопротивлениями продольного и поперечного элементов секций соответственно равными:

$$Z_1 = R_1 + Lp, \quad Z_2 = \frac{R_2}{1 + R_2 C p}. \quad (21)$$

На основании (1), (5) и (21) составляется уравнение для p_k вида:

$$p_k^2 + 2ap_k + \frac{R_k}{R_2 LC} = 0, \quad (22)$$

в котором

$$a = \frac{R_1 R_2 C + L}{2 R_2 L}, \quad R_k = R_1 + 4 R_2 \sin^2 \frac{\nu_k}{2}. \quad (23)$$

Очевидно, (22) представляет собой систему из $n+1$ независимых уравнений для определения всех корней характеристического уравнения $Z(p) = 0$. Из (22) определяются $2n$ корней, соответствующих всем значениям k от 1 до n :

$$p_k = -a \pm j\beta_k, \quad (24)$$

где

$$\beta_k = \left(\frac{R_k}{R_2 LC} - a^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (25)$$

и один корень $p_0 = -\frac{R_1}{L}$, соответствующий $k=0$.

Второе решение, получающееся из (22) при $k=0$, а именно $p = -(R_1 C)^{-1}$ не обращает в нуль $Z(p)$ и, следовательно, не является его корнем, поскольку при этом $Z_2(p)$ неограниченно возрастает.

Каждому из значений k , исключая $k=0$, соответствуют два сопряженных комплексных корня p_k . Следовательно, каждый из членов суммы (13), исключая первый, в свою очередь, составляется из двух сопряженных слагаемых, мнимые части которых, слагаясь, дадут нуль. В итоге, после элементарных, но довольно кропотливых преобразований можно получить свободную составляющую взаимной переходной проводимости короткозамкнутой схемы:

$$[A_{kz}(t)]_{c\phi} = -\frac{\exp\left(-\frac{R_1}{L}t\right)}{nR_1} - \frac{2\exp(-\alpha t)}{n} \sum_k \frac{\cos m\nu_k}{R_k} \times (\cos \beta_k t - \eta_k \sin \beta_k t), \quad (26)$$

где

$$\eta_k = \frac{(2R_k - R_1) R_2 C - L}{2 R_2 L \beta_k}. \quad (27)$$

Принужденная составляющая взаимной переходной проводимости соответствует установившемуся токораспределению в схеме, составленной из секций с сопротивлениями R_1 и R_2 (рис. 5).

Для определения ее удобно в соответствии с ранее приведенными указаниями рассмотреть вспомогательную схему, составленную из сопротивлений

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{Cp}, \quad Z_2 = R_2. \quad (28)$$

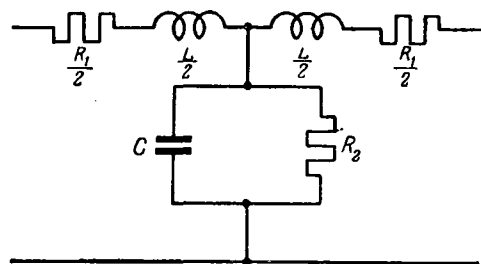


Рис. 4.

Поскольку в последней имеется только свободная составляющая переходной проводимости, уравнение (13) определяет для нее полное решение. Проводя преобразования типа (22)...(27) с учетом (28) и полагая в окончательном

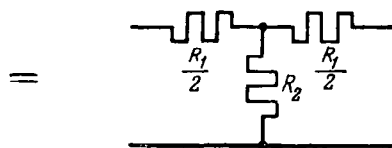


Рис. 5.

выражении $C = \infty$, получим [Л. 6] принужденное решение для схемы с сопротивлениями (21) в виде:

$$[A_{kz}(t)]_{np} = \frac{1}{nR_1} + \frac{2}{n} \sum_k \frac{\cos m\nu_k}{R_k}. \quad (29)$$

Полное решение для короткозамкнутой схемы как сумма свободной и принужденной составляющих приобретает вид:

$$A_{kz}(t) = \frac{1}{nR_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{R_1}{L}t\right) \right] + \frac{2}{n} \sum_k \frac{\cos m\nu_k}{R_k} \times \left[1 + \frac{\sin(\beta_k t - \theta_k)}{\sin \theta_k} \exp(-\alpha t) \right], \quad (30)$$

где

$$\sin \theta_k = 2 R_2 L C \beta_k \{ [(2R_2 - R_1) R_2 C - L]^2 + (2 R_2 L C \beta_k)^2 \}^{-\frac{1}{2}}.$$

На основании ранее изложенного и формулы (30) непосредственно записывается взаимная переходная проводимость схемы в режиме холостого хода:

$$A_{x,x}(t) = \frac{2}{n} \sum_k \frac{\cos m\nu_k}{R_k} \times \left[1 + \frac{\sin(\beta_k t - \theta_k)}{\sin \theta_k} \exp(-\alpha t) \right]. \quad (31)$$

Напомним, что в выражениях $A_{kz}(t)$ коэффициент $\nu_k = \frac{k}{n}\pi$, а в $A_{x,x}(t)$ коэффициент $\nu_k = \frac{2k-1}{2n}\pi$.

Для линии без искажений, в которой выполняется условие $R_1 R_2 C = L$, в уравнениях (30) и (31) упрощаются коэффициенты:

$$\alpha = \frac{R_1}{L}; \quad \beta = \frac{2 \sin \frac{\nu_k}{2}}{\sqrt{LC}}, \quad \theta = \arcsin \sqrt{\frac{R_1}{R_k}}.$$

В прилагаемой таблице приведены полученные из (30) и (31) выражения для переходных характеристик ряда более простых схем. Некоторые из выражений $A_{kz}(t)$ совпадают с результатами [Л. 3, Л. 7] и исправляют неверные результаты в работах [Л. 1, Л. 8] и за исключением модели безиндукционного кабеля результаты расчета подобных схем в работе [Л. 4].

Тип секции	$A_{кз}(t)$
	$A(t) = \frac{1}{nR_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{R_1}{L} t\right) \right] + \frac{2}{nL} \exp\left(-\frac{R_1}{2L} t\right) \sum_k' \frac{\cos m\gamma_k}{\beta_k} \sin \beta_k t$
	$A(t) = \frac{1}{nR_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{R_1}{L} t\right) \right] + \frac{2}{n} \sum_k' \frac{\cos m\gamma_k}{R_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{R_k}{L} t\right) \right]$
	$A(t) = \frac{1}{nR_1} + \frac{2}{n} \sum_k' \frac{\cos m\gamma_k}{R_k} [1 + \xi_k \exp(-\alpha_k t)], \quad \alpha_k = \frac{R_k}{R_1 R_2 C}, \quad \xi_k = 4 \frac{R_2}{R_1} \sin^2 \frac{\gamma_k}{2}$
	$A(t) = \frac{1}{nR_1} \left[1 + 2 \sum_k' \cos m\gamma_k \exp\left(-\frac{4}{R_1 C} \sin^2 \frac{\gamma_k}{2} t\right) \right]$
	$A(t) = \frac{t}{nL} + \frac{2}{n} \sum_k' \frac{\cos m\gamma_k}{R_k} \left[1 + \frac{\sin(\beta_k t - \theta_k)}{\sin \theta_k} \exp(-\alpha t) \right]$
	$A(t) = \frac{t}{nL} + \frac{2}{n} \sum_k' \frac{\cos m\gamma_k}{R_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{R_k}{L} t\right) \right]$
	$A(t) = \frac{1}{nL} \left[t + 2 \sum_k' \frac{\cos m\gamma_k}{\beta_k} \sin \beta_k t \right], \quad \beta_k = \frac{2}{\sqrt{LC}} \sin \frac{\gamma_k}{2}$

Литература

1. А. М. Эфрос и А. М. Данилевский. Операционное исчисление и контурные интегралы. Государственное научно-техническое из-во, Харьков, 1937.
2. К. М. Поливанов и Б. И. Яхинсон. К расчету неустановившегося режима в цепных схемах. Электричество, № 4, 1948.
3. М. И. Конторович. Операционное исчисление и стационарные явления в электрических цепях. Техтеоретиздат, 1949.

4. К. А. Круг. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Госэнергоиздат, 1948.
5. Б. И. Яхинсон. Кандидатская диссертация. МЭИ, 1946.
6. Б. И. Яхинсон. К расчету характеристик искусственных линий и низкочастотных фильтров. Сборник Трудов ОЭИС, № 2/12, 1949.
7. Х. Карслоу и Д. Егер. Операционные методы в прикладной математике. Изд-во иностранной литературы, 1948.
8. L. C o h e n. Heaviside's Electrical circuit Theory, 1928. [2. 2. 1951]



Рационализация методов расчета переходных процессов в линейных электрических цепях с сосредоточенными параметрами

О. М. БОГАТЫРЕВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Введение. Для расчета переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами рекомендуются различные приемы, например:

1. Классический способ, т. е. составление и решение системы дифференциальных уравнений и определение постоянных интегрирования на основе двух теорем коммутации, применяя уравнения для $t = 0$. Уравнения, как правило, пишутся для полных переходных токов.

2. Операторный способ с применением теоремы разложения Хевисайда для полных токов.

3. Операторный способ с приведением схемы к включению на постоянное или синусоидальное напряжение с использованием затем соответствующих формул включения Хевисайда.

4. Применение интеграла Дюамеля в нескольких видах, для чего находится сначала переходная проводимость от единичного толчка.

5. Разделение полных токов на свободные и принужденные и определение каждой системы токов в отдельности различными приемами.

6. Выключение цепей рассматривается отдельно и приводится к включению, для чего используют метод наложения.

Применяются и другие приемы.

Практика нуждается в простом и экономичном методе, применимом для различных встречающихся случаев коммутации.

Целью настоящей статьи является дать единую и простую методику расчета указанных цепей для всевозможных случаев коммутации и показать ее применение на примерах.

Будем ориентироваться на схемы не ниже второго порядка при наличии источников непо-

Предлагается единообразная методика расчета переходных процессов в линейных цепях высокого порядка (начиная со второго) с сосредоточенными параметрами при наличии э. д. с., изменяющихся по различным законам. Применение предлагаемой методики показано на примерах.

стоянной э. д. с., так как схемы первого порядка и с постоянными э. д. с. решаются элементарно любым способом.

Методика расчета. Рас-

смотрим для конкретности схему, представленную на рис. 1. Пусть в момент $t = 0$ рубильник K мгновенно переключается из положения 1 в положение 2.

Пусть $e(t)$ — э. д. с., меняющаяся непрерывно по какому-нибудь одному закону, например:

$$1) e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi),$$

$$2) e(t) = E_m e^{-at} \sin \omega t;$$

$$3) e(t) = E_0 e^{-at},$$

или 4) по разным законам на различных участках, но строго периодически.

Такие э. д. с. удобно разделить на „периодические“ (1-я и 4-я) и „закономерные“ (2-я и 3-я). Оба эти вида э. д. с. можно объединить общим названием „принужденные“ э. д. с.

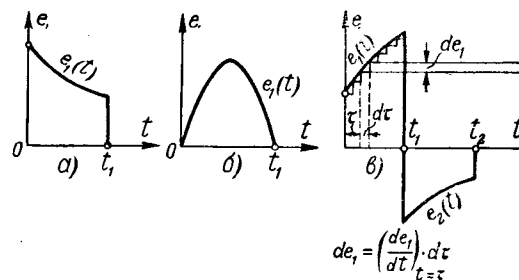


Рис. 2. Различные виды „импульсной“ э. д. с.

Пусть $e_1(t)$ — э. д. с. в виде импульса, изменяющаяся по какому-нибудь закону, например, как показано на рис. 2. Основное ее отличие от э. д. с. первого типа в том, что она может изменяться в разных интервалах времени по различным уравнениям и не повторяется периодически. Эту э. д. с. удобно назвать „импульсной“ э. д. с.¹

На рис. 1 звездочки у катушек индуктивности означают однополярность зажимов.

¹ Не следует эту э. д. с. смешивать с импульсной э. д. с. типа Дирака, очень кратковременное действие которой заменяется ее интегральным эффектом.

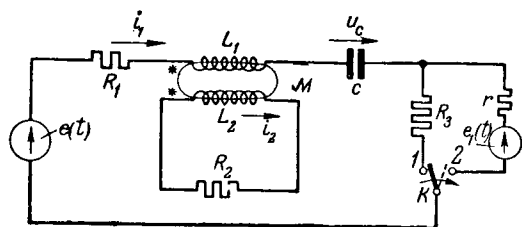


Рис. 1. Расчетная схема.

(1 — положение ключа до коммутации; 2 — после коммутации).

Ставится задача найти в схеме рис. 1 токи i_1 и i_2 после коммутации.

Предварительно рассчитаем предшествовавший коммутации стационарный режим в старой схеме (рис. 1, положение ключа I). Из этого режима следует вычислить только конечные мгновенные значения тех токов и напряжений, которые не изменяются скачком после коммутации. В данном случае это будут величины i_{10-} , i_{20-} , u_{c0-} . Вычисление указанных величин можно провести любым способом как для стационарного процесса. В случае синусоидальных э. д. с. удобнее всего применить символический метод.

Затем рассмотрим новую схему — после коммутации ключа в положение 2 (рис. 1).

Пишем уравнения Кирхгофа для полных токов для текущего момента t :

$$\left. \begin{aligned} i_1(R_1+r) + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + \\ + \frac{1}{C} \int i_1 dt = e(t) - e_1(t), \\ i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Перепишем эти же уравнения в операторном виде с учетом начальных значений функций, причем примем обозначения

$$\left. \begin{aligned} i(t) \doteq I(p); \text{ или короче } i \doteq I. \\ i_1(R_1+r) + L_1 p(I_1 - i_{10-}) + M p(I_2 - i_{20-}) + \\ + \frac{1}{Cp} I_1 + u_{c.o.} = E(p) - E_1(p), \\ i_2 R_2 + L_2 p(I_2 - i_{20-}) + M p(I_1 - i_{10-}) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Решая уравнения (2) относительно I_1 и I_2 , получим для I_1 выражение:

$$\begin{aligned} & \left\{ (L_1 L_2 - M^2) p^3 + [(R_1 + r) L_2 + L_1 R_2] p^2 + \right. \\ & + \left[(R_1 + r) R_2 + \frac{L_2}{C} \right] p + \frac{R_2}{C} \Big\} I_1 = \\ & = p(L_2 p + R_2) [E(p) - E_1(p)] + \\ & + (L_1 L_2 - M^2) i_{10-} p^3 + [R_2 (L_1 i_{10-} + M i_{20-}) - \\ & - L_2 u_{c.o.}] p^2 + (-R_2 u_{c.o.}) p. \end{aligned} \quad (3)$$

Вводя для краткости обозначения

$$\left. \begin{aligned} L_1 L_2 - M^2 &= d_3; \\ (R_1 + r) L_2 + L_1 R_2 &= d_2; \\ (R_1 + r) R_2 + \frac{L_2}{C} &= d_1; \\ \frac{R_2}{C} &= d_0; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} (L_1 L_2 - M^2) i_{10-} &= b_3; \\ R_2 (L_1 i_{10-} + M i_{20-}) - L_2 u_{c.o.} &= b_2; \\ -R_2 u_{c.o.} &= b_1, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

² Если бы $L_1 \times L_2 = M^2$, то неизменной осталась бы сумма ампервитков $(i_1 w_1 + i_2 w_2)_{t=0}$.

перепишем выражение (3) в следующем виде:

$$I_1(p) = \frac{L_2 p^2 + R_2 p}{d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0} [E(p) - E_1(p)] + \frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p}{d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0}. \quad (6)$$

Вводя еще более краткие обозначения

$$\left. \begin{aligned} L_2 p^2 + R_2 p &= Q^2(p); \\ d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0 &= H^3(p); \\ b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p &= G^3(p), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

запишем окончательно

$$I_1(p) = \frac{Q^2(p)}{H^3(p)} [E(p) - E_1(p)] + \frac{G^3(p)}{H^3(p)}. \quad (8)$$

Теперь найдем корни уравнения

$$H^3(p) = d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0 = 0,$$

которые пусть будут p_1 , p_2 , p_3 , после чего выражение для $H^3(p)$ можно записать так:

$$H^3(p) = d_3 (p - p_1) (p - p_2) (p - p_3). \quad (9)$$

Как видим, полный переходный ток имеет в своем составе три составляющих.

Первая составляющая есть ток, вызванный принужденной э. д. с. $E(p)$. Физически — это принужденный ток вместе со свободными составляющими, вызванными введением этой э. д. с. в пустую (т. е. без энергии) схему. Затухание составляющих определяется корнями p_1 , p_2 , p_3 . Под принужденным током будем понимать ток, вызванный принужденной э. д. с. за вычетом всех свободных составляющих, затухание которых определяется параметрами схемы. Вторая составляющая есть ток от импульсной э. д. с., введенной также в пустую схему. Третья слагающая — это свободные токи, вызванные оставшейся в схеме от старого режима энергией в индуктивностях и емкостях. Эти оставшиеся запасы энергии, определяемые значениями i_{10-} , i_{20-} , $u_{c.o.}$ будут разряжаться в виде свободных токов с коэффициентами затухания p_1 , p_2 , p_3 .

Вычисление указанных слагающих токов в целях экономии труда лучше всего вести следующим образом.

Сначала вычисляем принужденный ток от э. д. с. $E(p)$. Для этого в выражение для первой слагающей полного тока подставим изображение принужденной э. д. с., которое должно быть известно (см. таблицы оригиналов и изображений).

Если принужденная э. д. с. изменяется по какому-нибудь периодическому несинусоидальному закону, то можно использовать простой способ автора, изложенный подробно в журнале „Электричество“, № 1 за 1951 г. Поэтому разбирать этот вопрос мы здесь не будем.

Подставив изображение принужденной э. д. с. в выражение (8) и разлагая полученное выраже-

ние по Хевисайду [см. ниже формулу (12)] на ряд слагающих, вычисляем только те слагающие, которые не затухают по законам параметров схемы. Это и будет принужденный ток.

Для конкретности рассмотрим синусоидальную э. д. с.

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi) = E_m \frac{p\omega \cos \psi + p^2 \sin \psi}{p^2 + \omega^2} = E(p). \quad (10)$$

Подставляя ее в первое слагаемое выражения для тока $I(p)$ [см. выражения (7), (8)], получим:

$$\frac{Q^2(p)}{H^3(p)} E(p) = \frac{L p^2 + R_1 p}{d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0} \times \frac{E_m(p\omega \cos \psi + p^2 \sin \psi)}{(p^2 + \omega^2)}. \quad (11)$$

Если к этому выражению применить формулу разложения Хевисайда

$$\frac{G(p)}{H(p)} = \frac{G(0)}{H(0)} + \sum_{p=1}^k \frac{G(p_k) e^{p_k t}}{p_k H'(p_k)}, \quad (12)$$

где производную $H'(p_k)$ часто легче вычислять так (приложение II, п. 1):

$$H'(p_k) = \left[\frac{H(p)}{p - p_k} \right]_{p=p_k}, \quad (13)$$

то получим пять слагаемых соответственно пяти корням знаменателя. Два слагаемых с корнями $p_{4,5} = \pm j\omega$ и представляют принужденный ток. Если проделать несложные алгебраические преобразования, то получим окончательное выражение для принужденного тока в случае синусоидальной э. д. с. (приложение II, п. 2):

$$i_{1np}(t) = \sum_{\pm} \frac{E_m e^{\pm j(\omega t + \psi - 90)}}{2} \frac{Q^2(\pm j\omega)}{H^3(\pm j\omega)}. \quad (14)$$

Вычисление принужденного тока по этой формуле очень просто, проще, чем символическим методом. После сложения двух слагаемых вследствие их сопряженности получим вещественную функцию от t .

В случае несинусоидальной э. д. с. метод определения принужденного тока остается тот же.

Остальные три слагаемых, которые могут быть получены из выражения (11), представляющие свободные токи, обусловленные включением э. д. с. $E(p)$ в пустую схему и затухающие с коэффициентами p_1 , p_2 и p_3 , следует объединить с тремя слагающими свободного тока от начальных запасов энергии. Эти последние слагающие представляются выражением $\frac{G^3(p)}{H^3(p)}$ [выражение (8) или (6)]. Если подробно проделать это объединение для свободного тока, то получим совершенно такое же выражение, как и $\frac{G^3(p)}{H^3(p)}$, только в выражения (5) для b_3 , b_2 , b_1 будут входить не значения i_{10} , i_{20} , u_{c0} , а начальные значения свободных токов и напряжений³, т. е. $i_{1cв.о.}$,

$i_{2cв.о.}$, $u_{cв.о.}$. Эти последние определяются из двух теорем коммутации на основании следующих равенств:

$$\left. \begin{aligned} i_{10-} &= i_{10} = i_{1np.о.} + i_{1cв.о.}; \\ i_{20-} &= i_{20} = i_{2np.о.} + i_{2cв.о.}; \\ u_{c0-} &= u_{c0} = u_{c.нр.о.} + u_{c.св.о.} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Таким образом, для свободных токов получим выражение:

$$I_{1cв}(p) = \frac{G_{cв}^3(p)}{H^3(p)} = \frac{b_{3cв} p^3 + b_{2cв} p^2 + b_{1cв} p}{d_3 (p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)}, \quad (16)$$

где

$$\left. \begin{aligned} b_{3cв} &= (L_1 L_2 - M^2) i_{1cв.о.}; \\ b_{2cв} &= R_2 (L_1 i_{1cв.о.} + M i_{2cв.о.}) - L_2 u_{c.св.о.}; \\ b_{1cв} &= -R_2 u_{c.св.о.} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Применяя формулу разложения Хевисайда (12) получим:

$$i_{1cв}(t) = \sum_{k=1}^3 \frac{G_{cв}^3(p_k) e^{p_k t}}{p_k \left[\frac{H^3(p)}{p - p_k} \right]_{p=p_k}}. \quad (18)$$

Теперь остается еще вычислить импульсные токи согласно выражению:

$$\begin{aligned} I_{1uм}(p) &= -E_1(p) \frac{L_1 p^2 + R_1 p}{d_3 (p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)} = \\ &= -E_1(p) \frac{Q^2(p)}{H^3(p)} = -E_1(p) Y_1(p). \end{aligned} \quad (19)$$

Для этого находим оригинал переходной проводимости по той же формуле разложения Хевисайда:

$$y_1(t) = \sum_{k=1}^3 \frac{Q^2(p_k) e^{p_k t}}{p_k \left[\frac{H^3(p)}{p - p_k} \right]_{p=p_k}} \quad (20)$$

и далее применяем интеграл Дюамеля, который представляет суммирование токов от отдельных прямоугольных импульсов э. д. с.:

$$i_{1uм}(t) = e_1(0) y_1(t) + \int_0^t \left[\left(\frac{de_1}{dt} \right)_{t=\tau} \cdot d\tau \right] y_1(t - \tau). \quad (21)$$

Для конкретности возьмем сложный импульс, представленный на рис. 2, в, и покажем применение интеграла Дюамеля. Так, для тока на третьем участке для момента $t > t_2$ получим следующее выражение:

$$i_{1uм}(t) = e_1(0) y_1(t) + \int_0^{t_1} \left(\frac{de_1}{dt} \right)_{t=\tau} \cdot d\tau \cdot y_1(t - \tau) +$$

³ Более подробно об этом см. приложение II, п. 3.

$$+ [e_2(t_1) - e_1(t_1)] \cdot y_1(t - t_1) + \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{de_2}{dt} \right)_{t=\tau} d\tau \times \\ \times y_1(t - \tau) - e_2(t_2) y_1(t - t_2). \quad (22)$$

Указанная форма записи интеграла Дюамеля дает возможность, обходя последовательно изображение импульса на чертеже, легко написать выражение для тока как сумму токов от отдельных конечных и бесконечно малых импульсов э. д. с., причем каждый такой импульс считается продолжающимся бесконечно долго.

После нахождения всех составляющих токов получим полный ток как сумму токов принужденного, свободного и импульсного [выражения (14), (18) и (22)]:

$$i_1(t) = i_{1np}(t) + i_{1св}(t) + i_{1им}(t). \quad (23)$$

Применение формулы разложения Хевисайда в случае равных и нулевых корней. Обычно принято считать, что если система имеет равные или нулевые корни, то формула Хевисайда (12) непосредственно неприменима, и для определения оригинала искомой функции следует пользоваться другими методами. Однако если предположить, что равные корни различаются между собой на некоторую малую величину α , а нулевые корни отличаются от нуля и взаимно на малую величину ϵ , то формулу Хевисайда можно применить непосредственно. Здесь предполагается наличие двух или трех равных или нулевых корней. Получающиеся при этом неопределенности раскрываются весьма просто, если писать производную $H'(p_k)$ в виде выражения (13).

Написав и вычислив все слагаемые по формуле Хевисайда при указанном допущении, объединим слагаемые, относящиеся к одной группе нулевых корней, и приведем их к общему знаменателю. Получим выражение, которое при стремлении α к нулю принимает неопределенный вид

Раскрываем эту неопределенность по правилу

Лопиталя, дифференцируя числитель и знаменатель полученной дроби по α , и после этого переходим к пределу, когда $\alpha \rightarrow 0$.

При двух кратных корнях после первого дифференцирования неопределенность раскрывается. При трех кратных корнях следует продифференцировать еще раз. Тогда неопределенность раскрывается.

Аналогично поступаем с членами от нулевых корней, причем вместе с ними объединяем первый член $\frac{G(0)}{H(0)}$, который при наличии нулевого корня обращается в бесконечность. Раскрывая полученную неопределенность вида $\frac{0}{0}$ дифференцирова-

нием по ϵ , получим определенное выражение (приложение II, п. 4).

Заключение. Сформулируем те преимущества, которые дает предлагаемый в статье метод рас-

переходных процессов. Всевозможные виды коммутации — включение, выключение, переключение и другие при любых начальных условиях или не при нулевых

решаются единым методом без всяких различий и притом без сколько-нибудь значительных затруднений.

2. Раздельное вычисление принужденного и свободного токов значительно облегчает расчет, так как операторное выражение для свободного тока получается значительно проще, чем то же для полного тока.

Знаменатели операторного выражения для принужденного, свободного и импульсного токов одинаковы и потому вычисляются один раз при решении системы уравнений.

3. Вычисление „операторного сопротивления“ $Z(p)$ не требуется, так как пользование им имеет смысл только для принудительных начальных условий и для схем, не содержащих взаимной индукции. Это сильно сужает круг вопросов и в то же время не дает никаких преимуществ. Кроме того, и вычисление $Z(p)$ для сложных схем громоздко.

4. Для всех без исключения случаев применяется только одна и притом самая простая формула разложения Хевисайда, которая без особых затруднений используется и для случая двух-трехкратных или нулевых корней.

5. Применение интеграла Дюамеля сохраняется только для импульсных э. д. с., так как во всех остальных случаях пользование им, как правило, приводит к более громоздким вычислениям по сравнению с другими методами.

При этом применяется только одна, самая простая, форма записи интеграла Дюамеля, которая очень легко запоминается, так как записывается в форме, наглядно суммирующей действие отдельных, конечных и бесконечно малых импульсов э. д. с. при последовательном обходе заданного импульса любой сложности.

6. Вычисление принужденного тока от синусоидальной э. д. с. сильно облегчается применением формулы (14).

Приложение I. Пример расчета. В качестве примера расчета рассмотрим схему, изображенную на рис. 1 в основном тексте. Пусть э. д. с. $e(t)$ меняется до коммутации по закону косинуса $e(t) = E_m \cos \omega t$, а после коммутации — по закону затухающего косинуса $e(t) = E_m e^{-\alpha t} \cos \omega t$. Пусть импульсная э. д. с. изменяется по кривой, показанной на рис. 2, а, по уравнению $e_1(t) = E_{10} e^{-t}$ и обрывается в момент $t = t_1$. Примем следующие числовые данные:

$$E_m = 100 \text{ в}; \quad \omega = 100 \frac{1}{\text{сек}}; \quad \alpha = 5; \quad E_{10} = 100 \text{ в};$$

$$t_1 = 1 \text{ сек}; \quad R_1 = 10 \text{ ом}; \quad R_2 = 5 \text{ ом}; \quad R_3 = 10 \text{ ом};$$

$$r = 5 \text{ ом}; \quad L_1 = 0,05 \text{ гн}; \quad L_2 = 0,05 \text{ гн}; \quad M = 0,04 \text{ гн};$$

$$C = 0,005 \text{ ф}.$$

Проведем расчет в соответствии с указанным в основном тексте планом. Учтем, что новая схема (после коммутации) отличается от старой только тем, что R_3 заменяется сопротивлением r и вводится импульсная э. д. с. $e_1(t)$. Поэтому для расчета режима до коммутации можно воспользоваться уравнениями и формулами, выведенными для новой схемы.

1. **Расчет режима до коммутации.** Ток в старой схеме в операторном виде будет иметь вид [выражение (8)]:

$$I_1(p) = \frac{Q^2(p)}{H^3(p)} E(p).$$

Здесь по (7):

$$Q^2(p) = L_2 p^2 + R_2 p = 0,05p^2 + 5p;$$

$$H^3(p) = d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0 = 9 \cdot 10^{-4} p^3 + 1,25p^2 + 110p + 1000,$$

где коэффициенты d_3 , d_2 , d_1 и d_0 вычисляются по (4):

$$d_3 = L_1 L_2 - M^2 = 0,05 \cdot 0,05 - 0,04^2 = 9 \cdot 10^{-4};$$

$$d_2 = (R_1 + R_3) L_2 + L_1 R_2 = (10 + 10) \cdot 0,05 + 0,05 \cdot 5 = 1,25;$$

$$d_1 = (R_1 + R_3) R_2 + \frac{L_2}{C} = (10 + 10)5 + \frac{0,05}{0,005} = 110;$$

$$d_0 = \frac{R_2}{C} = \frac{5}{0,005} = 1000.$$

Далее, так как $e(t) = E_m \sin(\omega t + 90^\circ)$, то, применяя непосредственно формулу (14), получим стационарный синусоидальный ток до коммутации:

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \sum_{\pm} \frac{E_m e^{\pm j\omega t}}{2} \frac{Q^2(\pm j\omega)}{H^3(\pm j\omega)} = \sum_{\pm} \frac{100e^{\pm j\omega t}}{2} \times \\ &\times \frac{0,05(\pm j100)^2 + 5(\pm j100)}{9 \cdot 10^{-4}(\pm j100)^3 + 1,25(\pm j100)^2 + 110(\pm j100) + 1000} = \\ &= \sum_{\pm} \frac{50 \angle \pm \omega t \pm 5 \sqrt{2} \angle \pm 45^\circ (\pm j)}{-115 \pm j101} = \\ &= \sum_{\pm} 2,31 \angle \pm \omega t \mp 3^\circ 40' = 4,62 \cdot \cos(\omega t - 3^\circ 40'). \end{aligned}$$

При $t=0$ это выражение дает:

$$i_{10-} = 4,61a. \quad (I,1)$$

Теперь найдем напряжение u_c и ток i_2 , применив символический метод:

$$\dot{U}_c = i_1 \left(\frac{1}{j\omega C} \right) = \frac{4,62 \angle 86^\circ 20'}{j100 \cdot 0,005} = 9,24 \angle -3^\circ 40',$$

что при $t=0$ даст:

$$u_{c0-} = 9,24 \sin(-3^\circ 40') = -0,591 \text{ в}. \quad (I,2)$$

Чтобы получить i_2 , напомним уравнение для второго контура:

$$i_2(R_2 + j\omega L_2) + i_1 j\omega M = 0,$$

откуда

$$i_2 = \frac{-4,62 \angle 86^\circ 20' \cdot j100 \cdot 0,04}{5 + j100 \cdot 0,05} = 2,62 \angle -48^\circ 40'.$$

При $t=0$

$$i_{20-} = -1,97a. \quad (I,3)$$

2. Расчет принужденного режима после коммутации. Принужденный ток согласно выражению (8):

$$I_1(p) = \frac{Q^2(p)}{H^3(p)} E(p). \quad (I,4)$$

Здесь по (7)

$$Q^2(p) = L_2 p^2 + R_2 p = 0,05p^2 + 5p;$$

по (4)

$$d_3 = L_1 L_2 - M^2 = 9 \cdot 10^{-4};$$

$$d_2 = (R_1 + r) L_2 + L_1 R_2 = (10 + 5) 0,05 + 0,05 \cdot 5 = 1;$$

$$d_1 = (R_1 + r) R_2 + \frac{L_2}{C} = (10 + 5)5 + \frac{0,05}{0,005} = 85;$$

$$d_0 = \frac{R_2}{C} = 1000;$$

по (7)

$$\begin{aligned} H^3(p) &= d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0 = \\ &= 9 \cdot 10^{-4} p^3 + p^2 + 85p + 1000. \end{aligned} \quad (I,5)$$

Корни уравнения $H^3(p) = 0$ суть: $p_1 = -14,05$; $p_2 = -79,35$; $p_3 = -1018,4$.

Первый корень находится легко графически. Согласно (9):

$$H^3(p) = 9 \cdot 10^{-4} (p + 14,05) (p + 79,35) (p + 1018,4). \quad (I,6)$$

Изображение принужденной э. д. с. находим по таблицам (К. А. Круг, Основы электротехники, т. II, стр. 1946):

$$\begin{aligned} e(t) &= E_m e^{-\alpha t} \cos \omega t = E_m \frac{p(p+\alpha)}{(p+\alpha)^2 + \omega^2} = \\ &= \frac{100p(p+5)}{(p+5)^2 + 100^2} = E(p). \end{aligned}$$

Подставляя все это в (I,4), получим:

$$I_1(p) = \frac{100p(p+5)(0,05p^2+5p)}{[(p+5)^2+100^2]9 \cdot 10^{-4}(p+14,05)(p+79,35)(p+1018,4)}$$

и после арифметических действий

$$\begin{aligned} I_1(p) &= \\ &= \frac{5550p^2(p+5)(p+100)}{(p+5-j100)(p+5+j100)(p+14,05)(p+79,35)(p+1018,4)}. \end{aligned}$$

По формуле Хевисайда (12) с учетом (13) будем иметь

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \sum_{k=1}^5 5550 \times \\ &\times \left[\frac{p_k(p_k+5)(p_k+100)e^{p_k t}}{(p+5-j100)(p+5+j100)(p+14,05)(p+79,35)(p+1018,4)} \right]_{p=p_k} \end{aligned}$$

Чтобы найти принужденный ток, надо вычислить пять вые два слагаемых: при $p_{4,5} = -5 \pm j100$

$$\begin{aligned} i_{1np}(t) &= \sum_{\pm} 5550 \times \\ &\times \frac{(-5 \pm j100)(\pm j100)(-5 \pm j100 + 100)e^{(-5 \pm j100)t}}{(\pm 2j100)(-5 \pm j100 + 14,05)(-5 \pm j100 + 79,35)(-5 \pm j100 + 1018,4)} \\ &= 2775e^{-5t} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \sum_{\pm} \frac{100 \angle \pm 92^\circ 52' \cdot 138 \angle \pm 46^\circ 24' \cdot \angle \pm 100t}{100,3 \angle \pm 84^\circ 50' \cdot 124,5 \angle \pm 53^\circ 24' \cdot 1013 \angle \pm 5^\circ 40'} \\ &= 3,02e^{-5t} \sum_{\pm} \angle \pm 100t \mp 4^\circ 38' = \\ &= 6,04e^{-5t} \cos(100t - 4^\circ 38'); \end{aligned}$$

при $t=0$

$$i_{1np0} = 6,02a. \quad (I,7)$$

Теперь найдем u_{cnp} . Проще всего для этого задать выражением для u_{cnp} (оно должно быть так же, как то затухающей синусоидой)

$$u_{cnp} = U_{cm} e^{-5t} \sin(100t + \gamma)$$

и связать его с током i_1 соотношением $C \frac{du_{cnp}}{dt} = i_{1np}$

Получим:

$$\begin{aligned} 0,005U_{cm} [-5e^{-5t} \sin(100t + \gamma) + e^{-5t} 100 \cos(100t + \gamma)] &= \\ = 6,04e^{-5t} \cos(100t - 4^\circ 38') \end{aligned}$$

и после сокращения и простых преобразований

$$0,5U_{cm} \cos(100t + \gamma - 2^\circ 54') = 6,04 \cos(100t - 4^\circ 38'),$$

откуда, сравнивая амплитуды и фазы, найдем:

$$U_{cm} = 12,08 \text{ в}, \gamma = -1^\circ 44'.$$

Таким образом, u_{cnp} получит вид:

$$u_{cnp} = 12,08e^{-5t} \sin(100t - 1^\circ 44') \quad (I,8)$$

и при $t=0$

$$u_{cnp0} = -0,366. \quad (I,9)$$

Нахождение i_{2np} проводим аналогично. Задаемся $i_{2np} = I_{2np} e^{-st} \sin(100t + \theta)$, дифференцируем этот ток и подставляем в уравнение Кирхгофа для 2-го контура [уравнение (1)]:

$$5i_{2np} + 0,05 \frac{di_{2np}}{dt} + 0,04 \frac{di_{1np}}{dt} = 0. \quad (I,13)$$

Здесь $\frac{di_{1np}}{dt}$ находится дифференцированием выражения (I,9).

После этого, сравнивая амплитуды и фазы, получим: $I_{2np} = 3,5$ и $\theta = -49^\circ 14'$, и ток

$$i_{2np} = 3,5e^{-st} \sin(100t - 49^\circ 14'). \quad (I,14)$$

При $t = 0$

$$i_{2np0} = -2,65a. \quad (I,15)$$

3. *Расчет свободных токов.* На основании теорем коммутации, используя (I,1), (I,2), (I,3), (I,10), (I,12) и (I,15), согласно разностям (15) получим:

$$\begin{aligned} 4,61 &= 6,02 + i_{1cso}; \\ -1,97 &= -2,65 + i_{2cso}; \\ -0,591 &= -0,366 + u_{cso}, \end{aligned}$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} i_{1cso} &= -1,41a; \\ i_{2cso} &= 0,68a; \\ u_{cso} &= -0,225a. \end{aligned} \right\} \quad (I,16)$$

Подставляя это в формулы (17), получим:

$$\begin{aligned} b_{3cs} &= (L_1 L_2 - M^2) i_{1cso} = (0,05 \cdot 0,05 - 0,04^2) (-1,41) = \\ &= -1,27 \cdot 10^{-3}; \\ b_{2cs} &= R_1 (L_1 i_{1cso} + M i_{2cso}) - L_1 u_{cso} = \\ &= 5[0,05(-1,41) + 0,04 \cdot 0,68] - 0,05(-0,225) = -0,206; \\ b_{1cs} &= -R_2 u_{cso} = -5(-0,225) = 1,125; \end{aligned}$$

$$i_{1cs}(p) = \frac{G_{cs}(p)}{H^3(p)} = \frac{-1,27 \cdot 10^{-3} p^3 - 0,206 p^2 + 1,125 p}{9 \cdot 10^{-4} (p+14,05)(p+79,35)(p+1018,4)} =$$

$$= \frac{-1,41 p^3 - 229 p^2 + 1250 p}{(p+14,05)(p+79,35)(p+1018,4)}$$

я по формуле (18) получим:

$$i_{1cs}(t) = \sum_{k=1}^3 \frac{(-1,41 p_k^2 - 229 p_k + 1250) e^{p_k t}}{\left[\frac{(p+14,05)(p+79,35)(p+1018,4)}{p-p_k} \right]_{p=p_k}}.$$

Вычисляя три слагаемых, получим весь свободный ток:

$$i_{1cs}(t) = 0,064e^{-14,05t} - 0,1725e^{-79,35t} - 1,3e^{-1018t}. \quad (I,17)$$

4. *Расчет импульсных токов.* Согласно выражению (19) находим переходную проводимость

$$Y_1(p) = \frac{Q^2(p)}{H^3(p)} = \frac{0,05p^2 + 5p}{9 \cdot 10^{-4} (p+14,05)(p+79,35)(p+1018,4)}$$

я по (20) ее оригинал

$$y_1(t) = \sum_{k=1}^3 \frac{(55,5 p_k + 5550) e^{p_k t}}{\left[\frac{(p+14,05)(p+79,35)(p+1018,4)}{p-p_k} \right]_{p=p_k}}.$$

Вычисляя три слагаемых, получим:

$$y_1(t) = 10^{-3} (72,8e^{-14,05t} - 18,65e^{-79,35t} - 54e^{-1018t}). \quad (I,18)$$

Импульсная э. д. с. по заданию имеет вид (рис. 2,а): $e_1(t) = 100e^{-t}$. Вычисляя ее значения при $t = 0$ и $t = t_1 = 1$ сек дифференцируя, получим:

$$e_1(0) = 100; \quad e_1(1) = \frac{100}{e} = 36,8; \quad \frac{de_1}{dt} = -100e^{-t}.$$

Теперь применяем интеграл Дюамеля (21): для $0 < t \leq 1$ сек

$$i_{1um}(t) = 100y_1(t) + \int_0^t -100 \cdot e^{-\tau} y_1(t-\tau) d\tau; \quad (I,19)$$

для $t \geq 1$ сек

$$i_{1um}(t) = 100y_1(t) + \int_0^{t-1} -100e^{-\tau} y_1(t-\tau) d\tau - 36,8y_1(t-1),$$

интегрирование не представляет труда.

Приложение II. 1. Доказательство формулы (13). Вполне достаточно доказать эту формулу для трех корней, после чего закон составления производной становится очевидным для любого числа корней.

Итак, пусть:

$$H(p) = (p-p_1)(p-p_2)(p-p_3).$$

Тогда

$$\begin{aligned} H'(p) &= (p-p_2)(p-p_3) + (p-p_1)(p-p_3) + \\ &+ (p-p_1)(p-p_2) = \frac{H(p)}{p-p_1} + \frac{H(p)}{p-p_2} + \frac{H(p)}{p-p_3}. \end{aligned}$$

При $p = p_1$ выпадают все слагаемые, кроме первого; при $p = p_2$, то же, кроме второго; при $p = p_3$, то же, кроме третьего.

Поэтому

$$H'(p_k) = [H'(p)]_{p=p_k} = \left[\frac{H(p)}{p-p_k} \right]_{p=p_k}.$$

При подстановке значения корня p_k сначала надо сократить дробь на $(p-p_k)$, а затем подставить вместо p значение p_k .

2. *Доказательство формулы (14).* Применяя формулу Хевисайда (12) к выражению (11) и вычисляя два слагаемых, соответствующих корням $p_k = \pm j\omega$, получим принужденный ток:

$$\begin{aligned} i_{1np}(t) &= \sum_{p_k = \pm j\omega} \frac{E_m(p_k \omega \cos \phi + p_k^2 \sin \phi) (L_2 p_k^2 + R_2 p_k)}{p_k(p_k \pm j\omega) (d_3 p_k^3 + d_2 p_k^2 + d_1 p_k + d_0)} e^{p_k t} = \\ &= \sum_{\pm} \frac{E_m(\omega \cos \phi \pm j\omega \sin \phi) [L_2(\pm j\omega)^2 + R_2(\pm j\omega)] e^{\pm j\omega t}}{(\pm j\omega) [d_3(\pm j\omega)^3 + d_2(\pm j\omega)^2 + d_1(\pm j\omega) + d_0]} = \\ &= \sum_{\pm} \frac{E_m \frac{1}{2} \angle \pm \frac{\phi}{2} e^{\pm j\omega t} \frac{Q^2(\pm j\omega)}{H^3(\pm j\omega)}}{2} = \\ &= \sum_{\pm} \frac{E_m e^{\pm j(\omega t + \phi - 90^\circ)} \frac{Q^2(\pm j\omega)}{H^3(\pm j\omega)}}{2}. \end{aligned}$$

Здесь два сопряженных слагаемых, которые после суммирования дадут вещественное число.

3. *Обоснование сложения свободных токов.* Остальные три слагаемых выражения (11) представляют собой свободные токи, обусловленные включением э. д. с. $E(p)$ в пустую схему. Они затухают с коэффициентами p_1 , p_2 и p_3 , определяемыми корнями схемы. Их начальные значения определяются отличием от нуля начальных значений принужденных токов в индуктивностях и напряжений на конденсаторах. Если бы эти последние значения в момент $t = 0$ равнялись нулю, то не было бы никакой причины для появления свободных токов. Таким образом, эти небалансы токов i_L и напряжений U_C и проявятся в данном случае в виде свободных токов. Поэтому начальные значения их будут:

$$i_{1cso} = -i_{1pro}; \quad i_{2cso} = -i_{2pro}; \quad u_{cso} = u_{cpro}.$$

Очевидно, для i_{1cs} получится выражение, совершенно аналогичное третьему слагаемому выражения (6), определяющему свободные токи от «старых», предшествовавших

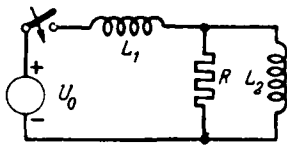


Рис. 3. Схема к примеру (приложение II, п. 4.).

коммутации запасов энергии. Разница будет в том, что вместо i_{10} , i_{20} и u_{c0} войдут значения

$$(-i_{1\text{про}}), (-i_{2\text{про}}) \text{ и } (-u_{c\text{про}}).$$

Коэффициенты b'_3 , b'_2 и b'_1 , очевидно, примут вид: [см. выражения (5)]:

$$b'_3 = (L_1 L_2 - M^2) (-i_{1\text{про}}) \text{ и т. д.}$$

Если теперь сложить оба указанных свободных тока, то получим следующие коэффициенты $b_{3\text{св}}$, $b_{2\text{св}}$ и $b_{1\text{св}}$:

$$b_{3\text{св}} = b_3 + b'_3 = (L_1 L_2 - M^2) (i_{10} - i_{1\text{про}}) = (L_1 L_2 - M^2) i_{1\text{сво}}$$

и аналогично для $b_{2\text{св}}$ и $b_{1\text{св}}$.

4. *Пример расчета в случае кратных или нулевых корней.* В качестве примера рассмотрим включение схемы рис. 3 на постоянное напряжение. Требуется найти $i_1(t)$.

Составляя уравнения Кирхгофа в операторном виде, будем иметь:

$$I_1 = I_2 + I_3;$$

$$L_1 p I_1 + L_2 p I_2 = U_0;$$

$$L_1 p I_1 + R I_3 = U_0.$$

Выражая отсюда ток I_1 , получим операторное выражение:

$$I_1 = \frac{U_0(L_2 p + R)}{L_1 L_2 p^2 + R(L_1 + L_2)p}.$$

Корни знаменателя будут:

$$p_1 = 0; p_2 = -\frac{R(L_1 + L_2)}{L_1 L_2} = -\frac{R}{L},$$

где

$$L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}.$$

Будем считать первый корень равным малой величине, т. е. $p_1 = \epsilon$; тогда выражение для тока $I_1(p)$ примет вид

$$I_1(p) = \frac{U_0}{L_1} \frac{p + \frac{R}{L_2}}{(p - \epsilon)(p - p_2)} = \frac{U_0}{L_1} \frac{G(p)}{H(p)}.$$

Применяя формулу Хевисайда (12), получим:

$$i_1(t) = \frac{U_0}{L_1} \left[\frac{\frac{R}{L_2}}{\epsilon p_2} + \frac{\left(\epsilon + \frac{R}{L_2}\right) e^{\epsilon t}}{\epsilon(\epsilon - p_2)} + \frac{\left(p_2 + \frac{R}{L_2}\right) e^{p_2 t}}{p_2(p_2 - \epsilon)} \right]_{\epsilon \rightarrow 0}.$$

Объединяя первые два члена и упрощая, получим:

$$i_1(t) = \frac{U_0}{L_1} \left[\frac{\frac{R}{L_2}(\epsilon - p_2) + p_2\left(\epsilon + \frac{R}{L_2}\right) e^{\epsilon t}}{\epsilon p_2(\epsilon - p_2)} \right]_{\epsilon=0} + \frac{U_0}{L_1} \frac{p_2 + \frac{R}{L_2}}{p_2^2} e^{p_2 t}.$$

Первое слагаемое в квадратных скобках при $\epsilon \rightarrow 0$ дает неопределенность вида $\frac{0}{0}$. Применяя к нему правило Лопиталья, получим:

$$i_1(t) = \frac{U_0}{L_1} \left[\frac{\frac{R}{L_2} + p_2 e^{\epsilon t} + p_2\left(\epsilon + \frac{R}{L_2}\right) t e^{\epsilon t}}{p_2(\epsilon - p_2) + p_2 \epsilon} \right]_{\epsilon=0} + \frac{U_0}{L_1} \frac{p_2 + \frac{R}{L_2}}{p_2^2} e^{p_2 t}.$$

Неопределенность раскрылась. Подставляя $\epsilon=0$ и упрощая, получим:

$$i_1(t) = \frac{U_0}{p_2 L_1} \left[\frac{p_2 + \frac{R}{L_2}}{p_2} (e^{p_2 t} - 1) - \frac{R}{L_2} t \right].$$

Подставляя сюда выражение для p_2 , получим окончательно:

$$i_1(t) = \frac{U_0}{L_1 + L_2} \left[\frac{L_2^2}{R(L_1 + L_2)} (1 - e^{-\frac{R}{L} t}) + t \right]$$



Измерение вибраций гидрогенераторов

Кандидат техн. наук Г. Н. ТЕР-ГАЗАРЯН

Тбилиси

На электростанции, где проводились опыты, установлены пять однотипных генераторов зонтичной конструкции по 67 тыс. ква, 60 об./мин с турбинами „Каплан“. Генераторы не имеют демпферной клетки. На всех пяти генераторах в начале 1950 г. было произведено исследование вибрации в симметричном и несимметричном режимах для установления $\frac{I}{I_n}$ по амплитуде и частоте вибраций.

Благодаря значительным размерам на этих генераторах жесткость механически наиболее напряженной конструкции крепления активной стали, воспринимающей знакопеременные усилия несимметричного режима, меньше, чем на большинстве других гидрогенераторов. Поэтому возможность повышения длительно допустимой несимметрии $\frac{I_2}{I_n}$ сверх 5% проверялась в данном случае в очень жестких условиях.

Вибрация исследовалась вибрографами ЦНИЭЛ, позволяющими наблюдать и фотографировать колебания частотой от 1 до 200 ... 300 гц при увеличении до 500 раз.

На всех агрегатах вибрация исследовалась на полках крепления активной стали, на нижней и верхней крестовинах, на крышке резинового подшипника и в различных направлениях: тангенциальном, радиальном и вертикальном.

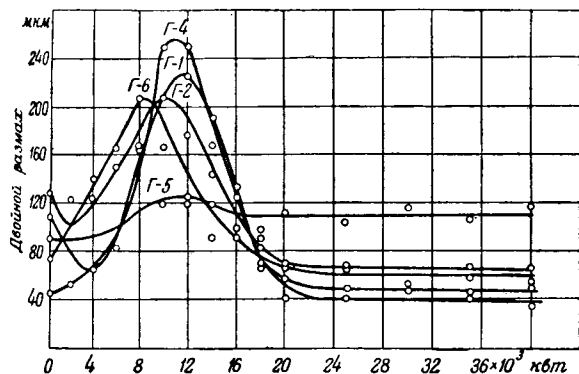


Рис. 1. Двойной размах вибрации в тангенциальном направлении на полках крепления активной стали в зависимости от мощности в симметричном режиме работы генераторов.

Излагаются результаты осциллографического исследования вибрации гидрогенераторов мощностью 67 тыс. ква, проведенного с целью выявления длительно допустимой по условиям вибрации степени несимметрии нагрузки этих генераторов.

На полках крепления активной стали виброграф устанавливался в местах стыка шестерок, где вибрация была наибольшей.

Измерения на каждом генераторе велись одновременно на четырех вибрографах. По окончании испытаний вибрографы были оттарированы на вибростенде ЦНИЭЛ.

На рис. 1, 2, 3, 4 представлены по всем генераторам гЭС результаты измерения вибрации в симметричном режиме в зависимости от мощности. Вибрация на полках крепления активной стали и крестовинах в симметричном режиме содержит составляющие различных частот. Всюду наблюдались вибрация частоты 1 гц (соответствующая скорости вращения агрегата), вибрация 3 ... 6 гц и вибрация высокой частоты. На полках крепления активной стали наблюдалась вибрация высокой частоты (100 гц), также на верхней крестовине. На нижней крестовине наблюдалась частота порядка 50 гц. Данные о частотах вибрации получены в результате обработки более 180 виброграмм, снятых на всех генераторах гЭС.

На рис. 5 приведены для примера копии виброграмм симметричного режима для генератора Г4. Перед каждым снимком тщательно определялась скорость развертки, по которой вполне четко расшифровывался спектр частот вибрации.

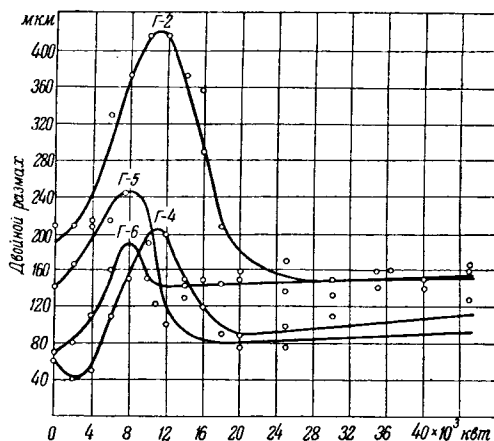


Рис. 2. Двойной размах вибрации в тангенциальном направлении на крышке резинового подшипника в зависимости от мощности в симметричном режиме работы генераторов.

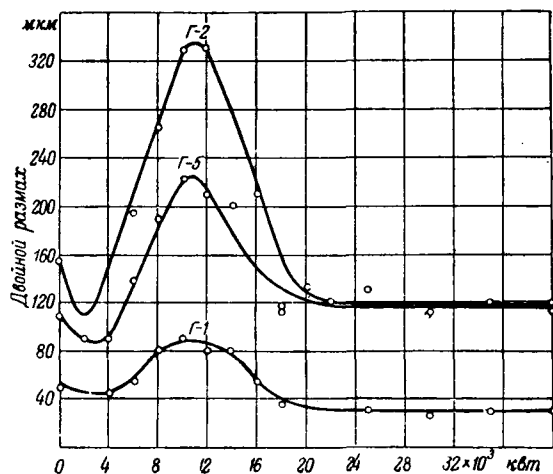


Рис. 3. Двойной размах вибрации в радиальном направлении на лапе верхней крестовины в зависимости от мощности в симметричном режиме работы генераторов.

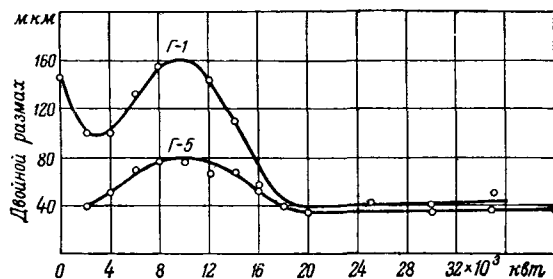


Рис. 4. Двойной размах вибрации в радиальном направлении на лапе нижней крестовины в зависимости от мощности при работе генераторов в симметричном режиме.

На рис. 5,а показаны колебания частоты 1, 3 и 100 гц. На рис. 5,б, снятом с большой скоростью, отчетливо видны колебания 100 гц амплитуды 7 мкм.

Ординаты всех кривых рис. 1, 2, 3, 4 дают двойной размах суммарной вибрации в микронах — сумму вибраций всех имеющих частот.

На всех пяти агрегатах и во всех узлах имеется весьма характерный максимум вибрации, объясняемый исключительно кавитационным режимом турбины. Для всех машин и всех узлов он наступает при мощности 8...11 тыс. кВт. Нормальный (в смысле вибрации) режим работы всех турбин гЭС лежит за указанным максимумом вибрации и начинается для всех машин с мощности 20...25 тыс. кВт, когда вибрация намного меньше и вполне допустима.

По приведенным 14 кривым (рис. 1, 2, 3, 4) изменение вибрации по мощности во всех 14 исследованных точках однотипно. Максимум и независимая часть наблюдаются практически при одних и тех же мощностях. Этого и следовало ожидать при однотипности агрегатов гЭС. Остается лишь подчеркнуть, что, следовательно, все четыре вибрографа вполне надежно зафиксировали увеличение вибрации, затем ее уменьшение и участок независимый от мощности. Таким образом, пока-

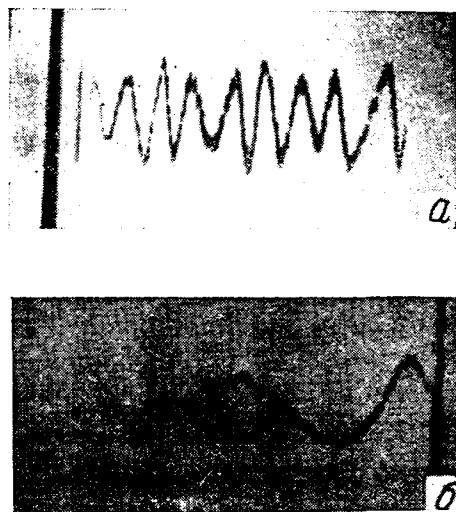


Рис. 5. Вибрация на полке крепления активной стали в тангенциальном направлении.

Симметричный режим, $P = 27$ мвт.

зания вибрографов в симметричном и, следовательно, в несимметричном режиме не вызывают никаких сомнений.

Наблюдавшийся разброс в суммарной амплитуде вибрации генераторов объясняется, видимо, во-первых, неодинаковой жесткостью узлов и, во-вторых, неодинаковой пульсацией турбулентного потока воды через турбины.

Жесткость отдельных узлов определяется не только конструкцией (в данном случае неизменной для всех агрегатов), но также, существенно, качеством сборки и изготовления отдельных деталей. Например, жесткость конструкции крепления стали зависит от качества сварки. В этом смысле даже простым осмотром можно установить разницу в качестве выполнения сварочных работ на генераторах Г5 и Г4 (на Г5 сварка выполнена менее тщательно и длина сварных швов меньше), что и подтверждается соответствующими кривыми рис. 1.

Для непосредственного измерения амплитуды вибрации 100 гц в симметричном и несимметричном режимах было снято 40 виброграмм в указанных выше узлах. Эти виброграммы снимались при наибольшей скорости развертки, так что на снимках получилась совершенно четкая запись колебаний порядка 100 гц. Более высоких частот при увеличении 500 не удалось обнаружить.

На фотоснимках рис. 6 приведены виброграммы несимметричного режима для генератора Г4. Высокочастотные колебания на снимке а — вибрация 80 гц при $\frac{I_2}{I_n} = 4,5\%$, амплитуды вибрации 4,5...5 мкм. На снимке б рис. 6 сняты колебания 80 гц при $\frac{I_2}{I_n} = 15,5\%$, амплитуды 11,5...12 мкм.

На рис. 7 представлены результаты обработки виброграмм с записью колебаний порядка 100 гц на полках крепления активной стали в танген-

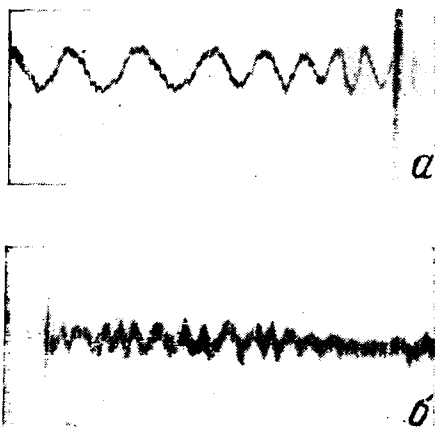


Рис. 6. Вибрация на полке крепления активной стали в тангенциальном направлении. Несимметричный режим.

$$a - \frac{I_2}{I_H} = 4,5\%, \text{ частота } 80 \text{ гц. двойной размах } 4,5 \dots 5 \text{ мкм};$$

$$б - \frac{I_2}{I_H} = 15,5\%, \text{ частота } 80 \text{ гц. двойной размах } 11,5 \dots 12 \text{ мкм}.$$

цальном направлении. В этом направлении вибрации порядка 100 гц оказались наибольшими. Для сравнения, слева от оси ординат приведены значения вибрации 100 гц в симметричном режиме, соответствующие различным мощностям. Зависимости рис. 7 демонстрируют рост вибрации 100 гц с увеличением тока I_2 . Их следует рассматривать как приближенные для каждой машины по причине малого числа опытных точек на каждом генераторе. Однако общее число опытных точек симметричного и несимметричного режимов (16 точек) позволяет сделать определенные выводы. Как видно по точкам симметричного и несимметричного режимов (цифры у точек — активная мощность, кВт), амплитуда вибрации 100 гц при мощности меньше 20 тыс. кВт ниже, чем при больших мощностях, иначе говоря, она не зависит от режима турбины, как это наблюдалось для амплитуды вибраций

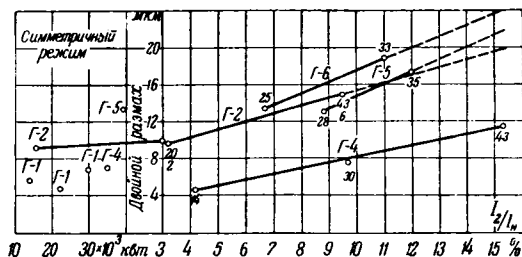


Рис. 7. Двойной размах вибрации 100 гц в тангенциальном направлении на полках крепления активной стали в зависимости от

$$\text{отношения } \frac{I_2}{I_H}.$$

низкой частоты. Это вполне закономерно, так как вибрация 100 гц является следствием только электрического режима и электрических параметров и поэтому не зависит от мощности турбины.

По точкам рис. 7 и зависимостям изменения вибрации 100 гц от степени несимметрии видно, что при $\frac{I_2}{I_H}$ до 15% вибрации 100 гц лежит для различных генераторов гЭС в пределах 12...24 мкм.

Для генератора 1 нет опытных точек, но, судя по другим кривым (рис. 1, 2, 3, 4, 7), вибрация на нем не должна значительно отличаться от вибрации генератора 4, имеющего наименьшую амплитуду колебаний 100 гц. Полученная максимальная двойная амплитуда вибрации порядка 100 гц при $\frac{I_2}{I_H} = 15\%$, равная 24 мкм, является допустимой для длительной эксплуатации по существующим нормативам. Поэтому двойной размах колебаний 100 гц 24 мкм можно считать допустимым и для аварийных режимов, при которых будет иметь место несимметричная нагрузка генераторов.

В испытаниях участвовали, кроме автора, инж. М. А. Кузьмина, инж. Г. С. Сафразбеян, техники Н. В. Шульгин, Б. И. Смирнов, Г. П. Кошкин.

[25. 1. 1952]



Электромагнитный тормоз

Инж. М. А. ПАНАСЕНКОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

При испытании электрических машин для измерения момента на валу испытуемого двигателя непосредственным способом применяются, как известно, различные системы тормозов, в том числе и электромагнитные.

Электромагнитные тормозы, работающие на принципе вихревых токов, могут иметь различные конструкции. По условиям охлаждения и простоте конструкции наибольший практический интерес представляют все же электромагнитные тормозы со стальным диском. За период своего существования эти тормозы претерпели ряд конструктивных изменений и усовершенствований. Однако до сего времени электромагнитные тормозы со стальным диском и рычажной системой измерения в силу ряда их недостатков не находят широкого применения в практике.

Автор разработал новую конструкцию электромагнитного тормоза, удовлетворяющего требованиям современной техники измерения.

В результате проведенной работы на кафедре электрических машин МЭИ в 1946 г. был изготовлен электромагнитный тормоз, давший при испытании удовлетворительные результаты. В настоящее время в лаборатории электрических машин установлено 20 электромагнитных тормозов. Одна из конструкций автора тормоза на 4 кгм представлена на рис. 1. Для большей наглядности магнитная система и противовес со стрелкой отклонены на 45° от нулевого положения.

Конструктивные особенности. Тормоз конструктивно упрощен до минимума. Количество деталей в сравнении с существовавшей ранее конструкцией уменьшено в два раза. Рычажная система заменена измерительной системой, состоя-

Дается краткое описание электромагнитного тормоза, методика снятия характеристик электродвигателей тормозом и указывается область его применения. Приводятся примерные характеристики асинхронного двигателя, снятые при помощи тормоза.

щей из шкалы, градуированной в единицах момента, стрелки и противовеса. Магнитная система тормоза состоит из крестовины

полюсов, расщепленных полюсных наконечников и диска, надеваемого на вал двигателя и вращающегося в зоне расщепленных полюсных наконечников. Перемещение диска по валу двигателя перемещение в том же направлении внутренних полюсных наконечников позволяют довольно удобно и просто регулировать воздушный зазор тормоза. Во избежание передачи тепла на вал испытуемого двигателя в диске предусмотрен текстолитовая втулка с асбестовой прокладкой.

Катушки возбуждения соединяются таким образом, чтобы диаметрально противоположные полюсы имели одноименную полярность. Поток от полюса к полюсу замыкается через диск, в котором при вращении индуцируются вихревые токи. Взаимодействие токов с потоком возбуждения создает тормозной момент, уравновешиваемый противовесом и отсчитываемый по шкале. Точность измерения будет зависеть лишь от градуировки шкалы.

Градуировка шкалы может быть осуществлена двумя способами:

1. Так как тормоз обладает симметрией, то при идентичном выполнении одноименных деталей градуировка может быть выполнена по закону синуса. Для этого достаточно измерить наибольший момент, имеющий место при отклонении груза на 90° от вертикального положения, разделить горизонтальный диаметр на равные части и спроектировать их на дугу шкалы. Полученная заданной величины наибольшего момента достигается путем последовательных поворотов на 180° груза вокруг оси рычага.

2. Для более точных измерений следует надеть проточенный деревянный диск на вал тормоза, и одновременно с навешиванием грузиков на ленточку, прикрепленную к деревянному диску, наносить деления на шкале по указанию стрелки. Каждое деление шкалы будет соответствовать значению момента, вычисленному по произведению веса грузиков на радиус диска и учетом половины толщины ленточки.

Незначительные потери на трения в подшипниках тормоза учитывают оба способа градуировки.

Потери от трения диска о воздух сравнительно невелики и поддаются учету. Они определяются из двух опытов холостого хода: при нали-

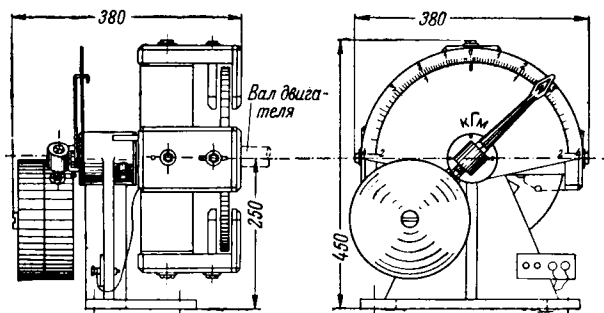


Рис. 1.

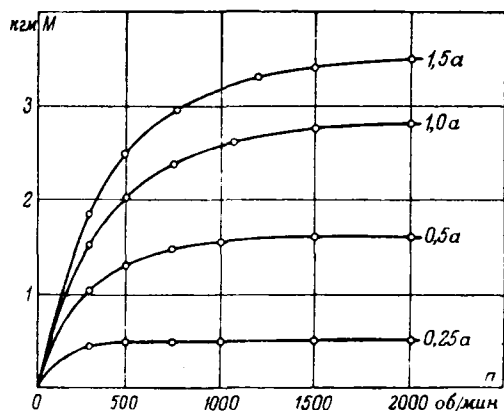


Рис. 2.

чи и отсутствии диска на валу испытуемого двигателя. Для тормоза в 4 кгм при скорости вращения 1500 об/мин эти потери составляют всего лишь 5 вт.

Для расширения пределов измерения в тормозе предусмотрены разъемный груз и двойная шкала. Для удобства измерений шкала градуируется с обеих сторон.

Во избежание опрокидывания груза на тормозе предусмотрено ограничивающее устройство, состоящее из шпильки, закрепленной в остовете крестовины, и двух болтов с резиновыми демпферами на стойке подшипника.

Рабочие характеристики. Возбуждение тормоза осуществляется по потенциометрической схеме от сети постоянного тока или же от сети переменного тока с выпрямителем. Примерные кривые момента тормоза в зависимости от скорости вращения двигателя при различных значениях тока возбуждения показаны на рис. 2. Из кривых следует, что момент тормоза, начиная от некоторой скорости вращения, не зависит далее от последней при одном и том же токе возбуждения, что является характерным свойством данного тормоза. Конструктивные особенности и подбор соответствующего материала для диска позволяют сдвинуть наступление максимума момента в ту или другую сторону по скорости вращения и, таким образом, получить тормоз с желаемой характеристикой.

Независимость момента от скорости вращения делает тормоз совершенно нечувствительным к резким колебаниям скорости (например, при запуске машин постоянного тока при недовозбуждении).

Методика снятия характеристик электродвигателей. Большой практический интерес представляет снятие кривых моментов асинхронных двигателей в функции скольжения. Конструкция тормоза позволяет снять такую характеристику для скольжений от 0 до 1 (рис. 3).

Снятие рабочей части характеристики не представляет затруднений. В остальной части характеристики можно ограничиться измерением трех характерных точек, а именно: максимального¹, минимального и начального моментов и одной точки на неустойчивой части характеристики.

¹ Подразумевается первый максимум момента.

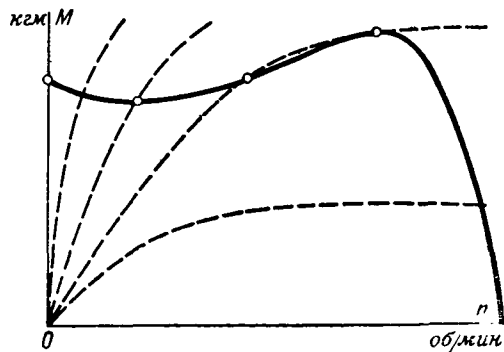


Рис. 3.

Измерение максимального момента. Сложность измерения максимального момента заключается в том, что при приближении к точке максимума момент изменяется незначительно, тогда как скорость вращения изменяется заметно. Для того чтобы правильно зафиксировать скорость вращения, соответствующую максимальному моменту, необходимо следить за стрелкой одного из приборов, ваттметра или амперметра, включенных в схему испытуемого двигателя. Одновременный отсчет момента и скорости следует производить тогда, когда стрелка прибора находится на грани ползучести. Во избежание температурных влияний на измеряемые величины процесс измерения должен вестись форсированно. Для этого, быстро изменяя ток возбуждения тормоза, приближают его характеристику к максимальному моменту двигателя. Затем, плавно изменяя ток возбуждения тормоза, следят за стрелкой амперметра или ваттметра.

Измерение минимального момента. Если при других системах тормозов вообще не представляется возможным измерить непосредственно минимальный момент асинхронного двигателя, то при данной конструкции это может быть сделано достаточно легко. Для этого при отключенном двигателе дают тормозу наибольший возможный ток возбуждения, соответствующий верхнему пределу характеристики тормоза (верхняя кривая рис. 3) и включают двигатель. При разгоне двигателя застрянет на скорости, соответствующей точке пересечения его характеристики с верхней характеристикой тормоза. Затем, плавно изменяя ток возбуждения и наблюдая за стрелкой тормоза, находят минимальный момент и замеряют соответствующую ему скорость вращения.

Измерение момента на неустойчивой части характеристики может быть осуществлено тем же способом, что и измерение минимального момента, если уменьшить далее ток возбуждения тормоза. При этом, однако, следует проявлять некоторую осторожность. Так как предел устойчивости будет определяться характеристикой тормоза, лежащей несколько ниже характеристики, которой определяется максимальный момент, то ток возбуждения тормоза надо изменять так, чтобы не перейти предела устойчивости. Изменять ток возбуждения следует медленно, чтобы исключить влияние инерции маховых масс с из-

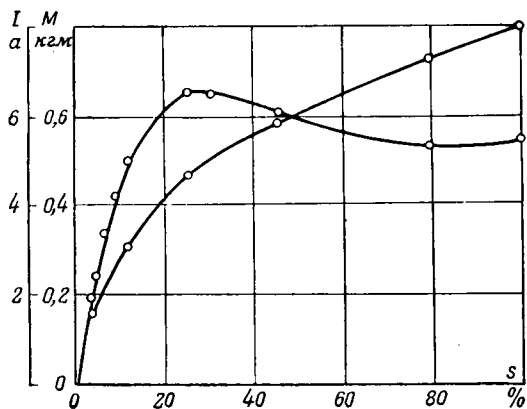


Рис. 4.

менением скорости вращения. Но проще всего можно измерить одну точку на неустойчивой части характеристики путем доведения двигателя до максимума момента. Пересечение характеристики двигателя со спадающей частью характеристики тормоза, соответствующей максимальному моменту, и даст точку, необходимую для построения кривой моментов.

Измерение начального момента. Для того чтобы измерить начальный момент или снять кривую зависимости начального момента от напряжения, подводимого к двигателю, следует в отверстие диска вставить шпильку и повернуть диск в направлении вращения двигателя так, чтобы шпилька плотно прилегала к полюсу тормоза (возбуждение в тормоз в этом случае не подается). При повышении от нуля напряжения, подводимого к двигателю, его ротор стремится повернуться и благодаря шпильке увлекает за собой магнитную систему тормоза, чему противодействует противовес. Каждому значению напряжения соответствует на шкале тормоза значение начального момента. Если начальный момент измеряется только при номинальном напряжении, то в момент включения двигателя тормозную систему следует придержать во избежание резкого толчка. В случае опасности перегрева обмотки двигателя можно ограничиться измерением нескольких точек при пониженном напряжении и получить значение начального момента, соответствующего номинальному напряжению, путем экстраполяции.

На рис. 4 и 5 представлены кривые асинхронного двигателя мощностью 0,5 кВт на 1500 об/мин, снятые тормозом при рабочей температуре двигателя.

При измерении начального момента данный тормоз позволяет выявить такие дефекты двигателя, как прилипания ротора к статору. Когда пазы ротора не скошены, начальный момент получается неоднозначным: если зубец ротора располагается над зубцом статора, момент больше, чем в случае, когда зубец ротора располагается над пазом.

Аналогичное явление наблюдается и в машинах постоянного тока, когда при повороте ротора

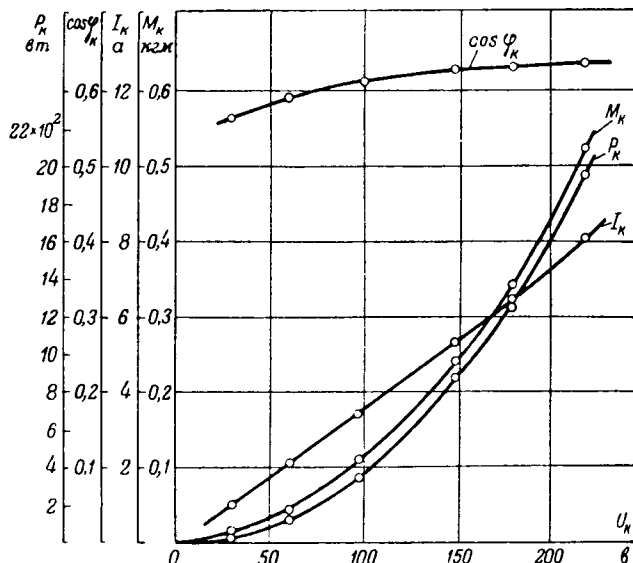


Рис. 5.

на одно пазовое деление под полюсом получается различное соотношение зубцов. Для отсчета большего момента (при измерении начального момента) магнитную систему тормоза, связанную посредством шпильки с диском, следует отклонить (рукой) в сторону большего угла, а для отсчета меньшего момента — в сторону меньшего угла и за начальное значение момента принять среднее из двух.

Измерение момента трения покоя. При отключенном двигателе и тормозе его магнитную систему, связанную шпилькой с диском, отклоняют от нулевого положения на некоторый произвольный угол. Затем, слегка придерживая, позволяют тормозу возвратиться к нулевому положению до полной остановки. При этом отклонение стрелки по шкале от нулевого положения и укажет момент трения покоя двигателя.

Простота в обслуживании и в отсчете моментов позволяет проводить испытания двигателя одному человеку и быстро.

Тормоз данной конструкции может быть расчитан как для испытания мелких двигателей начиная примерно с 5 Вт, так и крупных двигателей.

Действующие в настоящее время тормозы до 4 кгм, как показывает практика, специального охлаждения не требуют, хотя температура диска при полной нагрузке достигает 200°С и выше. Нагрев, несомненно, оказывает влияние на характеристики тормоза. Вопрос находится в стадии исследования.

Тормозы данной конструкции можно успешно применить не только в учебных и научно-исследовательских лабораториях, но и на заводских испытательных станциях, в ремонтных мастерских и на ремонтных заводах, а также для испытания неэлектрических двигателей при различных скоростях вращения и в ряде других случаев.

Первая линия электропередачи с применением трехфазного тока

Инж. С. А. ГУСЕВ

Московский энергетический институт им. Молотова

25 августа 1891 г. была пущена первая в мире линия электропередачи с применением системы трехфазного тока, изобретенной М. О. Доливо-Добровольским (3.1.1862 — 15.11.1919). Важные и жизненные изобретения и открытия, которые были сделаны нашим знаменитым соотечественником и одаренным инженером М. О. Доливо-Добровольским, составили эпоху в истории развития современной энергетики.

В конце 80-х годов прошлого столетия электроэнергетика стала испытывать серьезные затруднения. Дело было в том, что на большинстве действующих электрических станций были установлены генераторы постоянного тока, вырабатывающие ток напряжением 100 или 200 в. Радиус действия таких электростанций не превышал одного или двух километров в зависимости от величины напряжения в линиях.

После изобретения П. Н. Яблочковым трансформатора переменного тока для увеличения радиуса действия электростанций стали применять однофазный переменный ток. Это позволило путем установки трансформаторов распределять электрическую энергию на большие расстояния. Однако широкое применение однофазного тока тормозилось тем обстоятельством, что однофазный ток не был пригоден для электрического привода станков и других орудий производства: для пуска электродвигателей однофазного тока требовалось раскручивать их от руки. Создавался порочный круг в отношении дальнейшего развития электроэнергетики. По технико-экономическим подсчетам следовало, что для уменьшения первоначальных затрат на установку малой мощности на электростанциях, а также для уменьшения эксплуатационных расходов следовало стремиться к укрупнению электрических станций. При использовании же постоянного тока этого нельзя было делать, так как постоянный ток высокого напряжения не мог быть непосредственно использован для питания мелких двигателей и источников света. Трансформация на месте потребления постоянного тока высокого напряжения в низкое напряжение сопровождалась большими потерями энергии и могла быть осуществлена только при помощи вращающихся преобразователей. Переменный однофазный ток допускал широкую централизацию производства электрической энергии, но не был пригоден для использования его на промышленных предприятиях. В этих условиях новый путь для развития электроэнергетики открыл русский инженер М. О. Доливо-Добровольский.

В 1888 г. М. О. Доливо-Добровольский изобрел систему трехфазного тока и асинхронный трехфазный электродвигатель. В своей статье «Из истории трехфазного тока» М. О. Доливо-Добровольский указывал, что первый заказ на изготовление многофазного асинхронного электродвигателя был им передан в мастерские осенью 1888 г. «Мастерская приступила к изготовлению этого электродвигателя 15-го февраля 1888 г. Сейчас же я должен был, конечно, изготовить нужную для опытов машину переменного тока с большим числом фаз. Я использовал для этого станину и соответствующий индуктор, имевшегося восьмиполусного электродвигателя постоянного тока мощностью около 3 л. с. и проектировал для нее зубчатый якорь с большим числом полюсов на полюс. Якорь был сделан по типу кольца Грамма, чтобы было удобнее производить различные переключения. Пока изготовлялись машина и электродвигатель, я посвящал все свободное от работы время, по большей частью поздней ночью, дальнейшему развитию многофазных систем... Я должен был все делать сам и всемо придавать «удобоваримую» осуществимую форму... Постоянно раз-

мышляя... над чертежами и схемами обмоток и протеканием токов, я напал на мысль сделать ответвления от трех равностоящих точек якоря постоянного тока. Так появился трехфазный ток с тремя только проводами... Я долго думал о своеобразном положении трех токов в трех проводах, где нет никакого обратного провода и где... каждый провод одновременно является обратным для других... Прошло немного времени, как появилось, кроме описанного соединения треугольником, также соединение звездой... Я возвращаюсь к моему опытному электродвигателю, который между тем уже был изготовлен (начало 1889 г.)... Уже при первом включении выявилось ошеломляющее для представлений того времени действие. Электродвигатель, якорь которого имел диаметр около 75 мм и длину также около 75 мм и не обладал никакими особыми присоединениями к сети, мгновенно стал вращаться на полное число оборотов и был совершенно бесшумен. Попытка остановить его торможением за конец вала от руки блестяще провалилась... Если принять во внимание малые размеры моторчика, — это представлялось чудом для всех приглашенных свидетелей... При хорошей нагрузке от $\frac{1}{10}$ до $\frac{1}{8}$ л. с.

я получаю значение полного к. п. д. около 80%... Электродвигатели постоянного тока имели к. п. д. по крайней мере на 10% меньше».

После получения благоприятных результатов испытания трехфазного асинхронного электродвигателя М. О. Доливо-Добровольский поднял вопрос о практическом применении системы трехфазного тока и о постройке опытной электростанции трехфазного тока. В 1891 г. должна была состояться Международная электротехническая выставка во Франкфурте на Майне. Возник вопрос о показе нового изобретения М. О. Доливо-Добровольского на этой выставке. Однако выдвинутый М. О. Доливо-Добровольским проект постройки первой в мире высоковольтной линии передачи трехфазного тока из Лауффена во Франкфурте на Майне протяженностью 175 км вызвал в технических кругах явно выраженное недоверие.

В журнале «ETZ» от 20 февраля 1891 г. на стр. 107—108 было напечатано письмо Августа Шнеллера, видного немецкого специалиста по установкам высокого напряжения. В этом письме А. Шнеллер считал необходимым предостеречь лиц, «которым сие ведать надлежит», о невозможности выполнения проекта постройки линии передачи высокого напряжения на расстояние 175 км. «...В данном проекте (передача Лауффен—Франкфурт. С. Г.) я усматриваю только одно стремление к рекламе со стороны известных кругов. ... Я счел своим долгом указать на необычайные трудности передачи энергии переменным током 30 000 в, что делает невозможным выполнение установки».

Далее А. Шнеллер делает «подсчеты» потерь электрической энергии при передаче 300 л. с. на расстоянии 175 км. Результаты этих «подсчетов» приведены ниже:

Омические потери в проводах линии	6,1%
Утечки по поверхности изоляторов	3,2%
Потери на нагревание фарфора изоляторов	50%
Коронирование проводов линии	14%
Потери в генераторе и трансформаторах	14%

Всего потери составят 87,3%

В заключение А. Шнеллер делает следующий вывод:

«Из 300 л. с. во Франкфурте будет получено 37 л. с. Кроме того, следует принять во внимание потери, которые будут иметь место вследствие влияния емкости в линии...

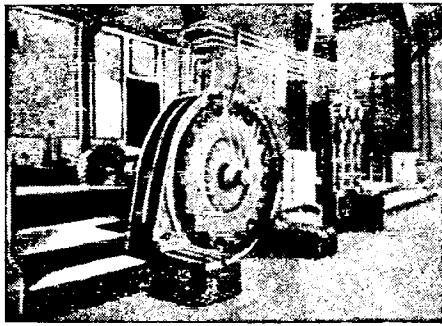


Рис. 1. Генератор в Лауффене.

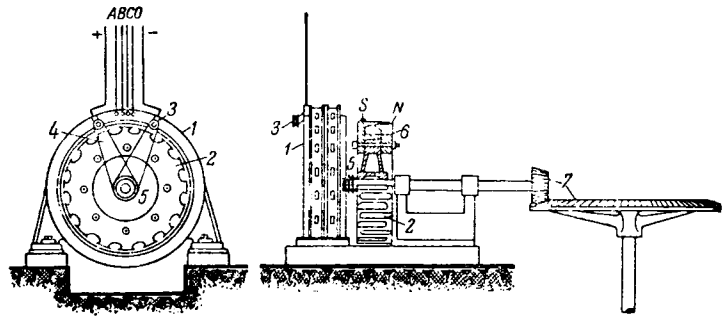


Рис. 2.

1—статор генератора 230 кВа, 150 об/мин; 2—ротор; 3—подпружиненный ролик; 4—бесконечная стальная лента; 5—контактное кольцо; 6—обмотка возбуждения; 7—коническая передача.

На основании приведенных мною данных ясно видно, что весь проект становится технически невыполнимым.

Итак, Шнеллер считал к. п. д. Лауффенской установки меньше 13%. Американец же Эдиссон вообще не признавал важности изобретения М. О. Доливо-Добровольским системы трехфазного тока. Когда в сентябре 1899 г. Эдиссона, посетившего Берлин, фирма АЕГ решила ознакомить с разработанной М. О. Доливо-Добровольским системой трехфазного тока и его асинхронным электродвигателем, Эдиссон категорически отказался от ознакомления и заявил: «Нет, нет, переменный ток — это вздор, не имеющий будущего. Я не только не хочу осматривать двигатель переменного тока, но и знать о нем».

Несмотря на все это, немецкая фирма АЕГ, совместно со швейцарской фирмой Эрликон, решила осуществить проект М. О. Доливо-Добровольского. Положительному решению этого вопроса весьма содействовал главный инженер Франкфуртской выставки Оскар фон Миллер. Здесь следует напомнить, что Миллер в 1882 г. был правительственным директором выставки в Мюнхене. Тогда он содействовал Марселю Дебре в постройке передачи электрической энергии из Мисбаха в Мюнхен с применением постоянного тока.

Приводимое ниже описание электростанции в Лауффене и линии передачи имеет своей основой статьи и корреспонденции, которые были помещены в журналах «Электричество» (1891 г.), «ETZ» (1891 и 1892 гг.) и «Die Elektrizität», издававшимся в 1891 г. Выставочным комитетом Франкфуртской выставки, статьи М. О. Доливо-Добровольского, книгу проф. Артура Вильке «Электричество, его добывание и применение в промышленности и технике». Рисунки сделаны по тем же источникам.

Электростанция в Лауффене. В местечке Лауффен работал Вюртембергский цементный завод, механизмы которого приводились в движение от гидросиловой установки, построенной на порогах реки Неккар, притоке Рейна. Общая мощность гидравлической установки исчислялась в 1500 л. с., из которых 600 л. с. использовались цементным заводом, а 900 л. с. оставались свободными. На базе этой свободной гидравлической мощности был составлен проект постройки в Лауффене электростанции для снабжения электроэнергией города Гейльбронна, стоящего на расстоянии 12 км от Лауффена. Проектом предусматривалось применение постоянного тока. В качестве строителя этой установки был приглашен в 1890 г. О. фон Миллер, который с 1883 по 1887 г. был одним из директоров немецкой компании Эдисона, а с 1887 по 1890 г. Всеобщей электрической компании (АЕГ). Будучи директором АЕГ, Миллер был детально знаком с работами М. О. Доливо-Добровольского по трехфазному току: он оценил их значение для дальнейшего развития практической электротехники. В 1890 г. Миллер внес предложение отказаться от постоянного тока при сооружении электростанции в Лауффене и линии передачи для снабжения Гейльбронна. Это предложение было принято, хотя система трехфазного тока еще нигде не была практически испытана.

Трехфазный генератор и трехфазные трансформаторы для этой установки были заказаны швейцарской фирме Эрликон.

Осенью 1890 г. по приглашению совета Франкфуртской международной электротехнической выставки Миллер принял на себя техническое руководство этой выставкой. Он,

совместно с М. О. Доливо-Добровольским, внес предложение о постройке высоковольтной трехфазной линии электропередачи из Лауффена во Франкфурт на Майне. Это предложение долго обсуждалось в Выставочном комитете и было принято только весной 1891 г. На сооружение этой установки был заключен договор, в котором срок пуска линии передачи был указан не позднее 15 августа 1891 г., тогда как открытие выставки намечалось на 16 мая 1891 г. В случае опоздания пуска в указанный срок линии передачи предусматривалась уплата неустойки в размере 51 000 германских марок. Оборудование электростанции было изготовлено двумя фирмами: Всеобщей компанией электричества (АЕГ) и Эрликон. Фирма Эрликон изготовила и установила на Лауффенской станции трехфазный генератор мощностью 230 кВа, 95 в, 40 гц, 150 об/мин, соединенный конической передачей с вертикальной турбиной мощностью 300 л. с., 38 об/мин (рис. 1 и 2). Обмотка статора генератора состояла из 96 медных стержней диаметром 29 мм, размещенных в пазах, отштампованных в железе статора. Стержни обмотки статора были помещены в асбестовые трубки (гильзы).

Индуктор машины состоял из центрального диска со ступицей и двух боковых колец, снабженных каждое 16 сплошными полюсами в виде загнутой гребенки. Эти гребенчатые полюсы на каждом из боковых колец имели одинаковую полярность, причем если у правого кольца они имели северную полярность, то у левого — южную. При сборке индуктора левое и правое кольца повернуты друг относительно друга на полюсное деление, и поэтому гребенчатые полюсы одного кольца входили в промежутки между полюсами другого кольца и образовывали индуктор с чередующимися в отношении полярности полюсами. Обмотка возбуждения в виде одной катушки помещена была между левым и правым кольцами индуктора. Подвод постоянного тока к обмотке возбуждения осуществлялся при помощи колец и стальных бесконечных лент. Верхние ролики для подвода тока выполнены были подпружиненными, чтобы обеспечить натяжку стальных лент. Индуктор машины был насажен на вал консольно.

Возбудитель для этого генератора был изготовлен фирмой АЕГ и установлен отдельно. В качестве возбудителя была установлена машина постоянного тока типа «NG-50», приводившаяся во вращение от отдельной турбины.

Для повышения напряжения на электростанции в Лауффене был установлен трехфазный масляный трансформатор фирмы Эрликон 200 кВа, 95/15 200 в со схемой соединения обмоток звезда — звезда (рис. 3). Коэффициент трансформации 160. В качестве резерва на электростанции находились еще два аналогичных трансформатора. Генератор и трансформатор были соединены в блок.

Разработанная шеф-электриком фирмы Эрликон инж. Брауном конструкция статора трехфазного генератора была, по заключению М. О. Доливо-Добровольского, весьма удачной, чего он не мог сказать о конструкции индуктора машины. В индукторе создавалось большое магнитное рассеяние, что вызывало недопустимые колебания напряжения при незначительных изменениях нагрузки.

В соединительной линии между зажимами генератора и низковольтной обмоткой трансформатора в каждой фазе были установлены: свинцовый плавкий предохранитель, максимально-минимальное токовое реле и амперметр. В случае срабатывания максимально-минимального реле

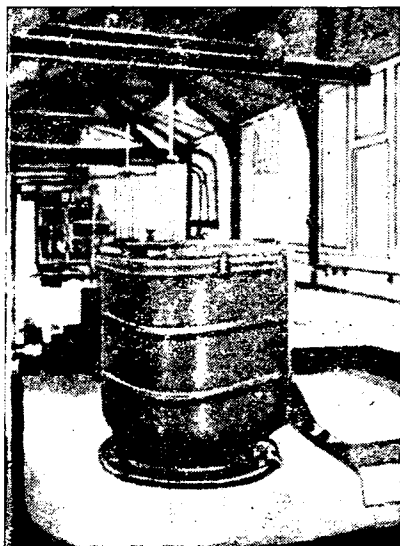


Рис. 3. Трехфазный масляный трансформатор в Лауффене.

рывалась цепь тока в обмотке возбуждения генератора. Внизкой стороне трансформатора были установлены три амперметра, включенные между нулем и фазой. В цепи возбуждения генератора были установлены амперметр и вольтметр. В зависимости от нагрузки дежурный монтер станции регулировал напряжение генератора. Для этой цели была составлена таблица, в которой указывалось, какое следует держать фазное напряжение у генератора в соответствующих показаниях амперметров. Никаких указателей ни на низком, ни на высоком напряжении установлено не было. Нулевые точки генератора и обеих обмоток трансформатора были заземлены. Нулевая точка обмотки трансформатора была заземлена через плавкий предохранитель.

На основании ряда описаний и других материалов, относящихся к Лауффенской гЭС, автору удалось восстановить примерный план и разрез этой станции (рис. 4 и 5). В схеме Лауффенской электростанции (рис. 6) показано, что в случае падения напряжения или перегрузки цепи осуществляется путем разрыва тока в цепи возбуждения трехфазного генератора. Этот разрыв производится максимально-минимальными реле. По некоторым данным можно предположить, что защитные реле прерывали ток в обмотке магнитной защелки, удерживающей в замкнутом состоянии подпружиненную рукоятку регулирующего реостата. Характер работы защитных устройств в этих случаях оставался неизменным.

Линия электропередачи Лауффен—Франкфурт на Майне. Проект линии был выполнен П. Эбертом. Трасса линии отходит из Лауффена во Франкфурт на Майне проходя через следующие пункты: Лауффен — Гейльбронн — Эрфелд — Эбербах — Эрбах — Бабенхаузен — Ханау — Франкфурт на Майне. Общая протяженность линии около 175 км. Линия передачи была выполнена голым медным проводом диаметром 4 мм ($12,5 \text{ мм}^2$). Провод был натянут на штыревых фарфоро-масляных изоляторах, вмонтированных на деревянных столбах. Один из трех изоляторов был укреплен на верхушке столба, а два других — на деревянной перекладине. Пролет между столбами 60 м. На трассе установлено на трассе около 3 000 столбов. На станции Лауффен — Эбербах были установлены большие составные фарфоро-масляные изоляторы с тремя жёзками для масла, а на остальных участках — малый тип изолятора с одним масляным желобком. Эксплуатация линии передачи показала, что ни один из изоляторов малого типа не вышел из строя, а наблюдавшиеся пробоя изоляторов во время эксплуатации линии происходили только на большого типа изоляторов. Объяснялось это тем, что при повреждении фасонных трехжелобчатых изоляторов получался менее плотный черепок, что увеличивало их нагрев

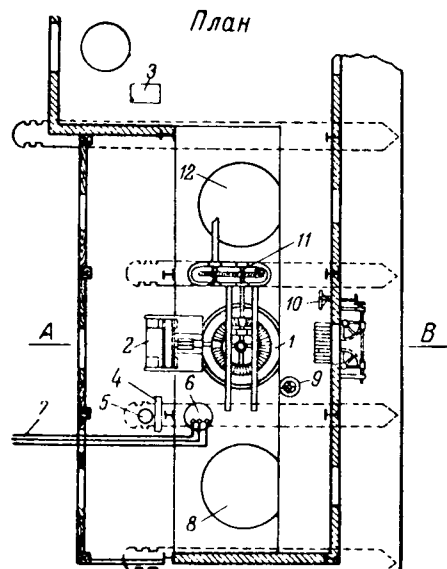


Рис. 4.

1—водяная турбина 300 л. с., 38 об/мин; 2—генератор 230 кВа, 150 об/мин; 3—возбудитель; 4—распределительный щит; 5—реостат; 6—трансформатор 200 кВа, 95/15 200 в; 7—линия передачи 15 кВ; 8—место для Гейльброннского агрегата; 9—штурвал для регулировки оборотов; 10—штурвал для управления затвором; 11—передача к резервной турбине; 12—резервная турбина.

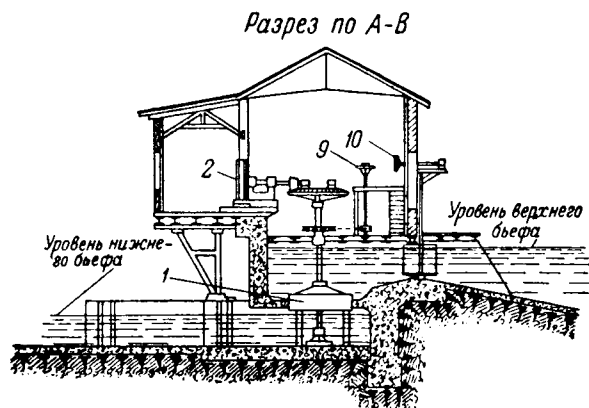


Рис. 5.

1—водяная турбина 300 л. с., 38 об/мин; 2—генератор 230 кВа, 150 об/мин; 3—возбудитель; 4—трансформатор 200 кВа, 95/15 200 в; 5—реостат; 6—вольтметр; 7—максимально-минимальное реле; 8—реостат; 9—заземление.

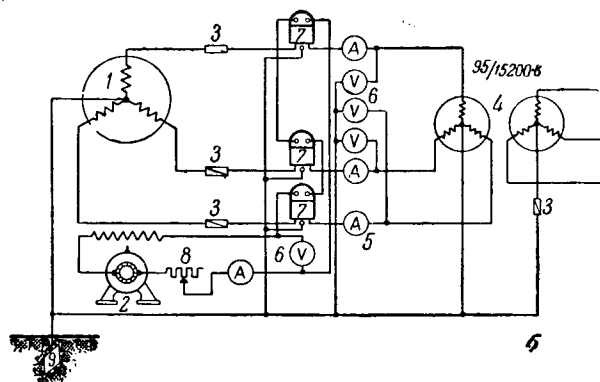


Рис. 6. Схема электрической станции в Лауффене.

1—трехфазный генератор 230 кВа, 150 об/мин; 2—возбудитель; 3—плавкий предохранитель; 4—трансформатор 200 кВа, 95/15 200 в; 5—амперметр; 6—вольтметр; 7—максимально-минимальное реле; 8—реостат; 9—заземление.

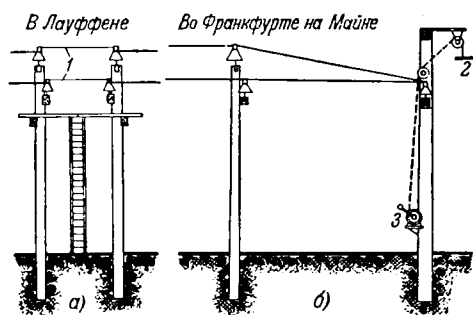


Рис. 7.

и способствовало пробое. Кроме того, вероятность образования трещин при сушке и обжиге больших изоляторов была больше, чем у малого типа, а трещины также должны были приводить к пробое изоляторов.

Коммутационные устройства на линии передачи. Ни в начале линии передачи, ни в ее конце никаких выключателей высокого напряжения установлено не было. Взамен таких выключателей имелось следующее устройство, служившее для прекращения работы линии. В самом начале линии передачи, около здания электрической станции в Лауффене, были установлены на близком расстоянии два деревянных столба, являющихся опорами линии (рис. 7,а). В промежутках между изоляторами каждой фазы линии, разрезанной в этом месте, были установлены три высоковольтных плавких предохранителя. Каждый из предохранителей состоял из двух медных проволок диаметром 0,15 мм и длиной 2,5 м. Для удобства смены этих предохранителей были сооружены площадка и лестница, указанные на рисунке.

На территории выставки во Франкфурте на Майне три провода линии передачи сводились на специальной опоре в одну горизонтальную плоскость (рис. 7,б). На этой же опоре на веревке был подвешен железный брус. При помощи лебедки этот брус мог быть опущен на все три провода высоковольтной линии передачи. В этом случае создавалось трехфазное короткое замыкание в линии, и высоковольтные столбовые предохранители в Лауффене сгорали. Вследствие обесточивания линии передачи срабатывали максимально-минимальные реле и разрывалась цепь возбуждения трехфазного генератора. Скорость вращения водяной турбины катастрофически возрастала, персонал станции бросался закрывать задвижки, регулирующие поступление воды в турбину. После того как процесс отключения линии и остановки турбины был закончен, в провода линии передачи включались телефоны, и персоналу электростанции в Лауффене давали надлежащие указания, в какое время должна быть вновь пущена электростанция и включена линия передачи.

Несовершенство коммутационных устройств на этой установке и отсутствие элементарных условий по обеспечению техники безопасности обслуживающего персонала привели к тому, что незадолго до закрытия выставки электромонтер Лауффенской электростанции Рау случайно коснулся высоковольтных проводов и был убит электрическим током. Это была первая жертва при эксплуатации установок трехфазного тока высокого напряжения.

Приемные подстанции во Франкфурте на Майне. На территории выставки были сооружены две приемные трансформаторные подстанции, где были установлены два трехфазных трансформатора мощностью около 200 кВА каждый. Линейное напряжение 13 800 в понижалось на 112 в. Коэффициент трансформации был 123. Соединение обмоток звезда — звезда. Нулевые точки обеих обмоток трансформаторов были заземлены. Нулевые точки высоковольтных обмоток трансформаторов были заземлены через плавкий предохранитель.

Одна из подстанций служила для питания осветительной нагрузки, а вторая для питания трехфазного асинхронного электродвигателя мощностью 100 л. с. 600 об/мин.

В отличие от современных электродвигателей на вращающейся части была размещена первичная обмотка, питание которой электрическим током осуществлялось при помощи колец и щеток. Ввиду того что при проектировании этого электродвигателя было дано задание обеспечить возможность его работы при двух напряжениях (112 и 200 в),

вторые концы фазных обмоток электродвигателя были также выведены к трем кольцам, размещенным по другую сторону вала двигателя. Путем переключения соединив обмоток электродвигателя с треугольника на звезду или лась возможность работать при двух различных напряжениях. Необходимость конструирования электродвигателя для работы на два напряжения объяснялась неуверенностью, сможет ли успешно работать линия передачи на напряжении 15 000 в или же придется повышать напряжение до 25 000 в. Возможность такого повышения напряжения была обеспечена соответствующей изоляцией линий и наличием тройного комплекта трансформаторов на электростанции в Лауффене.

Вторичная обмотка асинхронного электродвигателя была выполнена стержневой по типу волновой обмотки применявшейся при постоянном токе. В трех точках обмотка была разрезана, и были сделаны отводы для включения трехфазного жидкостного пускового реостата, включенного звездой. Электродвигатель был непосредственно соединен с центробежным насосом, подававшим воду из искусственного водопада с высотой падения воды около 9 м.

Первый пуск линии передачи Лауффен — Франкфурт состоялся 25 августа 1891 г.

Основные параметры линии передачи и результаты испытаний. Имеющая место путаница по вопросу, при каком напряжении работала линия передачи¹, происходит по следующим двум причинам: ни один из авторов, описывающих Лауффенскую установку, не сообщает, какое именно имеет в виду напряжение, указывая параметры линии передачи, а именно: линейное или фазное напряжение. Согласно приведенной выше электрической схеме Лауффенской электростанции видно, что вольтметры были установлены только на низкой стороне и включены между нулем и каждой из фаз. Напряжение на зажимах генератора держивалось в пределах 50—60 в в зависимости от нагрузки электростанции. Если предположить, что среднее фазное напряжение было 55 в, то при коэффициенте трансформации установленного на станции трансформатора равном 160, в линии передачи имелось фазное напряжение 8 800 в, а линейное 15 200 в.

По современной терминологии рабочим напряжением линии передачи принято считать линейное напряжение. Поэтому при описании этой установки следует указывать, что линия передачи работала при напряжении 15 кВ. По закрытии выставки (26 октября 1891 г.) комиссия проводила испытание всей установки при линейном напряжении линии передачи 15 кВ. За время испытания было сделано 17 замеров при различных нагрузках установки. Развиваемая мощность водяной турбины во время испытания изменялась в пределах от 78,2 до 197,4 л. с. Ниже приводятся данные только по двум испытаниям, а именно при минимальной и максимальной мощностях, развиваемых установкой в период ее испытания.

Таблица результатов испытания

	Развиваемые мощности	
	минимальная	максимальная
Мощность, развиваемая водяной турбиной, л. с.	78,2	197,4
Мощность, отдаваемая трехфазным генератором, л. с.	66,1	184,1
Коэффициент полезного действия трехфазного генератора, %	84,5	93,1
Коэффициент полезного действия повышающего трансформатора, %	92,4	96,1
Потери в линии передачи, %	3,1	25,1
Коэффициент полезного действия понижающего трансформатора, %	92,2	95,1
Коэффициент полезного действия установки без учета потерь в генераторе, %	80,9	78,1
Коэффициент полезного действия установки с учетом потерь в генераторе, %	68,5	73,1

¹ См., например, по этому поводу заметку В. Е. Бочкова (З. триесте, № 1, 1952, стр 77—78).

Результаты испытаний Лауффенской установки наглядно показали, что передача электрической энергии при помощи трехфазного тока высокого напряжения может осуществляться на большие расстояния с высоким к. п. д. Кроме того, работа на выставке 100-сильного трехфазного электрического двигателя продемонстрировала надежность его эксплуатации, простоту конструкции и хороший вид. Недостающее звено для дальнейшего развития электрической энергии было найдено: была создана система трехфазного тока, позволяющая легко повышать и понижать напряжение, что давало возможность осуществлять передачу электрической энергии на большие расстояния. Создание трехфазного асинхронного электродвигателя позволило использовать трехфазный ток не только для целей освещения, но и для привода станков и других орудий производства. После окончания официальных испытаний Лауффенской установки профессора Киттнер и Линдней произвели испытание линии передачи при линейном напряжении 30 кв. Для этой цели на Лауффенской электростанции был включен второй трехфазный трансформатор. Первые обмотки обоих трансформаторов были включены последовательно, а вторичные — последовательно. Изменяя возбуждение трехфазного генератора, поддерживали линейное напряжение от 25 до 30 кв. Этот факт испытания линии передачи при повышенном напряжении и способствовал тому, что многие авторы в своих сообщениях указывали, что линия передачи работала при напряжении 20, 22 и 30 кв. После постройки первой линии передачи трехфазного тока более 10 лет продолжалась борьба между сторонниками трехфазного тока, с одной стороны, и сторонниками однофазного и постоянного токов, с другой, в отношении области их применения. В результате этой борьбы система трехфазного тока победила. Наглядным доказательством является тот факт, что в дальнейшем на районных электрических станциях всего мира были установлены только генераторы трехфазного тока.

Здесь уместно сообщить о дальнейшей судьбе Лауффенской электростанции. По свидетельству Р. Э. Классона: распоряжением испытательной комиссии было всего 5—6 лет между окончанием выставки и переходом динамомашины в собственность городской станции Гейльбронна. Этой электростанции в дальнейшем был установлен еще один трехфазный генератор с водяной турбиной мощностью 1 л. с., аналогичный первому агрегату, работавшему во время Франкфуртской выставки. Оба эти агрегата работали параллельно для снабжения электроэнергией города Гейльбронна. Для этой цели на электростанции был установлен однофазный масляный повышающий трансформатор, изготовленный фирмой Эрликон, и сооружена линия передачи длиной 12 км.

В 63-м томе Большой советской энциклопедии по этому вопросу указывается: «В 1889 г. Доливо-Добровольский берет патент на свой трехфазный двигатель переменного тока, и вместе с ним сооружается первая установка трехфазного тока между Лауффеном и Гейльбронном на расстоянии 17 км при 3 кв. напряжении. Эта установка является предшественницей знаменитой электропередачи между Лауффеном и Франкфуртом, построенной в 1891 г.». Это сообщение «БСЭ» ошибочно. По данному вопросу в журнале «Электричество» (№ 2 за 1892 г.) была помещена заметка «Трехфазный ток в Гейльбронне», где сообщалось, что электрическая линия была пущена в январе 1892 г. Сообщение о начале работы электростанции и линии передачи Лауффен — Гейльбронн помещено также в «ETZ» (№ 5 за 1892 г., стр. 63). Таким образом, Гейльброннская установка, как это следует из приведенных заметок, не только не является «предтечей знаменитой электропередачи между Лауффеном и Франкфуртом», а вошла в строй почти на 5 мес. позже (в январе 1891 г.), чем начала работать Лауффен-Франкфуртская линия передачи (август 1891 г.).

Изобретением системы трехфазного тока и асинхронного электродвигателя не ограничивается перечень изобретений и выдающихся исследовательских работ М. О. Доливо-Добровольского.

Из числа важнейших изобретений М. О. Доливо-Добровольского напомним о следующих:

1. Делитель напряжения, позволяющий осуществлять трехфазную систему сети постоянного тока без применения вращающихся машин в качестве делителей напряжения.

2. Трехфазный трансформатор.

3. Прибор для определения сдвига фаз переменного тока.

4. Асинхронный электродвигатель с якорем из массивного железа.

5. Выключатель с деионной решеткой.

Исследовательские работы М. О. Доливо-Добровольского касались ряда важных проблем. Вот некоторые из них: 1) особые явления при токах высокого напряжения — влияние емкости линии на повышение напряжения в линии при отсутствии нагрузки; 2) собственная защита обыкновенных телефонных проводов; 3) о к. п. д. трансформатора; 4) о сдвиге фаз переменного тока при электролизе; 5) соображения о якорях с открытыми и закрытыми пазами; 6) включение трансформатора для питания многопроводных устройств; 7) о применении железа в электрических приборах; 8) о границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния и др.

Из этого перечня изобретений и работ М. О. Доливо-Добровольского следует отметить особое значение и судьбу двух из них: изобретения «выключателя с деионной решеткой» и «исследования о границах применения переменных токов для передачи электрической энергии на большие расстояния».

Выключатель с деионной решеткой был изобретен М. О. Доливо-Добровольским в 1912 г. Первая заявка на получение патента была сделана фирмой АЕГ 4 мая 1912 г. и по ней был получен патент в Германии за № 266745, выданный 1 ноября 1913 г. Этот патент был выдан «на устройство, ограничивающее размеры дуги, возникающей при отключении электрических цепей». В разработанном М. О. Доливо-Добровольским воздушном выключателе над местом разрыва рабочих контактов помещалась деионная решетка, выполненная из отдельных взаимно изолированных металлических пластин.

При разрыве цепи тока под действием направленного вверх потока нагретого воздуха электрическая дуга, возникавшая между расходящимися контактами, загоралась в деионную решетку, где разбивалась на ряд отдельных коротких дуг. Количество пластин деионной решетки подбиралось из расчета того минимального напряжения, которое необходимо для поддержания электрической дуги между отдельными пластинами. В описании изобретения прямо указано, что для поддержания дуги при постоянном токе необходимо иметь напряжение между пластинами около 15—20 в, а при переменном токе около 300 в.

Из текста описания изобретения следует, что М. О. Доливо-Добровольский полностью отдавал себе отчет в принципе работы деионной решетки в воздушном выключателе.

В том же 1912 г., 24 декабря, М. О. Доливо-Добровольский через фирму АЕГ подал вторую заявку на выдачу независимого авторского свидетельства на выключатель с деионной решеткой, снабженный магнитным дутьем. Германский патент за № 272742 был выдан по этой заявке 8 апреля 1914 г. Это ценное изобретение находилось много лет в портфеле фирмы АЕГ и не было ею использовано. Между тем фирма Вестингауз в 1928 г. выпустила воздушные деионные выключатели, основанные на том же самом принципе гашения дуги, какой был впервые предложен М. О. Доливо-Добровольским в 1912 г.

Узнав об этом, фирма АЕГ вынуждена была опубликовать, что честь изобретения воздушного деионного выключателя, принадлежит не Слепяну, сотруднику фирмы Вестингауз, а русскому инженеру М. О. Доливо-Добровольскому. В сборнике «Forschung und Technik» за 1930 г. была помещена статья инженеров фирмы АЕГ Кона и Ульриха под заголовком: «Vielfachfunkenkammer für Luftschalter nach Dolivo-Dobrowolski».

В этой статье не только указывается на авторство М. О. Доливо-Добровольского по данному изобретению, но и приводятся данные о результатах испытаний воздушных выключателей с деионной решеткой. Несмотря на неоспоримость приоритета М. О. Доливо-Добровольского в изобретении в 1912 г. воздушного выключателя с деионной решеткой и магнитным дутьем, в технической литературе честь этого изобретения часто неверно приписывалась не М. О. Доливо-Добровольскому, а Слепяну, например в книге проф. А. А. Смурова «Электротехника высокого напряжения и передача энергии» (ГОНТИ, 1932 г., стр. 270), в книге под редакцией И. С. Ароновича «Аппаратура распределительных устройств высокого напряжения» (ГОНТИ,

1938 г., стр. 113). Однако авторство М. О. Доливо-Добровольского в создании воздушного выключателя с деионной решеткой справедливо уже подчеркивалось проф. О. Б. Броном в 1949 г. в статье, помещенной в журнале «Электричество».

Особо заслуживает внимания последняя исследовательская работа М. О. Доливо-Добровольского «О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния». Эта работа была написана в 1919 г. за несколько месяцев до смерти ее автора. В данной работе М. О. Доливо-Добровольский поставил на разрешение вопрос: «Остается ли система трехфазного тока высокого напряжения для будущих электропередач единственно правильной. Другими словами: стоим ли мы на правильном пути; останется ли нам только совершенствовать детали и увеличивать размеры». На поставленный вопрос М. О. Доливо-Добровольский отвечает: «Думаю — нет. Я ожидаю, напротив, нового возобновления борьбы между переменным и постоянным током».

Анализируя технико-экономические показатели передачи постоянным и переменным токами, М. О. Доливо-Добровольский приходит к выводу: «По моему мнению, несколько сот километров при напряжениях порядка 200 кВ представляют приблизительно предел для передачи мощности переменным током по воздушной линии при обычной частоте. Для кабеля эта граница лежит еще значительно ниже... Попутно я хотел бы указать еще и на то, что многие приспособления, применяемые для защиты линий и машин в случае постоянного тока, получают значительно эффективнее и лучше, чем при переменном токе... Я отнюдь не хочу здесь очернить переменный ток: современное состояние и его развитие дают нам отличные результаты также и в отношении надежности эксплуатации. Сказанное выше относится лишь к устройствам, которые по своей величине сегодня еще кажутся весьма внушительными, но вскоре покажутся скромными... Признание вынужденной необходимости развития постоянного тока высокого напряжения, по-моему, сейчас гораздо существеннее, чем

рассмотрение специальных путей и средств осуществления этой проблемы. Задача большая и многосторонняя: идет не только о получении и трансформировании тока, также о распределительных устройствах и защите, отличающихся более или менее радикально от обычных».

Приведенные выдержки из последней работы М. О. Доливо-Добровольского показывают, что создатель системы трехфазного тока еще в 1919 г. пришел к выводу, что при сооружении мощных линий электропередачи большой протяженности применение постоянного тока высокого напряжения может оказаться более перспективным.

Вопросы устойчивости работы системы в случае изменения трехфазного тока при передаче больших мощностей на большие расстояния сильно усложняются. Наличие в линии передачи нелинейных элементов в виде короны, железа дросселей и трансформаторов создает трудности для точного расчета условий устойчивости работы линий передачи. С целью уменьшения волнового сопротивления линий передачи и потерь на корону придется подвешивать на линиях расщепленные провода, что значительно усложнит монтажные работы и конструктивное оформление линий.

В случае применения постоянного тока все эти трудности отпадают, но в свою очередь появляются новые: необходимость создания высоковольтных выключателей постоянного тока, изготовления высоковольтных выпрямителей, конструирования мощных инверторов для обратного преобразования постоянного тока высокого напряжения в трехфазный переменный ток и разработки соответствующей защитной аппаратуры.

Над созданием новой аппаратуры постоянного тока работают крупнейшие ученые и специалисты — электрики Советского Союза. Проблема применения постоянного тока высокого напряжения для электропередачи, впервые теоретически обоснованная в 1919 г. русским инженером М. О. Доливо-Добровольским, теперь близка к своему разрешению.



Канал имени Москвы

К 15-летию эксплуатации

15 июля 1937 г. вступил в эксплуатацию Канал имени Москвы — величайшее сооружение второй сталинской пятилетки.

Канал имени Москвы был воздвигнут по инициативе товарища Сталина. В период постройки товарищ Сталин трижды посетил районы строительства: 4 июня 1934 г. «глубокую выемку» в Хлебниковском районе, 14 июня 1936 г. Перервинский шлюз и 22 апреля 1937 г. Яхромский шлюз и насосную станцию.

Сооружением канала между реками Волгой и Москвой кардинально решены три основные задачи: а) водоснабжение столицы СССР — г. Москвы; б) создание глубоководного пути между Москвой-рекой и Волгой; в) обводнение Москвы-реки и ее притоков внутри города. Одновременно был разрешен ряд энергетических задач.

Канал имени Москвы является органической частью Сталинского генерального плана реконструкции столицы Союза ССР.

Только благодаря Советской власти и возросшей экономической мощи Советского государства, только благодаря наличию планового хозяйства и социалистической промышленности быстро, в рекордно короткий срок — 4 года и 8 мес., впервые в мире был воздвигнут грандиозный комплекс гидротехнических сооружений.

Общая протяженность канала 128 км. В его составе свыше 200 искусственных сооружений, в том числе: железобетонные и земляные плотины, водосбросы, донные водоспуски, насосные станции, гидроэлектростанции, судоходные шлюзы, земляные дамбы, железнодорожные и шоссейные мосты, туннели, заградительные ворота, речной вокзал,

пристани, подстанции 110 кВ и многие другие. При строительстве канала образовано 7 водохранилищ, в числе которых «Московское море» протяженностью 130 км и шириной до 10—12 км.

Огромные масштабы выполненных работ характеризуются следующими данными. Общее количество переработанной земляной массы достигло 200 млн. м³; бетона уложено 3 000 000 м³; металлоконструкций установлено 34 140 т, в том числе затворов 18 716 т, механизмов 6 000 и кранов 2 127 т. Установлены гидрогенераторы и насосно построено 293 км линий электропередачи 110 кВ; 150 линий электропередачи 6 кВ; 420 км линий связи; уложено 200 км кабеля связи; 700 км силового и контрольного кабеля; установлено: 29 трансформаторов 110 кВ, 34 выключателя 110 кВ, 300 электродвигателей на шлюзах и т.

Для выполнения строительных работ было использовано большое количество механизмов и транспортных средств: свыше 170 экскаваторов, 160 паровозов; свыше 2 100 платформ, около 1 800 автомобилей, свыше 190 паромониторов, 240 бетономешалок, 1 100 электровибраторов, 5 750 электродвигателей, 2 000 насосов (из них 980 глубоких). Уложено 340 км широкой железнодорожной колеи 240 км узкой, забито 110 000 свай, 4 500 т металлических шпунтов и т. д.

Для перевозок на строительство грузов потребовано 1 000 000 вагонов.

На строительстве канала в практику гидростроительства было введено много нового. Впервые в широком масштабе был применен трепал в составе гидротехнического бетона, который позволил снизить расход цемента. Уклад

бетона производилась с помощью электровибраторов. Торф использовался в качестве водонепроницаемого покрытия земляных напорных сооружений. На гидротехнических сооружениях были применены новые виды гидравлических насосов. Были возведены земляные плотины с напором более 30 м. Часть земляных плотин и дамб сооружена на сваях. Построены деревянные трубопроводы с рекордным диаметром 5,4 м и напором более 30 м. Сооружена первая в мире открытого типа.

В отличие от всех других каналов мира канал имени Москвы осуществлен не самотечным, а «энергетическим», т. е. «машинным», так как подъем воды из р. Волги на водораздел осуществляется при помощи насосов, а сброс ее, в обходения р. Москвы, производится через гидроэлектростанцию.

Для канала был принят наиболее рациональный режим работы насосных и гидроэлектростанций. Насосные станции канала, являясь крупнейшими потребителями электроэнергии, работают только в период пониженной нагрузки энергосистемы, а гидроэлектростанции используются только в период ее максимальных нагрузок. Благодаря этому не требовалось увеличивать мощность тепловых электростанций, а наоборот, увеличилась располагаемая мощность энергосистемы.

В результате большой научно-исследовательской работы, проведенной как на самом строительстве, так и на заводах и в научно-исследовательских организациях СССР, впервые в мировой практике были созданы пропеллерные насосы большой производительности.

Наиболее интересным и ценным в энергетической части канала и на судоходных шлюзах является широкое комплексное применение автоматики и телемеханики на базе продукции отечественного электромашиностроения. Полностью автоматизация гидротехнических и насосных станций позволила снять дежурный персонал. Для управления всеми насосными станциями и телекомандования на одной из станций создан диспетчерский пункт, оснащенный средствами телемеханики.

Впервые в гидротехнической практике был применен электрический вал в управлении сложными механизмами шлюзов. Степень автоматизации на шлюзах позволяет дежурному оператору надежно и безопасно для судоходства управлять механизмами, находящимися на расстоянии в несколько сот метров.

Канал имени Москвы явился колыбелью отечественной автоматики и телемеханики гидроэнергетических и судоходных сооружений. Решения вопросов автоматики и телемеханики были оригинальны и превосходили во многом практику зарубежных капиталистических стран. Воспитанные в канале инженерно-технические кадры и накопленный богатый опыт в этой области техники позволили автоматизировать все действующие гидроэлектростанции Советского Союза.

На канале впервые в мировой практике была осуществлена оригинальная электрифицированная навигационная сигнализация (около 1000 сигналов) с применением элементов автоматизации.

Более 500 предприятий Советского Союза участвовало в изготовлении оборудования и материалов для канала. Этому с полным основанием в то время говорили: «канал строит вся страна».

Теперь по прошествии 15 лет можно констатировать, что практика эксплуатации полностью подтвердила целесообразность новых идей и инженерных расчетов, которые были положены в основу проектирования и осуществления этого величайшего сооружения.

Также высоко следует оценить работу эксплуатационного персонала, освоившего и двинувшего вперед сложную технику канала. В любое время минувшего пятидесятилетия на любом сооружении можно было констатировать пресловутое его состояние. Но эксплуатационники канала, как преданные патриоты своей Родины, руководимые славной коммунистической партией, не успокаивались на достигнутом. Получив передовую технику, они не только творчески освоили, не только по-большевистски ею управляют, но и в течение всего прошедшего времени непрерывно рационализировали и совершенствовали ее.

Была установлена возможность повышения отметки дна из водохранилищ, что обеспечило получение ежегодно дополнительно 4..6 млн. квтч.

При проектировании канала предполагалось, что паводки рек, впадающих в канал на его северном склоне, будут транзитом пропускаться в их старое русло. Теперь эти паводки откачиваются насосными станциями в водораздельный бьеф. Этим устранена перекачка воды на двух нижележащих ступенях, уменьшено потребление электроэнергии и увеличена выработка ее на гидроэлектростанциях северного склона канала.

В результате экспериментальных работ в период эксплуатации было установлено, что насосные агрегаты обратимы, что их можно переводить в режим генераторов. Это позволяет увеличить аварийный резерв мощности в энергосистеме.

Внимательное изучение режимов работы маслоснапорных установок на гидроэлектростанциях канала позволило изменить режим их работы и уменьшить давление масла, что существенно сократило расход электроэнергии на собственные нужды. На насосных станциях это дало возможность вводить маслоснапорные установки в работу лишь в период пуска или остановки насосов.

В период освоения автоматики и телемеханики эксплуатационным персоналом было разработано и внедрено в практику большое количество аппаратуры и приспособлений.

Работы по ремонту оборудования упрощены, автоматизированы и механизированы.

Рассматривая насосный агрегат или гидроагрегат как единый комплекс, эксплуатационники внесли изменение в конструктивную схему машины, отказавшись от некоторых промежуточных подшипников.

Существенные изменения внесены в систему смазки. На насосных агрегатах полностью переделана система смазки и применена система самотечного охлаждения масла. Впервые в мировой практике нижние подшипники гидроагрегатов переведены на водяную смазку с заменой баббитовых вкладышей на вкладыши из деревапластики.

Гидроагрегаты канала имени Москвы были первыми машинами в Советском Союзе, на которых по предложению эксплуатационного персонала применена система смазки пяты и верхнего подшипника с постоянным объемом масла в ванне и встроенными в нее водяными маслоохладителями. В настоящее время эта система смазки, как наиболее надежная и простая, получила всеобщее признание и применяется на всех современных мощных гидрогенераторах.

В схемы автоматики введены изменения, позволившие упростить их, уменьшить число аппаратов и элементов и тем самым повысить надежность работы этих схем.

Впервые в Советском Союзе одна из мощных гидроэлектростанций в процессе эксплуатации была переведена на телеуправление. Этим было положено начало применению телеуправления к другим, еще более мощным гидроэлектростанциям. Одна из гидроэлектростанций переведена на автоматическую работу по водотoku с автоматическим извещением о состоянии работы агрегатов по телефонному вызову.

В автоматические устройства судоходных шлюзов внесены улучшения. Если раньше управление механизмами было пооперационное, то сейчас оно поцикловое. От одного импульса автоматически производятся все операции, связанные с действием затворов при шлюзовании в одном направлении. При следовании судна снизу после его захода в камеру нижние ворота закрываются, и автоматически производится наполнение камеры и открытие верхних ворот. Все это позволило сократить время шлюзования и повысить надежность работы шлюза.

В настоящий момент на всех шлюзах канала полностью налажена автоматическая работа подвижных рымов, к которым чалются суда, и освоена техника их использования судоводителями.

Во всех подшипниках механизмов шлюзов и в облицовке затворов их верхних голов широкое применение получили деревопластики, позволяющие перейти на скользящие шты и отказаться от сложных и дорогих катковых штыков.

Размеры статьи не дают возможности осветить все те рационализаторские предложения, которые нашли свое применение и способствовали повышению надежности эксплуатации сложных устройств канала.

Во время войны фашистские варвары произвели разрушения на некоторых сооружениях. Однако как только враг

был разгромлен, все нанесенные сооружения канала раны были быстро залечены.

Канал имени Москвы оказывает большую помощь великим стройкам коммунизма: на канале готовятся кадры будущих эксплуатационников новых судоходных сооружений, проводится ряд экспериментов, позволяющих решить сложные вопросы новостроек, и многое другое.

Наряду с Днепростроем и другими гидротехническими стройками Советского Союза строительство и эксплуатация канала имени Москвы подготовили современное гигантское гидротехническое строительство в СССР, всегда

отличающееся комплексным и социально направленным решением народнохозяйственных проблем.

Отмечая в день славного юбилея канала имени Москвы заслуги коллектива эксплуатационников, бывших строителей и проектировщиков канала, пожелаем им дальнейших успехов в их плодотворном участии в строительстве новых гидротехнических строек коммунизма.

Доц. Б. С. УСПЕНСКИЙ

Московский энергетический институт
им. Молотова



Стандарты и нормы

Проект правил устройства электротехнических установок. Проводки шинопроводами¹

Инж. Д. С. ЛИВШИЦ

Московское проектно-конструкторское управление Центроэлектромонтажа МСПТИ

1. Применение правил

§ 1. Настоящие Правила относятся к электрическим сетям напряжением до 1000 в внутри производственных, общественных культурно-бытовых и жилых зданий, выполняемым помощью шин, лент или профильных проводников из цветного или черного металла на изолирующих опорах и либо проложенным открыто, либо защищенным сетками или кожухами.

§ 2. Проводки шинопроводами должны отвечать требованиям разделов «Распределительные устройства напряжением до 1000 в», «Электрические сети внутри зданий», «Проводки», а равно и других разделов «Правил устройства электрических установок» в той мере, в какой они не изменены настоящими Правилами.

2. Определения

§ 3. Главным называется шинопровод, присоединенный к зажимам питающего трансформатора или генератора.

§ 4. Распределительным называется шинопровод, присоединенный к главному шинопроводу или распределительному щиту.

§ 5. Открытым называется шинопровод, не защищенный корпусом от попадания на него посторонних тел.

§ 6. Защищенным называется шинопровод, огражденный от попадания на него посторонних тел корпусом из сетки, перфорированной стали или иных материалов с размерами ячеек не более 2,5 × 2 см.

§ 7. Закрытым называется шинопровод, смонтированный в сплошной короб, швы и стыки которого допускают проникновение наружного воздуха.

§ 8. Пыленепроницаемым называется закрытый шинопровод, конструкция короба которого не допускает проникновения пыли внутрь, а выведенные от шин контакты для ответвлений в условиях нормальной эксплуатации хорошо закрыты и могут быть без специальных приспособлений доступны для обдува и чистки.

§ 9. Штепсельным называется шинопровод с приспособлениями для легкого и безопасного присоединения и отсоединения ответвлений под напряжением.

§ 10. Штепсельной ячейкой называется совокупность устройств, смонтированных в коробе штепсельного шинопровода для обеспечения возможности легкого и безопасного присоединения ответвления к шинам.

§ 11. Ответвительной штепсельной коробкой называется коробка с смонтированными в нее аппаратами ответ-

вления, приспособленная для закрепления на коробе штепсельного шинопровода и имеющая контакты для врубания в штепсельную ячейку.

3. Область и условия применения шинопроводов

§ 12. Проводки шинопроводами при соблюдении указаний настоящих Правил могут применяться во всех помещениях, за исключением взрывоопасных всех категорий и пожароопасных категорий П-1.

§ 13. Область применения различных типов шинопроводов должна определяться в соответствии со следующими требованиями и учетом условий, изложенных в § 14...16 и 48...52.

а) Открытый шинопровод. В помещениях всех категорий, указанных в § 12 (за исключением пожароопасных), при высоте установки более 3,5 м над уровнем пола при отсутствии необходимости в защитном кожухе.

б) Защищенный шинопровод. То же, как п. а. и пожароопасных категорий П-2, но при высоте установки более 2,5 м над уровнем пола.

в) Закрытый шинопровод. То же, как по п. б (за исключением сырых и особо сырых помещений), но при высоте установки до 2,5 м над уровнем пола, или при применении в качестве магистрали для присоединения потребителей малой мощности независимо от высоты установки.

г) Пыленепроницаемый шинопровод. В помещениях всех категорий, указанных в § 12 (за исключением влажных, сырых, особо сырых и с химически активной средой), при повышенном содержании пыли в воздухе.

§ 14. При применении защищенных или закрытых шинопроводов в помещениях с химически активной средой или пылью, образующей несдуваемую корку, в корпусах шинопроводов должны быть предусмотрены створки или съемные части, открывающие доступ к шинам и изоляторам для их ревизии и чистки.

§ 15. Применение защищенных шинопроводов в помещениях влажных, сырых, особо сырых допускается при соблюдении следующих условий:

а) Должны быть выбраны такие изоляционные расстояния по воздуху и расстояния утечки, которые обеспечивали бы в реальных условиях эксплуатации величину сопротивления изоляции не менее 200 ом/в номинального напряжения сети.

б) Должна быть предусмотрена возможность доступа к шинам и изоляторам для их ревизии и чистки (створки или съемные листы).

§ 16. Защищенные шинопроводы в помещениях, доступных только инструктированному персоналу, могут прокладываться ниже 2,5 м над уровнем пола.

¹ Публикуется в порядке обсуждения в соответствии с согласованным решением Технического управления МЭС, Госэнергонадзора МЭС и Главэлектромонтажа МСПТИ.

§ 17. Шинопроводы не должны прокладываться:

- а) в местах, где возможно их задевание транспортируемыми предметами;
- б) ниже технологического оборудования;
- в) ниже трубопроводов, требующих регулярного обслуживания.

§ 18. Шинопроводы должны быть расположены в местах, доступных для обслуживания, контроля и чистки с лестниц или кранов. В местах труднодоступных разрешается сооружение для этой цели постоянных площадок или мостков.

§ 19. При вертикальной прокладке в закрытых шинопроводах должны быть предусмотрены поэтажные противопожарные отсеки.

4. Общие требования

§ 20. Шинопроводы должны быть выполнены таким образом, чтобы при номинальной нагрузке асимметрия напряжения, создаваемая ими в наиболее удаленной от места питания точке, не превышала 3% номинального напряжения сети.

В необходимых случаях у длинных шинопроводов должна быть сделана транспозиция шин.

§ 21. Компенсаторы линейного расширения должны предусматриваться для жестких шин в следующих случаях:

- а) в местах пересечений температурных и осадочных швов зданий;

- б) во всех местах, где изменения температуры вызывают опасные механические напряжения или недопустимое уменьшение изоляционных расстояний.

§ 22. На прямолинейных участках жестких шин компенсаторы линейного расширения должны быть предусмотрены примерно через каждые 20 м при алюминии, 30 м при меди и 40 м при стали.

§ 23. Для шинопроводов из свободно подвешенных шин должны быть предусмотрены компенсаторы линейного расширения лишь в местах перехода через температурные швы. Установка компенсаторов не требуется, если пролет шин, пересекающий шов, рассчитан на соответствующую стрелу провеса и жестко закреплен с обоих концов.

§ 24. Все ответвления как от главных, так и распределительных шинопроводов должны присоединяться к ним через аппараты разъединения и защиты. Исключение допускается для ответвлений, обладающих пропускной способностью не менее половины пропускной способности защищенного участка шинопровода, которые могут присоединяться к шинопроводу лишь помощью разъединяющего аппарата.

§ 25. В качестве аппаратов защиты ответвлений рекомендуется применять плавкие предохранители.

§ 26. Аппараты ответвлений от главных шинопроводов к распределительным могут устанавливаться в местах, доступных для ревизии и ремонта с лестниц или кранов. Они должны быть расположены или ограждены таким образом, чтобы при их обслуживании исключалась возможность случайного прикосновения к открытым шинопроводам (§ 29).

§ 27. Аппараты ответвлений от шинопроводов к распределительным пунктам, к шинопроводам малой мощности (до 100 а) и к одиночным потребителям должны быть установлены в местах, доступных для обслуживания с пола (§ 29).

§ 28. Аппараты управления, разъединения и защиты самих шинопроводов и всех ответвлений от них должны быть заключены в ящики, так устроенные и установленные, чтобы:

- а) при отключенном аппарате разъединения или управления все токоведущие части аппаратов защиты отключались от шинопровода;

- б) была затруднена возможность прикосновения к оставшимся под напряжением контактам аппаратов разъединения или управления.

Разъединители встраивать в ящики не следует.

§ 29. Должны быть предусмотрены устройства (тяги, тросы) для управления с пола всеми аппаратами управления и разъединения, установленными на недоступной высоте. По возможности эти устройства должны быть доступны лишь помощью штанг.

Во всех случаях должны быть предусмотрены различные с расстояния приспособления, указывающие положение аппарата (включено, выключено).

Возможность управления с пола аппаратами, встроенными в штепсельные коробки, не обязательна.

§ 30. Материал шин надлежит выбирать, руководствуясь следующим:

- а) Сталь допустима во всех тех случаях, где ее применение оправдано экономически (преимущественно в сетях постоянного тока) и этому не препятствует агрессивность среды.

- б) Алюминий рекомендуется к повсеместному применению, за исключением случаев, указанных ниже в пп. «в» и «г».

- в) Медь должна применяться в тех случаях, где среда агрессивна в отношении алюминия.

- г) Для штепсельных шинопроводов во всех случаях должны применяться медь или шины из другого материала, но с омедненными контактами.

§ 31. Корпусы и ограждения закрытых и защищенных шинопроводов могут использоваться в качестве рабочей нулевой шины в соответствии с указаниями § 54.

5. Изоляция, расстояния

§ 32. Наименьшие расстояния по воздуху и по поверхности изоляции между жестко закрепленными токоведущими частями или шинами, а также между ними и их заземленными конструкциями должны быть не менее:

- а) для шинопроводов заводского изготовления при номинальном напряжении 380 в—18 мм; а при 550 в—25 мм;

- б) для шинопроводов заводского изготовления и силы тока до 100 а, предназначенных для установки в помещении с нормальной средой, в отступление от указаний п. «а» при необходимости могут быть допущены: при номинальном напряжении 380 в—12 мм, а при 550 в—15 мм;

- в) для шинопроводов заводского изготовления—50 мм, за исключением защищенных и закрытых шинопроводов в помещениях с нормальной средой, для которых при необходимости могут быть допущены расстояния как в п. «а».

§ 33. Указанные в § 32 расстояния в местах сближения могут быть снижены при условии либо надлежащей местной изоляции шин, либо покрытия изолирующим материалом соответствующих участков заземленных поверхностей.

В помещениях сырых, особо сырых и с химически активной средой снижение указанных расстояний не допускается.

§ 34. Наименьшие расстояния по воздуху и по поверхности изоляции:

- а) между свободно подвешенными ленточными шинами, а также между ними и их заземленными конструкциями или конструкциями здания;

- б) между жестко закрепленными токоведущими частями открытых шинопроводов и конструкциями здания—должны выбираться в соответствии с указаниями § 47 раздела «Проводки».

§ 35. Наименьшие расстояния между токоведущими частями открытых шинопроводов и трубопроводами или технологическим оборудованием должны соответствовать указаниям § 45 раздела «Проводки».

§ 36. Изоляторы должны быть изготовлены из негигроскопического, нестареющего и дугостойкого материала надлежащей электрической и механической прочности (фарфор, стеатит и т. п.).

Исключение из этого правила допускается для шинопроводов в непожароопасных помещениях с нормальной средой, где могут быть применены также:

- а) изоляторы из порошковой и слоистой пластических масс, причем изоляторы из слоистой массы (гетинакс и т. п.) должны быть окрашены эмалью;

- б) изоляторы из твердых пород дерева или из асбестомента, надлежаще пропитанные полимеризующимися маслами или лаками.

§ 37. Шинопроводы, вновь смонтированные, а также сдаваемые в эксплуатацию после капитальных ремонтов или после ревизий и чистки, должны удовлетворять требованиям § 165 раздела «Объем и нормы приемосдаточных испытаний электроустановок».

6. Защитные ограждения и корпуса

§ 38. Штепсельные ячейки должны плотно закрываться крышками, сконструированными таким образом, чтобы возможность их произвольного открывания или падения была предотвращена. При открытых крышках должна быть исключена возможность случайного прикосновения к токоведущим частям. Ячейки должны плотно закрываться корпусами присоединяемых к ним ответвительных штепсельных коробок.

§ 39. Штепсельные ячейки и ответвительные штепсельные коробки должны быть сконструированы таким образом, чтобы при операциях исключалась возможность случайного прикосновения к токоведущим частям или замыкания их на корпус.

§ 40. Патроны предохранителей, встроенных в ответвительные штепсельные коробки при открытых крышках, должны быть полностью отключены от напряжения с обоих концов.

§ 41. Рукоятки управления коммутационными аппаратами, встроенными в ответвительные штепсельные коробки, должны быть выведены наружу и иметь фиксирующие устройства (включено, отключено), отчетливо различимые с расстояния.

7. Допустимые нагрузки, установки аппаратов защиты, сечения

§ 42. Длительно допустимые расчетные нагрузки окрашенных медных, алюминиевых и стальных шин определяются при температуре среды 25°С:

а) для открытых и защищенных шинопроводов в соответствии с указаниями раздела «Нагрузки на кабели и шины»;

б) для закрытых и пылепроницаемых шинопроводов, исходя из температуры допустимого перегрева в наиболее неблагоприятно расположенной шине 70°С.

§ 43. Уставки защиты, а также сечения шин шинопроводов и проводов всех ответвлений должны выбираться во всем согласно указаниям раздела «Электрические сети внутри зданий».

Сечение главного шинопровода, присоединенного к трансформатору, должно всегда выбираться по номинальному току трансформатора независимо от места установки и типа защиты.

8. Системы блоков трансформатор—магистраль (БТМ) и генератор—магистраль (БГМ)

§ 44. Распределение энергии помощью шинопроводов может производиться по системе блоков трансформатор—магистраль (БТМ) или генератор—магистраль (БГМ) без распределительных подстанционных щитов. В этих случаях, по возможности, должны быть применены внутрицеховые комплектные подстанции, расположенные в центрах нагрузок.

§ 45. Рукоятки ручного управления или кнопки дистанционного отключения коммутационных аппаратов, установленных со стороны высокого напряжения трансформатора, должны быть доступны с уровня пола цеха для аварийного отключения главных шинопроводов (вместе с трансформаторами).

§ 46. В случаях, когда вблизи трансформатора коммутационные аппараты со стороны высокого напряжения не устанавливаются или они расположены в местах, неудобных для аварийного отключения (§ 45), в цепи главных шинопроводов должны быть установлены аппараты управления (§ 47).

§ 47. Разъединители и упомянутые в § 46 коммутационные аппараты могут устанавливаться в рассечках шинопроводов на уровне их прокладки, доступном для ревизии и ремонта с лестниц или кранов.

9. Шинопроводы в крановых пролетах зданий

§ 48. Шинопроводы по фермам рекомендуется прокладывать не выше 2,5 м над настилом крана. При этом для открытых шинопроводов должны быть предусмотрены ограждения (§ 49), предохраняющие от случайного соприкосновения с ними с настила крана.

Для открытых шинопроводов, расположенных на уровне 2,5 м и более над настилом крана, таких ограждений не требуется.

§ 49. В случаях, когда трасса шинопровода проходит вдоль кранового пролета, допускается установка ограждений, требуемых § 48, на мосту самого крана.

§ 50. Ниже уровня крана, без применения специальных мер защиты от механического повреждения, допускается прокладка шинопроводов лишь в «мертвой зоне» крана. В этих случаях шинопроводы могут прокладываться либо на конструкциях по рядам колонн вдоль пролета, либо по подкрановой балке.

Исключение допускается для закрытых шинопроводов на силы тока до 100 а, которые могут располагаться на стойках на полу вблизи технологического оборудования в местах, где опасность их повреждения краном мало вероятна.

§ 51. Под троллеями, не ближе 0,5 м к ним, могут прокладываться только защищенные или закрытые шинопроводы.

§ 52. Открытые шинопроводы могут прокладываться ниже уровня крана в его мертвой зоне на общем с троллеями ряду колонн лишь в следующих местах:

а) на общей с троллеями подкрановой балке, но со стороны, противоположной креплению троллей, если между балкой и опорными колоннами имеются окна, защищенные сверху навесом;

б) на конструкциях по общему с троллеями ряду колонн, но со стороны, противоположной креплению троллей.

Открытые шинопроводы не разрешается прокладывать ниже уровня крана по тому ряду колонн, с обеих сторон которого имеются троллеи.

10. Заземления и зануления

§ 53. Ограждения, коробки и конструкции крепления шинопроводов должны быть заземлены или занулены в соответствии с указаниями раздела «Заземления и зануления в электрических установках напряжением до 1000 в».

§ 54. Допускается использование ограждений и коробов шинопроводов в качестве заземляющих («зануляющих») магистралей при условии принятия необходимых мер для обеспечения в них непрерывности электрической цепи и надежной защиты контактных мест от коррозии соответственно условиям среды.



К статье В. Ю. Ломоносова „Операторное исчисление и электротехническое образование“¹

(Электричество, № 1, 1952)

Доктор техн. наук, проф. Г. А. СИСОЯН
Грузинский политехнический институт им. Кирова

В статье освещена только одна небольшая часть весьма важного вопроса о правильной компоновке учебных программ по электротехническим дисциплинам. Действительно, наши познания по электротехнике (как и по другим научным дисциплинам) растут очень быстрыми темпами. Срок обучения в вузах остается неизменным. Вследствие этого сильно осложняется подбор материалов, включаемых в строго ограниченные по времени рамки того или иного курса.

Особенно сложно обстоит дело с курсом теоретических основ электротехники, так как в нем должны быть освещены все исходные положения будущей специальности инженера-электрика. Поэтому вполне назрела необходимость широкого и развернутого обмена мнениями как по содержанию этого важного курса, так и по методике его преподавания. Такому обмену мнениями должно быть посвящено отдельное место. Сейчас же мы коснемся только вопроса, поднятого В. Ю. Ломоносовым.

Операторное исчисление является одним из математических методов анализа физических явлений. В электротехнике мы знаем такие аналогичные ему методы, как метод комплексного исчисления, симметричных составляющих, векторных уравнений, круговых диаграмм и т. д. Некоторые из этих методов применяются только в электротехнике, другие же используются и в других отделах физики. Вместе с тем нужно отметить, что операторное исчисление является каким-то феноменом, выходящим за пределы «классической» математики. Правда, в первый период возникновения этого исчисления Хевисайд, по удачному выражению В. Ю. Ломоносова, «кошеломил всех», но этот период давно прошел.

Ходом логического мышления и анализа формулы операторного исчисления уже обоснованы, и мы уверенно можем сказать, что операторное исчисление сегодня находится именно в рамках «классической» математики. Вопрос о том, следует ли обучать студентов электротехнических специальностей операторному исчислению, решается с большой значимостью последнего для курса теоретических основ электротехники и для будущей специальности учащегося.

Операторное исчисление дает возможность решать определенные режимы для ряда физических процессов, которые могут быть решены и другими методами. По сравнению с другими операторное исчисление имеет свои и положительные, и отрицательные стороны. Крупным недостатком этого метода является его недостаточная наглядность и доходчивость. Если бы мы отказались от классических методов изложения переходных процессов и целиком положились бы на операторное исчисление, то я уверен, что мы не могли бы до студента и десятой доли тех знаний, которые мы даем сейчас. Может быть он, действительно, как утверждает К. М. Поливанов, знал бы наизусть интеграл Фурье, но физической стороны явлений он бы, пожалуй, не представлял.

Крупным преимуществом операторного исчисления является то, что во многих случаях оно облегчает нахождение переходных режимов для сложных электрических цепей. Появившиеся за последнее время таблицы громадного числа изображений и их оригиналов во многих случаях заменяют с большой экономией времени находить решения поставленных задач. Эти положения и определяют

место операторного исчисления в учебных программах. Нельзя поэтому сказать, что операторное исчисление является балластом на электротехническом корабле, как утверждает В. Ю. Ломоносов. С другой стороны, еще труднее доказать, что без операторного исчисления в какой бы то ни было науке нельзя сделать ни шагу, как считает С. В. Страхов. Ведь создал же Фарадей целую эру в теории электричества, не пользуясь математическим аппаратом. Напомним также, что наш знаменитый соотечественник М. О. Доливо-Добровольский сделал все свои исторические открытия, пользуясь почти исключительно элементарной математикой и весьма редко прибегая к услугам высшей математики. А ему ведь была известна математическая теория электромагнитного поля, разработанная Максвеллом. Почти то же самое мы можем сказать и об А. С. Попове. Почему же сегодня без одного математического метода, хотя бы даже операторного, нельзя излагать современную теорию автоматического регулирования?

Мне кажется, что наши учебники и учебные пособия в большей степени страдают от излишних математических методов, чем от недостатка в последних и упрощения в изложении материала. Поэтому я считаю, что операторному исчислению в курсе теоретических основ электротехники должно быть отведено весьма скромное место.

После изложения переходных процессов в цепях обычными методами следует дать только понятие об операторном методе, примерно в объеме, которым ограничились П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман [Л. 1]. Пожалуй, даже приводимая ими теорема разложения является излишней. На практических же занятиях должны быть решены примеры для иллюстрации преимуществ и недостатков рассматриваемого метода. Дальнейшее углубление познаний в этой области может происходить в специальных дисциплинах, если в этом будет необходимость. Но для большинства инженерных специальностей такой необходимости, пожалуй, не бывает.

Нельзя согласиться с мнением С. В. Страхова, что студенту достаточно 12—15 лекционных часов для глубокого освоения операторного исчисления. Едва ли после 15-часового курса, да еще прослушанного с перерывами (частью по математике, частью по электротехнике), учащийся сможет плодотворно прочесть и освоить упоминаемые С. В. Страховым монографии К. А. Круга, М. И. Конторовича, А. И. Лурье и т. д.

К сожалению, мы иногда склонны перегружать студента и не учитывать его бюджета времени. Если в основу учебного процесса положить формулу «все необходимое и ничего лишнего», то в учебных программах операторному исчислению достанется очень мало места.

Литература

1. П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники. Госэнергоиздат, 1951.

Доктор техн. наук, проф. Г. С. АРОНЗОН
Московский автомобильно-дорожный институт им. Молотова

В. Ю. Ломоносов по существу поставил два различных вопроса. Первый — о значении операторного метода для исследования переходных процессов и второй — о преподавании в высшей электротехнической школе операторного исчисления.

¹ Начало дискуссии см. Электричество, № 1, 1952, стр. 66.

Автор статьи не видит существенных преимуществ операторного метода и на примере задачи о проникновении постоянного магнитного поля в стальной лист хочет показать, что оба метода — классический и операторный — в смысле затраты времени приблизительно равноценны. Однако вывод В. Ю. Ломоносова является ошибочным. Рассматриваемая задача является хорошим примером, иллюстрирующим как раз большую пользу применения операторного исчисления.

Действительно, если решение уравнения

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \gamma \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

отыскивается в форме

$$H(x, t) = H_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k(x) e^{\alpha_k t} \quad (2)$$

как это и делает В. Ю. Ломоносов, то операторный метод вряд ли дает какие-либо существенные преимущества. Классический метод разделения переменных, легко приводящий к форме (2), прост и широко применяется не только при решении уравнения (1), но и при исследовании процессов в линиях. Во всех таких случаях, когда решение выражается в виде ряда стоячих волн, следует пользоваться методом разделения переменных. Однако ряд (2) имеет ограниченную область применения. Для малых значений t он сходится медленно, и пользоваться им для расчетов становится практически невозможно. Для малых значений t решение нужно отыскивать в другой форме, которую трудно найти без применения операторного исчисления.

Операторное выражение

$$H = H_0 \frac{\operatorname{ch}(x\sqrt{\gamma\mu p})}{\operatorname{ch}(a\sqrt{\gamma\mu p})}, \quad (3)$$

которое, как утверждает В. Ю. Ломоносов, не дает преимуществ, как раз в данном случае быстрее всего приводит к цели.

Представив (3) в виде ряда

$$H = H_0 [e^{\sqrt{\gamma\mu p}(x-a)} - e^{\sqrt{\gamma\mu p}(x-3a)} + \dots] \quad (4)$$

и перейдя от изображения к оригиналу по формуле [1]

$$e^{-\lambda\sqrt{p}} \div 1 - \Phi\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{t}}\right) = \Phi_1\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{t}}\right), \quad (5)$$

где Φ — интеграл ошибок, сразу получаем решение задачи в виде:

$$H = H_0 \left[\Phi\left(\frac{(a-x)\sqrt{\gamma\mu}}{2\sqrt{t}}\right) - \Phi_1\left(\frac{(3a-x)\sqrt{\gamma\mu}}{2\sqrt{t}}\right) + \dots \right] \quad (6)$$

Ряд быстро сходится для малых t . Для функции Φ — существуют подробные таблицы.

Решение (6) можно получить, конечно, и без применения операторного исчисления. Однако это было бы значительно сложнее, и, что самое главное, заранее трудно было бы догадаться о такой форме решения.

Можно привести много аналогичных примеров из области распространения волн вдоль линии, где операторное исчисление оказывается полезным методом отыскания наиболее удобной формы решения. Не внося ничего принципиально нового в окончательные результаты, этот метод в применении к уравнениям в частных производных позволяет наиболее быстрым образом свести решение поставленной задачи к аналогичным, уже решенным, и воспользоваться имеющимися результатами.

При исследовании переходных процессов в цепях с сосредоточенными постоянными алгебраизация уравнений дает более короткую запись и в этом смысле является своего рода математической стенографией. Поэтому В. Ю. Ломоносов не прав, когда отрицает пользу операторного исчисления вообще.

Другое дело, когда речь идет об изучении операторного исчисления в высшей школе. Соображения, высказанные В. Ю. Ломоносовым по этому вопросу, безусловно, правильны.

Для решения тех, сравнительно простых задач на переходные процессы, которые входят в программу высшей

электротехнической школы, операторный метод не только не дает упрощений, но в силу своей большей математической абстракции затемняет физическую сторону исследуемых явлений. Совершенно нецелесообразно вооружать студента тяжелой артиллерией из арсенала средств операторного исчисления — теоремами запаздывания, смещения, умножения и т. д. и т. п., так как поразить находящиеся перед ним мишени можно и значительно более скромными средствами. Поэтому не прав С. В. Страхов, предлагая даже расширить раздел операторного исчисления в вузовской программе. Достаточно дать студентам только общее понятие об изображении функции и теореме разложения.

Даже в аспирантском курсе, при изучении переходных процессов, основное внимание следует, по нашему мнению, уделить методам характеристик (бегущие волны), разделения переменных (стоячие волны), интегралу Фурье (непрерывный спектр) и т. д., как наиболее доступным пониманию учащихся и не обладающим излишней абстрактностью.

Операторное исчисление полезно и нужно изучать только тем, кто в своей практической деятельности имеет дело со сложными переходными процессами или родственными проблемами. Окончив высшую электротехническую школу, дающую солидную подготовку в области математики и основ электротехники, необходимые сведения по операторному исчислению можно почерпнуть из литературы, тем более что за последние годы у нас в Советском Союзе вышло много хороших руководств, посвященных этому вопросу.

Литература

1. К. А. Круг. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Энергоиздат, 1948.

Кандидат техн. наук М. Ю. ШУХАТОВИЧ

Институт горного дела АН УССР

Подняв вопрос о целесообразности преподавания операторного метода в электротехнических высших учебных заведениях, В. Ю. Ломоносов практически вызвал обсуждение вопроса о целесообразности применения операторного метода в электротехнике.

Нельзя игнорировать тот общеизвестный факт, что операторный метод с самого начала его появления был изложен в математическом методе, который ввел в математику физические, электротехнические понятия и термины (например, переходная проводимость, переходное полное сопротивление). Этот метод появился и начал применяться в электротехнике значительно раньше, чем он был строго обоснован математиками. Хевисайд, как известно, был инженером, а не математиком. Он не давал обоснования метода, и его отношение к операторному методу в достаточной мере ярко определяется следующими его словами: «Стану ли я отказываться от своего обеденного супа, потому что я не полностью понимаю процесс приготовления».

В течение последних 60 лет операторный метод, примененный сначала в электротехнике слабых токов, постепенно проник в другие области техники: в технику сильных токов, в теорию и технику автоматического регулирования в теоретическую и прикладную механику.

Таковы исторические факты. Можно ли их игнорировать? Это было бы по меньшей мере несерьезно. Между тем В. Ю. Ломоносов не только игнорирует эти общеизвестные факты, но и пытается объяснить широкое применение операторного метода исследованием переходных процессов какой-то сенсацией.

Полезность операторного метода подтверждается прежде всего растущей практикой его применения, его непрерывным развитием и внедрением в ряд областей техники. Вряд ли можно объяснить развивающееся применение операторного метода только погоней некоторых «ученых» за модной новинкой.

В известной мере такая мода действительно имела место. И, конечно, прав В. Ю. Ломоносов, когда он решительно протестует против некритического применения операторного метода, против слепого поклонения этому методу, против его фетишизации, против монополии этого метода, против использования этого метода для маскировки некоторых псевдоучеными убогих результатов исследования. Но операторный метод не может нести ответственности за такой беспринципный способ его использования.

Операторный метод можно применять, как известно, таким образом. Операторный метод, в узком смысле слова, может быть применен для алгебраизации решения дифференциальных уравнений с дальнейшим определением постоянных интегрирования из начальных условий. В этом случае применение операторного метода сводится к составлению и решению характеристического уравнения по ранее составленному дифференциальному уравнению в его обычной форме.

Против такой алгебраизации решения дифференциальных уравнений никто не возражает. Она давно уже весьма широко применяется. Однако многие считают, что такое применение операторного метода — это не операторный метод. Никаких серьезных доводов против понимания алгебраического метода решения дифференциальных уравнений как операторного метода в узком смысле этого слова никто не выставляет, и по сути дела, спор о том, является ли составление и решение характеристического уравнения важным моментом операторного метода, это не спор по существу, спор о словах, спор о терминах.

Кроме операторного метода в узком смысле слова, в последние 60 лет нашел огромное применение операторный метод в широком смысле слова. Этот-то операторный метод (в широком смысле слова) и является, на наш взгляд, предметом дискуссии.

Операторный метод в широком смысле слова, который мы в дальнейшем для краткости будем называть обобщенным операторным методом, нельзя рассматривать просто как метод решения дифференциальных уравнений, позволяющий учитывать также начальные и граничные условия. Конечно, обобщенный операторный метод можно использовать также и для решения заранее составленных дифференциальных уравнений. Однако обобщенный операторный метод правильно понимать как самостоятельный метод исследования переходных процессов, позволяющий отбросить картину переходного процесса с помощью приемов, не связанных с составлением и решением дифференциальных уравнений в их обычной форме.

Произведенный заранее учет начальных и граничных условий и сведение большого числа готовых решений в таблицы облегчают и ускоряют аналитическую и вычислительную работу.

Достоинства операторного метода заметно сказываются лишь в случае дифференциальных уравнений высокого порядка (выше второго или третьего). В более простых случаях он не дает заметных преимуществ по сравнению с обычными классическими методами и может применяться лишь для общности изложения.

Применение операторного метода связано, кроме того, с введением ряда новых обобщенных понятий, например операторных сопротивлений и операторных проводимостей. Сведение этих понятий оказалось удобным, например, в теории автоматического регулирования.

Простота и удобство операторного метода позволили, как это правильно отметил С. В. Страхов, решить некоторые частные, но весьма важные, задачи. Удобство и простота как раз и являются теми достоинствами, которыми должен обладать любой математический метод, чтобы получить права гражданства в инженерных анализах и расчетах.

Благодаря удобству и простоте операторный метод и получил теперь широкое применение в тех областях техники, изучение которых связано с учетом переходных процессов. Не следует, однако, ожидать от операторного метода больше того, что он может дать. Он эквивалентен классическим методам в своей познавательной силе, но в ряде случаев более прост и удобен.

В заключение следует отметить, что организация в журнале «Электричество» дискуссии по вопросу о применении операторного метода является своевременной и полезной.

Проф. А. Я. БЕРГЕР

Ленинградский электротехнический институт связи

Операционное исчисление электрикам нужно, но фетишизировать его не надо. Электрики изучают много разных методов решения задач электротехники. Все методы надо считать Искусство инженеров или научного работника со-

стоит в том, чтобы для решения конкретной задачи выбрать наиболее эффективный (для данной задачи) метод.

Но споры нет, зачем из пушек стрелять по воробьям: незначим применять операторный метод для решения одного уравнения первого порядка с постоянными коэффициентами. Но когда мы имеем дело с несколькими дифференциальными уравнениями, то бесспорно, что операторный метод облегчает решение, и оспаривать этот факт невозможно.

Мне думается, что вопрос не в том, нужен или не нужен операторный анализ электрикам. Этот вопрос решен жизнью положительно. Вопрос в том, в каком объеме он им нужен. Вот этот вопрос заслуживает дискуссии, ибо в каждом деле имеется оптимальное решение.

**Кандидат техн. наук,
доц. А. А. ЯНКО-ТРИНИЦКИЙ**

Уральский политехнический институт

Операторный метод завоевал в инженерной практике почетное место; это объясняется его большими вычислительными преимуществами и рядом других его достоинств, о которых скажем ниже. Этот метод широко применяется в электротехнической литературе без всяких комментариев, так как считается, что каждому инженеру-электрику этот метод знаком. Не обучив студентов этому методу, мы поставим молодых инженеров-электриков в чрезвычайно затруднительное положение: они не смогут читать современную электротехническую литературу, а освоить этот метод самостоятельно не так уж просто.

Поэтому, следуя элементарной логике, поставим вопрос иначе: может быть следует вообще изгнать этот метод из инженерной практики и литературы? Однако на этот вопрос надлежит ответить самым категорическим «нет».

Если отбросить ничего не доказывающие сравнения, касающиеся «корабля», «балласта», «мореходных качеств», «астрологических гороскопов», «диссертационного потока» и т. п., то какие же научные соображения или доводы выдвигает В. Ю. Ломоносов?

Первый довод сводится к тому, что любую задачу, решаемую операторным методом, можно решить методом классическим. Это верно, но важно, каким методом решение находится эффективнее. Можно привести аналогичный пример из области расчета цепей с синусоидальными токами при установившемся режиме. Каждую схему, которую обычно рассчитывают символическим методом (т. е. с помощью комплексных чисел), можно рассчитать более элементарными средствами, составляя уравнения для мгновенных значений с тригонометрическими коэффициентами. Однако второй метод никто не применяет, а применяют метод символический, так как он дает возможность более эффективно и быстро решать задачи. Кстати, заметим, что символический метод есть предельный случай операторного метода, если перейти к установившимся синусоидальным токам, а второй метод, оперирующий мгновенными значениями, получается из «классического» при том же предельном переходе.

Таким образом, даже в частном случае при расчетах установившегося режима символический метод имеет преимущество перед методом, оперирующим мгновенными значениями токов и напряжений. Естественно, что и в более общем случае, при расчетах переходных процессов, метод, аналогичный символическому, т. е. метод операторный, дает еще большую экономию сил и времени.

Это положение подтверждается всей инженерно-расчетной практикой; именно благодаря этой экономии времени метод завоевал себе повсеместное признание и нашел столь широкое применение. Можно было бы привести еще ряд доводов, доказывающих вычислительные преимущества операторного метода в смысле удобства и экономии времени, но мы не приводим их, так как они уже достаточно обстоятельно изложены К. А. Кругом, С. В. Страховым и другими участниками дискуссии.

Второй довод В. Ю. Ломоносова сводится к тому, что в операторном методе широко используются готовые таблицы, на составление которых затрачено много времени и сил, и таким образом, выигрыш во времени лишь кажущийся, так как он с лихвой перекрывается временем, затраченным на составление таблиц.

Может быть отчасти это и так, но это ничего не доказывает; ведь никому не придет в голову отказаться, например, от вычислений с применением логарифмов на том основании, что на составление таблиц логарифмов в свое время было затрачено много труда. Почему же в данном случае следует апеллировать к подобным доказательствам? Замечание В. Ю. Ломоносова о том, что при табулировании, якобы, безразлично, каким из методов пользоваться, также несправедливо. В таблицах операторных соотношений даны отнюдь не «решения уравнений», как утверждает В. Ю. Ломоносов, а определенные операторные выражения и соответствующие им функции времени, каждое из которых само по себе и в комбинации с другими может быть использовано при решении большого числа уравнений. При табулировании же непосредственно решений различных дифференциальных уравнений пришлось бы составлять чрезвычайно большие таблицы, для того чтобы они были эквивалентны таблицам операторных соотношений. Именно поэтому на практике пошли по первому пути.

В-третьих, В. Ю. Ломоносов, обрушиваясь на операторный метод, основным достоинством которого является алгебраизация дифференциальных уравнений, сам, в конечном счете, защищает не что иное, как алгебраизацию дифференциальных уравнений, но проводимую менее принятым и вряд ли более удобным способом.

К. А. Круг в своем выступлении (Электричество, № 1) убедительно показал, что алгебраический метод, пропагандируемый В. Ю. Ломоносовым, является значительно более кропотливым, чем операторный метод, к применению которого, кстати сказать, вовсе не обязательно приступать лишь «после ознакомления с интегральными соотношениями Римана—Меллина, Бромвича и Карсона» и «после того как доказано, что трансформация Лапласа определяет трансформируемую функцию с точностью до множества меры нуль, и дано интегральное представление унитарного оператора», как это утверждает В. Ю. Ломоносов.

Можно добавить еще, что определение величин: $u^I(0)$, $u^{II}(0)$, $u^{IV}(0)$ и т. п., входящих в систему уравнений, фигурирующих в статье В. Ю. Ломоносова под номером 2, дело отнюдь не простое, в то время как в операторном методе эта трудность не встречается, так как исходные операторные уравнения составляются по законам Кирхгофа, в которые входят лишь первые производные, а следовательно, для учета начальных условий можно ограничиться знанием начальных значений самих величин, а не их производных.

В-четвертых, В. Ю. Ломоносов подвергает сомнению наличие особенно больших преимуществ операторного метода при интегрировании линейных уравнений в частных производных. Эти преимущества, безусловно, имеют место. Имея новый вид дифференциального уравнения в частных производных (например, от двух переменных x и t), далеко не всегда можно сразу же заключить, каков будет вид решения, как это предполагает В. Ю. Ломоносов, и в каких функциях оно интегрируется. В большинстве случаев это неизвестно. Вот тут-то и приходит на помощь операторный метод: он дает возможность от уравнений в частных производных (с производными по x и t) перейти к уравнению обыкновенному (с производными по x), решить его при заданных граничных условиях, а затем по форме решения и таблицам операторных соотношений найти, к каким операторным выражениям может быть алгебраически преобразовано это операторное решение, после чего легко совершить переход к функциям времени. Таким образом, операторный метод дает возможность сравнительно легко определить, в каких функциях интегрируется уравнение, и найти само решение. Эти возможности операторного метода, видимо, ускользнули от внимания В. Ю. Ломоносова. Приведем пример, подтверждающий высказанную мысль: при решении одной из задач об индукционном нагреве, без учета охлаждения с поверхности, превышение температуры на некоторой глубине x над температурой окружающего пространства, обозначенное нами $\vartheta(x, t)$, подчиняется дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - k^2 \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = A e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

при следующих начальных и граничных условиях:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } t = 0, \vartheta = 0, \quad \text{при } x = \infty, \vartheta = 0; \\ \text{при } x = 0, \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для лица, не интегрировавшего прежде уравнения подобного вида, далеко не ясно по виду уравнения (1), в каких известных и хорошо табулированных функциях оно интегрируется и каков вид искомого решения. Операторный метод дает ответ на этот вопрос.

Переход к операторной форме приводит уравнение (1) к виду:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} - k^2 p \Theta = A e^{-\alpha x}, \quad (3)$$

где Θ есть изображение ϑ .

Решение уравнения (3) при заданных граничных условиях имеет вид:

$$\Theta(p) = \frac{A}{(k^2 p^2 - \alpha^2) k \sqrt{p}} e^{-k \sqrt{p} x} + \frac{A}{\alpha^2 - k^2 p} e^{-\alpha x}. \quad (4)$$

Для перехода к функциям времени обращаемся к таблице операторных соотношений, ищем операторные выражения, близкие к данным, и находим там следующие операторные выражения:

$$\frac{A}{\alpha^2 - k^2 p}; \quad \frac{e^{-k \sqrt{p} x}}{k \sqrt{p}}; \quad \frac{e^{-k \sqrt{p} x}}{k \sqrt{p} + \alpha}; \quad (5)$$

из которых первое выражается (в смысле операторного соответствия) через элементарные функции, а два вторых — через специальные функции, именуемые функциями Крампа или Гауссовым интегралом ошибок.

Зная операторные соотношения для функций от p , указанных в формулах (5), легко сообразить, как преобразовать операторное решение (4), чтобы оно сводилось к линейной комбинации выражений типа (5). После сложных преобразований операторное решение (4) приводится к виду:

$$\Theta(p) = \frac{A}{2\alpha} \left\{ -2 \frac{e^{-k \sqrt{p} x}}{k \sqrt{p}} + \frac{e^{-k \sqrt{p} x}}{k \sqrt{p} - \alpha} + \frac{e^{-k \sqrt{p} x}}{k \sqrt{p} + \alpha} \right\} + \frac{A}{\alpha^2 - k^2 p} e^{-\alpha x}, \quad (6)$$

от которого легко перейти к $\vartheta(x, t)$, взяв из таблицы оригиналы для функций (5).

Этот пример наглядно иллюстрирует большие возможности операторного метода. При этом следует заметить, что если бы в таблицах приводились вместо операторных соотношений сами дифференциальные уравнения в частных производных и их решения, то вместо нескольких операторных соотношений типа (5) нужно было бы привести большое количество различных дифференциальных уравнений близкого типа. Если в таблице нет точно такого операторного соотношения, какое нам требуется, то приведение к нему осуществляется алгебраическими методами. Если же в таблицах давались бы дифференциальные уравнения и их решения, то приведение уравнения к виду уравнения, данного в таблице, требовало бы применения анализа, т. е. методов более сложных, чем методы алгебры.

Еще более странно звучит довод К. М. Поливанова, приведенный в защиту позиций В. Ю. Ломоносова в дискуссии по рассматриваемой статье: он доказывает несостоятельность операторного метода тем, что некто из известных ему лиц, затративший много времени на изучение операторного метода, не смог решить простой задачи методом классическим или, применяя операторный метод, совершил грубую ошибку, складывая $f(t)$ и $F(p)$. Подобный «довод» по меньшей мере неубедителен.

На основании сказанного можно сделать вывод, что выступление В. Ю. Ломоносова против операторного метода, поддержанное К. М. Поливановым, не имеет под собой достаточных оснований, и критика этого выступления со стороны К. А. Круга, С. В. Страхова и других читателей, безусловно, справедлива.

Заметим также, что в статье С. В. Страхова приводятся еще ряд ценных доводов в пользу операторного метода, на которых мы не останавливаемся лишь потому, что они уже напечатаны в журнале.

Особо надлежит отметить, что в электротехнической литературе имеются две различные трактовки операторного метода. Более старая трактовка, принадлежащая Хейсону, подкупает кажущейся простотой, но базируется на весьма шатких основаниях, и потому в настоящее время отвергнута наукой.

Современная трактовка операторного метода, базирующаяся на взаимно-однозначном преобразовании Карсона—Бромвича, безусловно обоснована математически и завоевала себе общее признание.

Однако нежелание некоторых инженеров-электриков этого поколения освоить современную трактовку, приводит к тому, что на страницах электротехнических книг, журналов наряду с научной, современной трактовкой операторного метода иногда появляется антинаучная Хейсовская трактовка. Это вызывает у специалистов в этой области, справедливое возмущение, тем более подготовленных, — недоумение и недоверие к операторному методу как таковому.

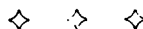
Нам кажется, что своевременно поднять вопрос о необходимости применения в научной литературе этой уста-

редой и ненаучной трактовки операторного метода, и если бы В. Ю. Ломоносов поднял вопрос об изгнании лишь этой устарелой трактовки операторного метода, то он, безусловно, встретил бы полную поддержку со стороны широкой электротехнической общественности.

Можно отметить также, что из взаимно-однозначного преобразования Карсона—Бромвича легко получаются, как частный случай, взаимно-однозначное преобразование Фурье, а следовательно, и двойной интеграл Фурье, которые также имеют широкое применение в электротехнике. Кроме того, операторный метод тесно связан с вычислением контурных интегралов, теорией вычетов и методами теории функций комплексного переменного, также широко применяемой в электротехнике.

Таким образом, операторный метод отнюдь не представляет собой лишь рецептурный, вычислительный алгоритм, а представляет строгий и весьма плодотворный метод, который тесно идейно связан с другими методами, которыми оперирует электротехника.

Отказ от операторного метода представлял бы шаг назад.



10 страницам технических журналов

НОВЫЕ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫЕ АППАРАТЫ И МЕХАНИЗМЫ

Механизация работ в различных отраслях народного хозяйства СССР принимает все более и более широкие размеры. Промышленность, идя навстречу этим стремлениям, изготавливает многочисленные электрифицированные аппараты и механизмы. Технические журналы знакомят широкую общественность с новинками в этой области. Электрометаллизационный аппарат повышенной производительности ЭМ-4 предназначен для восстановления изношенных деталей и металлизации больших поверхностей. Принцип работы аппарата заключается в распылении проволоки электрической дугой и распылении жидкого металла струей сжатого воздуха. Исследования показали, что металлизацию выгоднее производить, применяя постоянный ток, при котором: 1) производительность работы при равных условиях в 3...5 раз выше, чем при использовании переменного тока; 2) повышается стабильность горения дуги; 3) значительно улучшаются условия эксплуатации и 4) покрытия получают с уменьшенным содержанием окислов.

Производительность нового аппарата при работе на стали в 4 раза и на стали в 3...6 раз больше, чем ранее имевшихся электрометаллизаторов, благодаря наличию усиленного механизма подачи проволоки и примененной распылительной головки с концентрическим душем.

Для снабжения электрической энергией аппарата используются сварочные генераторы СУГ-26 или другие подобные машины. Для создания требуемого режима питания применяется балластный реостат типа РНС-200 завода «Трип» или аналогичный другой тип реостата на номинальный ток 150...200 а.

Режим работы аппарата: напряжение холостого хода 55 в, ток короткого замыкания 150...200 а, рабочее напряжение 25...30 в, рабочий ток 100...150 а, скорость подачи проволоки 3,0...4,5 м/мин.

Производительность аппарата (по расплавленному металлу) при работе на стали до 6 кг/час и при работе на чугуне до 12 кг/час. Общий вес аппарата (без проводов и кабелей) 3 кг. Диаметр применяемой проволоки 1...2 мм. Давление сжатого воздуха 5...6 кг/см² и расход воздуха (при 5,5 кг/см²) [Л. 1].

Электрогрелка для обогрева баллонов с жидким азотом, разработанная по предложению автора статьи [Л. 2], устанавливается на фильтровальной станции треста «Водоканализация» в Ростове-на-Дону. Использование этих аппаратов на обычных электрических печей дает годовую экономию более 75 тыс. кВтч электрической энергии. Расход электроэнергии уменьшился в 20 раз. Создалась возможность обогрева одного баллона без повышения температуры в холодном помещении. Улучшилась техника безопасности

В статье дается описание конструкции электрогрелки. Она может быть изготовлена в мастерских предприятий. В зависимости от условий производства аппарат выполняется для напряжений 127, 24 или 12 в. Потребляемая мощность 200 вт при напряжении 127 в. Вес электрогрелки 4,5 кг.

Электрокраскопульт 0-17 служит на производстве малярных работ при строительстве для окраски водными составами потолков и грунтовок. Эти работы являются очень трудоемкими, поэтому советские изобретатели вопросам их механизации занимались еще с 1926 г. Однако различные выпускаемые конструкции давали неудачные результаты при эксплуатации.

Аппарат снабжен центробежным насосом с диаметром рабочего колеса 100 мм; скорость вращения рабочего колеса 5 800 об/мин. Для привода насоса использован асинхронный трехфазный электродвигатель мощностью 1 кВт Ярославского завода «Красный маяк», дающий 2 700 об/мин при напряжении 220 в. Сопряжение электродвигателя и насоса осуществляется при помощи специального редуктора.

Максимальная производительность аппарата 8 л/мин; максимальное рабочее давление 4 кг/см². Благодаря наличию девятиметрового шланга можно с одной стоянки электрокраскопульта окрасить до 150 м² потолков. Вес электрокраскопульта 27,6 кг.

Эксплуатация аппарата показала надежность и удобство работы, а также значительное увеличение производительности труда [Л. 3].

Ленточные транспортеры освоены заводами Министерства строительного и дорожного машиностроения, разработаны институтом ВНИИСтройдормаш. Они получили распространение в строительстве для переброски различных штучных предметов и сыпучих материалов.

Новые транспортеры в 2...2,5 раза легче ранее изготовлявшихся, имеют большую подвижность, а также обладают рядом других эксплуатационных преимуществ (меньший износ ленты, меньший расход электроэнергии, лучшие условия работы зубчатых передач привода, помещенных в масляную ванну, и т. д.). Основные технические данные новых транспортеров [Л. 4] показаны в таблице.

Тип транспортера	T-125	T-80	T-126
Ширина ленты, мм	400	400	400
Длина транспортера, м	5	10	15
Скорость ленты, м/мин	0,8	0,8	1,0
Производительность, м ³ /час	27	27	30
Мощность электродвигателя, кВт	1,0	1,5	1,7
Полный вес, кг	220	352	650

Монорельсовая грейферная тележка типа ТМГ-201 предназначена для транспортирования угля, песка, известняка, кокса и других сыпучих и кусковых материалов с насыпным весом до $1,6 \text{ т/м}^3$. Механизм разработан Всесоюзным научно-исследовательским институтом подъемно-транспортного машиностроения и построен на заводе подъемно-транспортного машиностроения им. Ленина.

Основные части установки: сварная рама с кабиной; две электротали: одна для подъема и опускания грейфера, а другая — для его закрывания и открывания; механизм передвижения и двухчелюстной грейфер конструкции ВНИИПТМаш. Электротали снабжены электродвигателями типа МТК-21-6 мощностью по 5 кВт при 905 об/мин , а механизм передвижения приводится в действие двумя электродвигателями типа ТНГ-61 мощностью по $2,2 \text{ кВт}$ при 1400 об/мин . Пусковая аппаратура находится в кабине управления. Средний режим работы ПВ-25% с 30 включениями в час.

Питание электрической энергией производится при напряжении $380/220 \text{ в}$ через троллей, расположенные вдоль монорельсового пути. Установлены автоматические конечные выключатели подъема грейфера и передвижения. Грузоподъемность тележки 2000 кг , высота подъема грейфера 20 м , скорость подъема 16 м/мин и емкость грейфера $0,75 \text{ м}^3$.

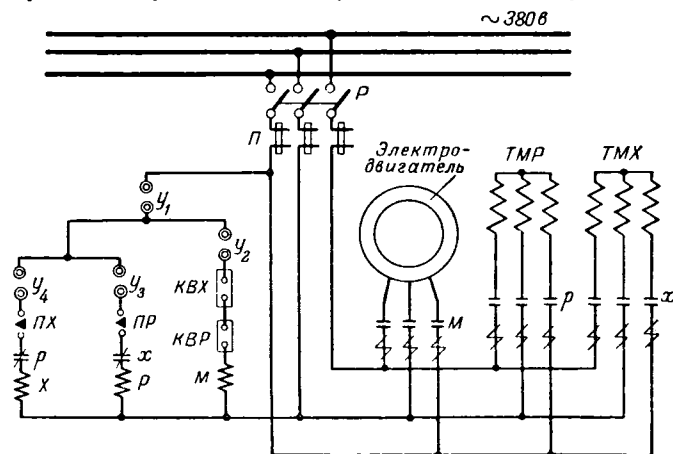
Литература

1. ВНИИАвтоген. Электрометаллизационный аппарат повышенной производительности ЭМ4. Механизация строительства, № 2, 1952.
2. Л. Савин. Электрогрелка для обогрева баллонов с жидким хлором. Жилищно-коммунальное хозяйство, № 1, 1952.
3. М. А. Гусakov. Электрокраскопульт О-17. Механизация строительства, № 1, 1952.
4. А. И. Ратнер. Облегченные ленточные транспортеры. Вестник машиностроения, № 1, 1952.
5. Г. И. Чайка. Монорельсовая грейферная тележка типа ТМГ-201. Механизация трудоемких и тяжелых работ, № 1, 1952.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ ЭЛЕКТРОЛЕБЕДОК

Двухбарабанные электролебедки используются для привода ползунковых скреперов при транспортировке кусковых и сыпучих материалов на расстояние до $150 \dots 200 \text{ м}$. Установки находят широкое применение при разнообразных земляных работах. Недостаток производства работ при помощи электролебедок на крупных заводских складах или строительстве состоит в том, что для обслуживания каждой установки требуется один рабочий в смену или три человека в сутки.

Автор разработал схему и способ автоматизации скреперных электролебедок без существенных их переделок,



Электрическая схема автоматизированной скреперной лебедки.

М—магнитный пускатель; ТМР, ТМХ—тормозной магнит; Р, X—магнитный пускатель; ПР, ПХ, КВР, КВХ—малогабаритный конечный выключатель; У—универсальный переключатель; П—предохранитель трубчатый; Р—рубильник трехполюсный.

дающий возможность одному рабочему обслуживать несколько установок. Электрическая схема автоматизированной скреперной лебедки указана на рисунке. В ней подробно описана механическая часть предлагаемой механизации.

Для контроля ночных работ можно устанавливать параллельно пускателям p и x зеленую и белую лампы, рошо видимые издали. Поочередное их включение свидетельствует о работе установки. Загорание красной лампы соответствует автоматической остановке лебедки.

Опытная автоматизированная скреперная электролебедка дала при эксплуатации удовлетворительные результаты.

(Механизация строительства, № 1, 1952, М. И. Коробко)

ЗА РУБЕЖОМ

НОВАЯ УСТАНОВКА ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Бонневильский энергетическим управлением (США) подстанции Чегалис включена в эксплуатацию установка продольной емкостной компенсации мощностью 15000 кВА . Назначение этой установки — увеличение пропускной способности линии передачи 220 кВ .

Установка состоит из шести однофазных батарей емкостных конденсаторов со следующими данными: емкость батареи 2500 кВА , напряжение батареи 7960 в , номинальный ток батареи 312 а , реактивное сопротивление $25,4 \text{ ом}$, мощность единичного конденсатора 15 кВА .

Две батареи образуют фазу конденсаторной установки и могут работать в различных комбинациях: одна батарея $X_c = 25,4 \text{ ом}$, ток 312 а ; две батареи последовательно $X_c = 50,8 \text{ ом}$, ток 312 а ; две батареи параллельно $X_c = 12,7 \text{ ом}$, ток 624 а .

Установка допускает расширение до номинального: 500 а при мощности 23000 кВА . Каждая батарея емкостных конденсаторов смонтирована в металлических шкафах, установленных на металлических же платформах, опирающихся на стандартные опорные изоляторы, изолирующие ее от потенциала земли. Установка снабжена разрядником, шунтирующим ее, и разъединителями, позволяющими вывести ее в ремонт и заземлить.

Батареи конденсаторов продольной емкостной компенсации должны быть защищены от перенапряжений, возникающих на конденсаторах при протекании через них сверхтоков, поскольку эти перенапряжения могут достигать весьма высоких значений. Поэтому в схемах батарей продольной компенсации предусматриваются защитные устройства в виде разрядников, включенных параллельно батареям и шунтирующих ее при повышении напряжения. Для снижения установившегося напряжения пробоя защитного разрядника выбрано равным 250% от номинального напряжения батареи. Защитный разрядник рассчитан на кратковременное действие, поэтому разрядник и батарея дополнены шунтирующим автоматическим выключаемым разъединителем или выключателем, который выводит из действия всю установку. Обратный ввод батареи продольной емкостной компенсации в работу требует действия эксплуатационного персонала. Такая система защиты называется глухой. Она может быть усовершенствована путем автоматического отключения по истечении некоторой выдержки времени после окончания сквозного короткого замыкания шунтирующего выключателя, что вводит вновь батарею конденсаторов в работу. Однако в случае применения продольной емкостной компенсации как меры повышения устойчивости параллельной работы электростанций длительное выключение компенсации недопустимо, и защитное оборудование батареи должно быть не только самовосстанавливающимся, но и должно также обеспечивать быстрое действие автоматического повторного включения компенсации установки после устранения сквозного короткого замыкания.

На описываемой установке применена усовершенствованная защитная система, которая состоит из разрядника с графитовыми электродами, сквозь разрядный промежуток которого пропускается сильная струя сжатого воздуха, которая гасит дугу каждые полпериода. Следовательно, разрядником включено активное сопротивление, которое

¹ Более подробных данных об этой линии, где выполнена продольная компенсация, в оригинале не приводится.

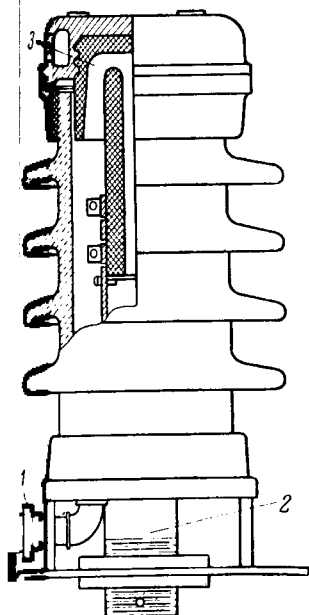
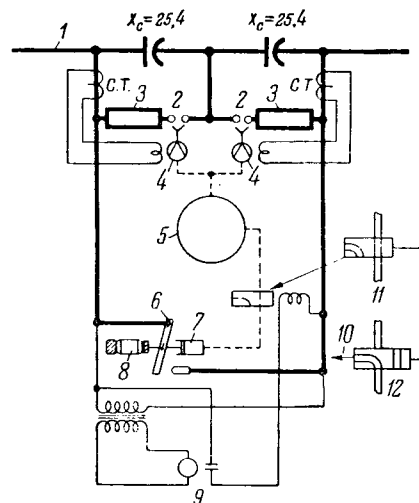


Рис. 1. Эскиз разрядника для защиты конденсаторов установок продольной емкостной компенсации.

1 — впуск сжатого воздуха; 2 — выпуск; 3 — искровой промежуток.

Рис. 2. Схема соединений защитного оборудования одной фазы установки продольной емкостной компенсации.

1 — линия электропередачи; 2 — разрядник; 3 — активное сопротивление; 4 — клапан сжатого воздуха; 5 — бак сжатого воздуха; 6 — шунтирующий замыкатель; 7 — пневматический привод; 8 — пружинный привод; 9 — реле максимального напряжения; 10 — выпуск; 11 — положение (1); 12 — положение (2).



раничивает ток в цепи разрядника до величины, безопасной для конденсаторов.

Один из графитовых электродов имеет форму перевернутой чашки, второй же представляет собою стержень с пугренным центральным отверстием для выхода газов. Во время работы разрядника сжатый воздух впускается в фарфоровый корпус разрядника, проходит сквозь дугу и по каналу в центральном электроде выпускается наружу атмосфере (рис. 1).

Схема соединений защитного оборудования одной фазы обслуживаемой установки приведена на рис. 2.

Воздушный клапан с электрическим управлением (жиз) впускает сжатый воздух в разрядник через $2\frac{1}{2}$ дюйма после пробоя искрового промежутка. Пропуск воздуха в разрядник продолжается еще в течение 7 ... 10 секунд после прекращения образования дуги в искровом промежутке, что необходимо для охлаждения электродов и удаления газов после погашения дуги. Автоматический шунтирующий замыкатель включается при ненормальных условиях: пружинным приводом и удерживается в разомкнутом положении пневматическим приводом. Нормально этот замыкатель разомкнут и включается при помощи электрического реле, если на конденсаторах возникает перенапряжение, вызванное чрезмерным током нагрузки или изменением активного сопротивления батареи вследствие выхода из строя части конденсаторов, или же при помощи пневматического реле при уменьшении давления в резервуаре сжатого воздуха.

Сжатый воздух подводится от компрессорной установки к баку сжатого воздуха каждой батареи, установленной на изолирующей платформе, через фарфоровые изоляционные колонки; через эти же колонки проходят еще и трубопровода сжатого воздуха — один для сигнализации положения шунтирующего замыкателя и второй для впуска сжатого воздуха при размыкании шунтирующего замыкателя.

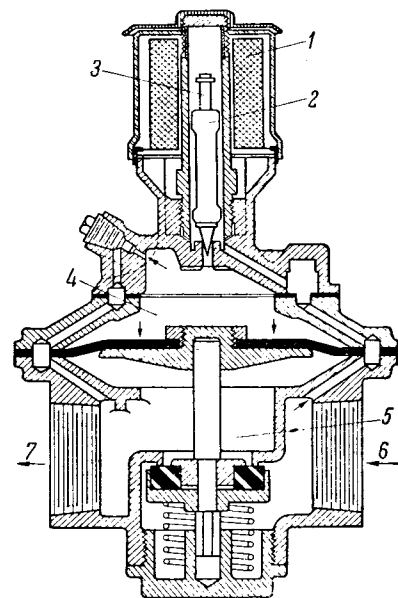
Автор реферируемой статьи приходит к выводу, что применение разрядника с воздушным дутьем и его самоотключение при прекращении перенапряжения на конденсаторах дают возможность использовать его в качестве синхронного выключателя, включенного последовательно с большим сопротивлением для обеспечения сохранения пропускной способности передачи по условиям динамической устойчивости параллельной работы.

Утверждение статьи о том, что применение глухой защиты конденсаторных батарей не позволяет использовать полную емкостную компенсацию в качестве меры повышения пропускной способности линий высокого напря-

жения, неверно. Достаточно указать на шведскую установку 220 кВ в Альфа, оборудованную глухой защитой. Необходимо лишь так построить установку, выбрав ее параметры и месторасположение, чтобы ее защитный разрядник не был перекрыт при сквозных коротких замыканиях.

Конструкция защитных устройств, описываемая в излагаемой статье, представляет несомненный интерес, однако возможности и условия ее применения должны быть изучены и проверены в каждом отдельном случае. На это указывает и автор реферируемой статьи.

Рис. 3. Электрически управляемый клапан сжатого воздуха.



1 — соленоид; 2 — якорь соленоида; 3 — вспомогательный воздушный клапан; 4 — камера с неопределенной диафрагмой (давление 10 ат); 5 — главный воздушный клапан; 6 — впуск сжатого воздуха из резервуара; 7 — искровой промежуток.

Необходимо весьма тщательно исследовать предлагаемый метод защиты конденсаторных установок, поскольку данные, излагаемые в статье, совершенно недостаточны для всесторонней оценки этого метода, в особенности для батарей большой мощности, тем более, что в реферируемой статье описывается относительно небольшая установка продольной компенсации линии 230 кВ.

Следует также указать, что предлагаемый метод защиты конденсаторных установок значительно сложнее, чем метод глухой защиты.

Литература

1. Westinghouse Engineer, стр. 138, № 5, 1951. Marbury.
2. Электричество, № 3, 1951, стр. 79. Продольная емкостная компенсация линий электропередачи.

Инж. С. С. РОКОТЯН

Цимлянская гэс дала промышленный ток

6 июня 1952 г. введена в эксплуатацию Цимлянская гидроэлектростанция; её первый генератор включен на параллельную работу с системой Ростовэнерго.



Учреждение Польской академии наук

На первом съезде польских ученых, состоявшемся в истекшем году, было вынесено решение о создании Польской академии наук.

В апреле 1952 г. Оргкомиссия, избранная названным съездом, представила совету министров Польской Народной Республики проект учреждения академии наук. Проект утвержден президентом Польской Народной Республики Б. Берутом.

В составе Польской академии наук предусмотрены отделения: общественных наук, биологических наук, физико-математических, химических и геолого-географических наук и отделение технических наук.

Помимо действительных членов Академии наук и членов-корреспондентов предусмотрены еще две категории чле-

нов академии наук — титулярные члены и почетные члены академии.

Президентом Польской академии наук утвержден профессор Ян Дембовский, ученым секретарем академии Станислав Мазур.

На первом пленарном заседании Президиума Академии наук, 24 мая 1952 г., было принято обращение к Председателю Совета Министров СССР Генералиссимому И. В. Сталину, в котором содержатся слова горячей благодарности за братский подарок Советского Народа, в связи с заключением польско-советского Соглашения о сотрудничестве в Варшаве высотного здания Дворца Культуры и Наук.



Научно-техническое совещание в Ленинграде по повышению коэффициента мощности

В марте 1952 г. ВНИТОЭ совместно с Госинспекцией по промышленности и энергонадзору МЭС СССР провели в Ленинграде научно-техническое совещание, целью которого был широкий обмен опытом по рациональному проектированию, монтажу и эксплуатации компенсирующих устройств.

В совещании приняли участие около 800 делегатов промышленных предприятий, научно-исследовательских и учебных институтов, проектных организаций и министерств. В качестве гостей присутствовало более 150 ленинградских энергетиков.

Во вступительном докладе «О состоянии работы по повышению коэффициента мощности в промышленности» главный инженер Госэнергонадзора П. С. Иванов отметил, что в результате усилий советских энергетиков коэффициент мощности достиг величины 0,901 в 1951 г. против 0,875 в 1940 г. и 0,811 во время войны. Докладчик указал на недопустимо низкий коэффициент мощности в ряде районов и на недостаточную работу по повышению коэффициента мощности, проводимую некоторыми министерствами. Повышение коэффициента мощности в промышленности идет, в основном, за счет установки компенсирующих устройств, но одновременно повышение коэффициента мощности должно производиться за счет повседневной внутризаводской рационализации, имеющей огромные резервы. Именно этот путь повышения должен быть основным. Повышение коэффициента мощности до величины 0,85 может осуществляться всеми средствами компенсации, но преимущественно статическими конденсаторами и синхронными электродвигателями. Крупные недостатки имеются в существующей шкале скидок и надбавок за косинус фи. Министерство электростанций подготовило проект новой шкалы. Ее основные положения: нейтральная величина косинуса фи равна 0,85; шкала единая для всех средств компенсации, однако за повышение косинуса фи сверх 0,85 посредством синхронных компенсаторов и синхронизированных асинхронных двигателей скидка выплачивается не по шкале, а лишь в размере 0,5% за каждую сотую повышения косинуса фи; Министерство электростанций имеет право устанавливать пониженную исходную величину косинуса фи отдельным предприятиям в пределах 0,84...0,75 и т. д.

Весьма подробно на совещании был рассмотрен вопрос о статических конденсаторах. Директор конденсаторного завода М. М. Морозов в докладе «Статические

конденсаторы для повышения коэффициента мощности: проектирование, производство, требования к эксплуатации, новые типы» подробно остановился на проблемах конденсаторостроения для установок сильного тока.

Значительный интерес вызвал доклад инж. Б. А. Покова «Вопросы проектирования, монтажа, эксплуатации и ремонта конденсаторов для повышения коэффициента мощности».

Вопросам повышения коэффициента мощности в сетях Ленэнерго, Мосэнерго и в министерствах угольной и легкой промышленности был посвящен ряд докладов.

Инж. Б. А. Константинов (Энергосбыт Ленэнерго) в докладе «Коэффициент мощности в электроустановках промышленности и мероприятия по его повышению» указал, что уменьшение потребления реактивной энергии шло за счет снятия избыточной мощности незагруженных асинхронных электродвигателей, переключения обмоток слабогруженных асинхронных электродвигателей с треугольника на звезду, секционирования обмоток асинхронных электродвигателей, применения ограничителей холостого хода станках и у сварочных аппаратов. В отдельных случаях установлены синхронные электродвигатели. На ряде предприятий установлены статические конденсаторы. Опыт эксплуатации показал, что, как правило, замена незагруженных асинхронных электродвигателей является эффективной лишь при нагрузке их не выше 50%, а переключение обмотки статора с треугольника на звезду — при нагрузке выше 35%. Необходимо выпускаемые заводами станки и сварочные аппараты и т. д. снабжать автоматическими устройствами для ограничения холостого хода. Значительный эффект даст повышение числа часов использования присоединенной мощности трансформаторов и числа часов использования максимума нагрузки предприятий. Следует расширить применение статических конденсаторов, уславливаемых непосредственно у токоприемников.

Инж. А. П. Чекалин (Энергосбыт Мосэнерго) в докладе «Опыт работы по повышению коэффициента мощности у потребителей системы Мосэнерго» показал целесообразность внедрения статических конденсаторов, но отметил непригодность конструкции выпускаемых конденсаторов для непосредственного присоединения к токоприемникам и нез

пальный рост количества синхронных компенсаторов и синхронизированных двигателей.

Инж. В. Н. Антонов (Министерство легкой промышленности) в докладе «Повышение естественного искусственного коэффициента мощности на предприятиях легкой промышленности», утверждая, что в легкой промышленности не требуется крупных двигателей с фазным ротором, высказался против применения в легкой промышленности синхронизации асинхронных двигателей как метода повышения коэффициента мощности.

Инж. Д. А. Тарасов (Министерство нефтяной промышленности) в докладе «Повышение коэффициента мощности в электрохозяйстве предприятий Министерства нефтяной промышленности» указал, что улучшение коэффициента мощности достигается: выполнением мероприятий, не требующих капитальных затрат (перегруппировкой трансформаторов и двигателей, внедрением двигателей с повышенной скоростью и пусковым моментом, переводом маломощных скважин на периодическую эксплуатацию и т. д.), и установкой статических конденсаторов, синхронных двигателей на приделах грязевых насосов и синхронизацией асинхронных двигателей по схеме ДАГ.

В докладах представителей Министерства угольной промышленности СССР В. А. Сумченко и В. К. Ефремова изложены особенности электропривода шахтных механизмов, требующих повышения пусковых моментов и не обеспечивающих полной загрузки двигателей в процессе работы. Вследствие этого обращено особое внимание на применение искусственных средств компенсации: статических конденсаторов, синхронных двигателей и синхронных компенсаторов и синхронизацию асинхронных двигателей. Полученный технико-экономический эффект в части компенсации реактивной энергии и малых затрат активной мощности подтверждает целесообразность дальнейшего распространения синхронизации. Министерство электропривода должно отказаться от позиции ограничения синхронизации. Министерство электропривода должно организовать массовый выпуск синхронизационных агрегатов на своих заводах.

В докладе главного энергетика комбината «Сталинск» МУП СССР К. И. Скоркина «Синхронизация синхронных электродвигателей по схеме ДАГ и итоги ее применения в комбинате Сталинск» и на предприятиях угольной промышленности» указывалось, что малая перегрузочная способность синхронизированных двигателей, трудность подбора возбудителей решаются схемой ДАГ, обеспечивающей автоматический переход из асинхронного режима в синхронный и обратно и сохраняющей у синхронизированного двигателя нормальную величину асинхронного момента, что обеспечивает устойчивость синхронизированного двигателя. В среднем затраты на компенсацию 1 кввар по опыту работы более 100 мощных синхронизированных двигателей составляют от 0,5 до 1,5 квт,ходя наиболее неблагоприятных случаях до 2...3 квт. По затратам активной мощности на компенсацию реактивной энергии синхронизация стоит в одном ряду со статическими конденсаторами и синхронными двигателями. Нагрев двигателя в синхронном режиме не увеличивается за счет повышения тока статора и улучшения вентиляции двигателя. Повышение скорости на 1...4% увеличивает производительность приводимых механизмов на 2,5...10%. Капитальные затраты на синхронизацию асинхронных двигателей находятся в пределах 45—65 руб. на 1 кввар (т. е. меньше, чем для любого другого способа компенсации реактивной энергии). В дальнейшем наряду с синхронизацией двигателей с установившимся режимом работы будут синхронизироваться двигатели подъемных машин, имеющих резервный режим работы. Целесообразным также является изготовление специальных синхронизированных (синхронных) электродвигателей. В заключение докладчик сказал, что синхронизация асинхронных двигателей стала значительным фактором в деле повышения коэффициента мощности на угольных шахтах и является вполне целесообразным широкое применение синхронизации двигателей наравне с синхронными двигателями и статическими конденсаторами для повышения косинуса фи во всех отраслях промышленности.

С докладом «Итоги работы в области синхронизации асинхронных двигателей» выступил главный энергетик объединения Грознефть инж. О. П. Шишкин, указавший, что за счет синхронизации мощных асинхронных двигателей по схеме ДАГ в объединении Грознефть сэкономлено 10 млн. квтч. Трехлетний опыт эксплуатации синхронизированных двигателей показал надежность работы как самих электродвигателей, так и синхронизационных устройств. Случаев повреждения ротора двигателей не наблюдалось. Схема ДАГ работает четко. В нефтяных объединениях синхронизация прочно вошла в практику нефтепромышленного хозяйства, а выработка реактивной энергии синхронизированными двигателями играет существенную роль в балансе реактивной мощности энергоснабжающих систем. Удельные затраты активной мощности на синхронизацию несоизмеримо меньше экономических эквивалентов, характерных для протяженных электрических сетей на нефтяных промыслах. В связи с этим наряду с экономией реактивной энергии сэкономлено большое количество активной электроэнергии на сокращении потерь в электрических сетях. Выросла производительность механизмов, что особенно важно для процесса пуско-подъемных работ при бурении нефтяных скважин. Задачи, поставленные перед промышленными предприятиями в области улучшения коэффициента мощности, могут быть решены в короткий срок только при условии мобилизации всех доступных средств компенсации. При этом синхронизации по схеме ДАГ ввиду ее большой эффективности, относительной простоты и возможности быстрого освоения заводами необходимого оборудования должно быть уделено особое внимание.

Кандидат техн. наук Б. И. Розенберг (ЛПИ им. Калинина) в докладе «Выбор типа, местоположения и мощности компенсирующих устройств в системе» изложил соображения о целесообразности комплексного решения этих вопросов применительно к конкретным условиям данного предприятия. Основываясь на том, что снижение потерь в распределительных сетях в основном определяется уменьшением реактивных токов, докладчик предложил формулу для определения суммарной мощности компенсирующих устройств.

Представитель ОРГРЭС МЭС инж. В. А. Шевченко в докладе «Определение потерь по экономическим эквивалентам и эффективность компенсации реактивных нагрузок» рекомендовала определять величину уменьшения потерь энергии по «экономическим эквивалентам», которые определяются как величина уменьшения потерь активной мощности в киловаттах при уменьшении реактивной нагрузки потребителей на 1 кввар. Определение экономической целесообразности и рентабельности компенсации реактивной нагрузки докладчик предлагает производить по формуле¹

$$0,065 \cdot 2500 (K_1 - K_K) + (K_1 - K_K) TS > A0,2,$$

где K_1 — экономический эквивалент, квт на кввар, в часы максимума активной нагрузки энергосистем; K_K — затраты активной мощности в компенсирующих устройствах, квт на кввар; S — стоимость топливной составляющей электроэнергии 0,08 руб.; A — затрата на установку компенсирующего устройства, руб. на кввар; 0,2 — коэффициент, учитывающий окупаемость установки в течение 5 лет; T — число часов работы.

В докладе кандидата техн. наук В. В. Андреева (НИИ постоянного тока МЭС СССР) «Продольная компенсация как источник реактивной мощности в энергосистеме» приведены соображения о преимуществе продольной компенсации. Опыт работы установок продольной компенсации подтвердил возможность практического осуществления их в энергосистемах.

В сообщении кандидата техн. наук Г. М. Каялова (Новочеркасский политехнический институт) «О расчете реактивных нагрузок промышленных электрических сетей» вместо косвенного пути опреде-

¹ Рекомендация докладчиком указанной формулы не обоснована, так как формула не полностью учитывает эффект от компенсации реактивной энергии; так, в частности, не учитывается высвобождаемая трансформаторная мощность, бесосновательно принят коэффициент 0,2 в правой части уравнения, тогда как он будет различен для разных типов компенсирующих устройств, и во всяком случае он должен быть соизмерим с годоным коэффициентом в левой части уравнения, принятым равным 0,065 (Б. Г.).

ления реактивных нагрузок электрических сетей через расчетные величины активных нагрузок и ориентировочные значения коэффициента мощности предлагается применить методы их непосредственного определения. В основу расчетов положены номинальная реактивная мощность токоприемников, суточные и годовые графики реактивных нагрузок, исследуемые разработанным докладчиком методом упорядоченных диаграмм. Этот метод, не требующий специальных затрат, позволит быстро и организованно накопить опытные материалы по всем отраслям промышленности.

Кандидат техн. наук **А. С. Либман** (трест Севзап-электромонтаж) в сообщении «Методика решения вопросов снабжения промпредприятий реактивной энергией» отметил, что эксплуатационные задачи выработки и распределения реактивной энергии решаются на основе потерь мощности, но при переменных значениях сечений проводников пользование «экономическими эквивалентами» ведет к ошибочным выводам.

Доклады вызвали широкий обмен мнениями. В прениях выступили 35 делегатов. Наибольший интерес участников совещания вызвали вопросы статических конденсаторов, проект новой шкалы и синхронизации асинхронных двигателей. Большое число делегатов, выступивших в прениях, указывало на низкое качество статических конденсаторов и на необходимость улучшения их конструкции.

Выступления работников конденсаторного завода, пытавшихся «оправдать» недолговечность выпускаемых конденсаторов ссылками на плохое качество масла и бумаги, не удовлетворили совещание и были отвергнуты.

Во многих выступлениях затрагивались вопросы новой шкалы. Дефекты существующей шкалы столь очевидны, что никто не выступал в ее защиту. Но в некоторых выступлениях критиковались отдельные положения проекта новой шкалы. Так, **Г. Ю. Цепелинский** (Министерство угольной промышленности) указал, что в новой шкале за повышение коэффициента мощности сверх нейтральной величины посредством синхронных конденсаторов и синхронизацией асинхронных двигателей предусмотрена скидка не по шкале, а в размере 0,5% за каждую сотую повышения косинуса фи до максимальной величины, предусмотренной энергосистемой, т. е. в скрытом виде проводится деление на искусственный и естественный косинус фи, что является основным пороком старой шкалы. Почти все выступавшие по вопросу шкалы поддержали точку зрения о недопустимости внесения такого пункта в новую шкалу.

Инж. **В. В. Малахов** (Энергосбыт Мосэнерго) выступил целиком против синхронизации, считая ее устаревшим и неэкономичным средством повышения косинуса фи.

Представитель треста «Старогрознефть» **М. М. Лавренко** считает неправильной позицию Госэнергонадзора, ограничивающего применение синхронизации асинхронных двигателей, обеспечившей повышение коэффициента мощности по тресту с 0,73 до 0,77.

Кандидат техн. наук **И. А. Сыроматников** (Техническое управление МЭС), остановившись на применении синхронных электродвигателей, указал, что диапазон мощностей этих двигателей для промышленного электропривода следует расширить, и что должен быть организован выпуск синхронных двигателей от 100 квт. Необходимо организовать выпуск синхронных двигателей Таманцева. Следует широко применять прямой пуск двигателей без автотрансформаторов и реакторов, что даст реальные дополнительные возможности повышения коэффициента мощности. Целесообразно также внедрение форсировки возбуждения у синхронных машин, повышающей устойчивость системы. Следует шире применять асинхронные короткозамкнутые двигатели. Остановившись на схеме ДАГ, **И. А. Сыроматников** отметил, что она сможет применяться на уже установленных в промышленности двигателях с фазным ротором; схема, по его мнению, нуждается в дальнейшем усовершенствовании, в частности было бы полезным осуществление автоматического изменения тока возбуждения. Однако недопустимо умышленно заказывать двигатели с фазным ротором, для того чтобы при установке сразу же синхронизировать их.

Совещание приняло развернутое решение, в котором указывается ряд конкретных мероприятий для дальнейшего повышения коэффициента мощности. Повышение косинуса фи должно осуществляться всеми доступными средствами: путем внутризаводской рационализации и наиболее экономичными способами — статическими конденсаторами, синхронными двигателями и синхронизацией асинхронных двигателей.

Совещание отметило положительные результаты синхронизации асинхронных двигателей по схеме ДАГ в министерствах угольной и нефтяной промышленности и рекомендовало схему ДАГ для широкого применения и в других отраслях промышленности.

Участники совещания послали письмо товарищу Сталину, в котором приняли на себя обязательство приложить все свои силы и знания для поднятия советской энергетики на более высокую ступень.

Б. Г.



Ромбическая номограмма

Номограмма позволяет вычислять ряд функций. Часть функций решается при помощи сведенных шкал (непосредственный отчет). Они перечислены справа на номограмме. Функция синуса дана для трех областей аргумента: угол менее 10°, $B = 100 \sin T^\circ$; угол лежит в пределах 10...65°, $\sin Y$; в пределах 65...90°, $H = \sin J$. Тангенс угла $B = 100 \lg T$ дан до 45°.

Функции, приведенные слева на номограмме, трех-шкальные:

1) $J = P + U$, сложение и вычитание;
2) $B = CD$, умножение и деление;
3) $T = \arctg \lg \frac{C}{10I}$, определение острого угла или катетов прямоугольного треугольника;

4) $X = 10e^{-\frac{N}{2}} \sin Y$, синусоида с затухающей амплитудой;

5) $\frac{Q}{10} = 10 \lg \frac{B}{D}$; 6) $K = I^E$;

7) $K = \left(\frac{D}{10}\right)^{-E}$;

8) $\frac{1}{F} = \frac{1}{P} + \frac{1}{Q}$, сложение проводимостей, емкостей

(формула линзы);

9) $F = \frac{100P}{(P+J)}$, к. п. д.

10) $M = \ln \frac{10C}{B}$, натуральные логарифмы;

11) $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$, полное сопротивление;

12) $A = \pi(Z^2 - X^2)$, сечение полых труб;

13) $S = \frac{X}{Z}$, синус угла сдвига фаз;

14) $Y = \arcsin \frac{X}{Z}$, угол сдвига фаз.

Примеры: 1. Дано: $R = 3$, $X = 4$; находим полное сопротивление $Z = 5$.

2. Дано: $C = 5,1$, $I = 1,4$; находим: $T = \arctg \lg \frac{C}{10I} = 20^\circ$.

