

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

7
1965
июль

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА
ПО КООРДИНАЦИИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ СССР И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Редакции журнала „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Отделение физико-технических проблем энергетики Академии наук СССР поздравляет научно-инженерную общественность, читателей, авторов, редколлегию и сотрудников с 85-летием старейшего отечественного журнала «Электричество».

Со времени выхода в свет первого номера и до наших дней журнал «Электричество» является проводником важнейших проблем в области электротехники и играет огромную роль в деле становления и воспитания отечественной школы электротехников.

Журнал «Электричество» заслуженно занимает одно из ведущих мест в семье научных журналов мира.

Отделение физико-технических проблем энергетики Академии наук СССР желает журналу «Электричество» дальнейшего процветания и новых неустанных поисков в деле развития советской электротехнической науки.

*Бюро Отделения физико-технических
проблем энергетики АН СССР*

☆ ☆ ☆

Редакции журнала „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Государственный комитет по координации научно-исследовательских работ СССР поздравляет редакцию старейшего в нашей стране электротехнического журнала «Электричество» и широкий актив его авторов и читателей в связи с 85-летием со дня основания журнала.

За годы своего существования и особенно после Великой Октябрьской социалистической революции журнал добился значительных успехов в пропаганде электротехнических знаний и заслуженно пользуется большой популярностью среди широких кругов научной и инженерно-технической общественности.

Журналу принадлежат большие заслуги в воспитании высококвалифицированных кадров советских электротехников и в обеспечении технического прогресса в области энергетики и электрификации Советского Союза, составляющих основу создания материально-технической базы коммунизма.

Важнейшими и почетными задачами журнала «Электричество» являются широкая пропаганда научных и технических достижений в области электротехники, борьба за внедрение этих достижений в народное хозяйство и мобилизация творческой активности советских электротехников.

Государственный комитет по координации научно-исследовательских работ СССР выражает уверенность, что журнал «Электричество» и в дальнейшем будет успешно выполнять возложенные на него задачи.

*Государственный комитет по координации
научно-исследовательских работ СССР*

Редакции журнала „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

В этом году исполняется 85 лет существования журнала «Электричество». Он является в течение почти века проводником передовых научных достижений в энергетике, отражая гигантское развитие науки и техники в этой области. Он всегда был выразителем мнений и идей передовой энергетической общественности, объединенной в настоящее время в Научно-техническом обществе энергетической промышленности, которое является одним из его создателей.

От имени более чем стодвадцатитысячного коллектива членов Общества Президиум Центрального правления общества поздравляет журнал «Электричество» и всех его читателей со знаменательной датой его 85-летия.

Журнал «Электричество» является одним из наиболее выдающихся энергетических журналов, заслуженно пользующихся мировой известностью. На страницах его помещаются научные и технические материалы, помогающие разрешению важнейших задач, поставленных XXII съездом КПСС, — задачи огромного роста нашей энергетики, задачи электрификации всей страны и развития на ее базе всех отраслей народного хозяйства.

Мы желаем журналу и в дальнейшем обогащать советскую науку, советскую энергетику новыми важными идеями и решениями крупных энергетических проблем, а его редакционной коллегии во главе с главным редактором Н. Г. Дроздовым — дальнейших успехов в осуществлении этих благородных задач.

Президиум ЦЕНТОЭП

☆ ☆ ☆

Редакции журнала „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Государственный Комитет по электротехнике при Госплане СССР поздравляет редколлегию, сотрудников и читателей журнала «Электричество» со славным юбилеем — 85-летием со дня выхода в свет первого номера журнала.

В течение многих лет своего издания журнал «Электричество» освещает борьбу за технический прогресс нашей Родины, достижения и передовой опыт отечественных и зарубежных электротехников.

В дни юбилея желаем старейшему журналу и впредь вносить свой вклад в дело распространения среди широкого круга читателей глубоких научных знаний, что послужит дальнейшему развитию электротехнической промышленности нашей страны.

Государственный Комитет
по электротехнике при Госплане СССР

☆ ☆ ☆

Редакции журнала „Электричество“

От имени Министерства высшего и среднего специального образования СССР горячо поздравляю редколлегию, сотрудников и читателей журнала «Электричество» с 85-летием со дня основания журнала.

За годы своего существования журнал оказывал большую помощь в подготовке специалистов и молодых ученых во всех областях электротехники.

Министерство выражает уверенность, что коллектив журнала «Электричество» будет умножать вклад в дело пропаганды новейших успехов в этом благородном деле.

Заместитель министра высшего и среднего
специального образования **П. И. ПОЛУХИН**

Журналу „Электричество“ 85 лет

1 июля 1880 г. вышел из печати первый номер журнала «Электричество».

Созданный по инициативе членов VI (электротехнического) отдела Русского технического общества журнал «Электричество» ставит своей целью: «разработку различных вопросов, относящихся до электротехники, и распространение среди читающей публики необходимых и крайне интересных в настоящее время сведений как по теории электричества, так и по применению его в науке и общепитии».

Издание в технически отсталой России 80-х годов специального электротехнического журнала было весьма трудным и даже рискованным делом. В то время в самых развитых в техническом отношении странах подобного рода журналов или вовсе не было или они только что возникали.

Можно было опасаться, что у нового журнала не найдется авторов и читателей, но основатели «Электричества», пионеры русской электротехники — П. Н. Яблочков, В. Н. Чиколев, Д. А. Лачинов, В. А. Воскресенский и первый председатель VI отдела Ф. К. Величко были горячо и искренне убеждены в обратном; время доказало их правоту.

Говорить об истории журнала — значит говорить об истории развития электротехники, написанной на его страницах.

На пожелтевших от времени страницах первых номеров журнала 1880 г., хранящихся до сего времени в редакции, можно видеть описание магнито-электрических машин, в 1881 г. — описание динамо-машин, а в 1889 г. основное внимание уделяется магнитному потоку электрических машин.

В 1882 г. в журнале начинает развиваться идея, связанная с центральными станциями, сначала постоянного тока, а в 1890 г. описываются «центральные переменного тока», исследования альтернаторов и трансформаторов.

С 1881 г. статьей проф. А. Г. Столетова вводится единая электромагнитная практическая система единиц, где вместо «сименса» вводится «ом» и в 1891 г. — «джоуль», «ватт», «генри» и т. д.

Маленькие заметки о продолжительности индукционных токов (1882 г.) развиваются в обширные статьи по электрическим колебаниям и опытам Герца.

В июле 1896 г. со статьей, описывающей принцип телеграфии без проводов, выступает изобретатель радио А. С. Попов.

В 1892 г. редактором журнала становится А. И. Смирнов. Оставаясь на этом посту до

1906 г., он сумел привлечь к сотрудничеству в журнале молодых ученых. В это время деятельное участие в работе журнала принимают А. Л. Гершун, Н. Г. Егоров, В. К. Лебединский, В. А. Тюрин, Н. Г. Шведер, А. А. Воронов, Б. П. Вейнберг, М. А. Шателен, С. Я. Терешин, Б. Л. Розинг, Д. А. Рожанский, А. А. Петровский, А. С. Попов, В. Н. Чиколев, Р. Э. Классон, О. Д. Хвольсон и другие видные русские ученые.

Этот период характеризуется началом развития в России строительства электрических станций и электроснабжения, начинает развиваться электропромышленность.

В 1906 г. организуется особый редакционный комитет, который сочувственно относится к революционной борьбе русских рабочих с самодержавием.

В первой же редакционной статье Комитет пишет: «Редакция считает одной из своих основных задач дать возможно более полное освещение вопроса о положении работников электротехнической промышленности ...». В журнале начинают появляться сообщения о забастовках и стачках работников электрического транспорта и промышленности.

В период 1906—1917 гг. большое место в журнале занимают статьи об электрических станциях и линиях электропередач, о работе трамваев в различных городах России, постоянно печатаются подробные сообщения о заседаниях VI отдела Русского технического общества, органом которого все это время был журнал.

Необходимо отметить большую роль В. К. Лебединского в развитии журнала, особенно в период 1910—1917 гг. Почти каждый номер журнала в то время открывался передовой статьей В. К. Лебединского, в которой давался научный обзор той или иной области электротехники и физики.

В 1918 г. журнал «Электричество» из-за трудностей военного времени временно прекратил свое существование и возобновил свою деятельность только в 1922 г., уже после победы Великой Октябрьской социалистической революции.

В эти годы содержание журнала было нацелено на претворение в жизнь задач, вытекающих из утвержденного в декабре 1920 г. плана ГОЭЛРО. В № 1 журнала за 1922 г. редакционный комитет во главе с П. И. Воеводиным пишет в передовой статье: «Для России вопрос широкой электрификации с использованием мощных естественных источников энергии есть первостепенный

вопрос». Далее указывается, что «... журнал «Электричество» всегда будет отводить подобающее место как научным статьям, знакомящим с общим положением главнейших отделов науки, так и представляющим из себя результаты изысканий и исследований по важнейшим частным вопросам».

В журнале выступают со статьями А. В. Винтер, Р. Э. Классон, А. Ф. Иоффе, Д. В. Скобельцын и др. Большое место занимают обзоры зарубежных исследований в области электрификации и электротехники. В 30-х годах журнал начинает выходить под лозунгом: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны». Статьи этого периода посвящаются генеральному плану электрификации СССР, единой высоковольтной сети, устойчивости систем, электроприводу производственных механизмов, автоматике и телемеханике, крупному энергостроительству («Большая Волга», Днепрогэс, Свирьгэс и т. д.), строительству первой очереди метрополитена.

Но начавшаяся в 1941 г. война приостановила деятельность журнала; его издание было возобновлено лишь в 1944 г.

В послевоенный период происходит рост тиража журнала. Значительно увеличивается также его объем — до 12 печатных листов.

Редакция постоянно поддерживает связь с читателями журнала, организуя читательские конференции. За последние годы такие конференции проводились в Москве, Ленинграде, Свердловске, Харькове. Учитывая высказанные на конференциях предложения, редколлегия журнала стремится к публикации обзорных и проблемных статей, сочетающих научную ценность с практической направленностью. В течение многих лет редколлегия журнала «Электричество» производит взаимный обмен с рядом зарубежных изданий, печатает материалы международных и Всесоюзных научных совещаний и конференций.

Редакционной коллегией определена тематика журнала на ближайшие годы. Она предусматри-

вает публикацию статей по следующим основным направлениям¹:

1. Теоретическая электротехника — статьи, знакомящие широкие круги электротехников с последними достижениями в областях науки и техники, смежных с электротехникой, и статьи, посвященные исследованию и расчету электромагнитных полей, электрических и магнитных цепей.

2. Электроавтоматика и техническая кибернетика.

3. Энергетика — общие вопросы сплошной электрификации страны, электрические сети и распределение энергии, повышение надежности и экономичности работы энергосистем, защита от ненормальных режимов, автоматизация и телемеханизация энергосистем, диспетчерское управление, высоковольтное аппаратостроение.

4. Электропривод и автоматизация производственных процессов.

5. Электрификация железнодорожного транспорта.

6. Электротермия и электросварка.

7. Электрические машины и трансформаторы.

8. Технические средства автоматизации.

9. Низковольтная аппаратура.

10. Электротехника химических предприятий и использование пластмасс и органических веществ в электротехнических устройствах.

Наряду с изложенными вопросами журнал «Электричество» постоянно будет уделять большое внимание подготовке научных и инженерных кадров.

Созданный пионерами русской электротехники на заре ее развития журнал «Электричество» можно с уверенностью назвать своеобразной «летописью» отечественной электротехники.

Продолжая славные традиции своих создателей, журнал «Электричество» и в дальнейшем будет служить делу пропаганды научных достижений и исследований советских электротехников с целью создания материально-технической базы коммунизма.

¹ Более подробно тематика журнала «Электричество» опубликована в № 10, 1964 г.



Исследования специальных режимов работы синхронных машин, выполненные в СССР

*Доктор техн. наук, проф. Л. Г. МАМИКЭНЯНЦ, доктор техн. наук, проф. И. А. СЫРОМЯГНИКОВ
и доктор техн. наук Г. Н. ТЕР-ГАЗАРЯН*

Москва

Введение. До 40-х годов текущего столетия вследствие недостаточной изученности в практике работы энергосистем не применялись и считались недопустимыми многие из широко используемых ныне так называемых специальных режимов работы синхронных машин.

Так, допустимым считался лишь режим практически симметричной нагрузки (ток обратной последовательности не более 5% от номинального). При возникновении асинхронных режимов требовалось разделение энергосистем на отдельные части, внутри которых все машины работают синхронно; в случае потери возбуждения машины сейчас же отключались от сети. Включение машин на параллельную работу осуществлялось только способом точной синхронизации. Не использовалась и считалась опасной для машин форсировка возбуждения до «потолков», обеспечиваемых возбудителями.

Такое положение осложняло эксплуатацию энергосистем и понижало надежность их работы.

Быстрый рост ответственных промышленных потребителей, опережавший рост установленной мощности электростанций, обусловил работу многих энергосистем Советского Союза с большим числом часов использования силового оборудования при весьма малых резервах активной и реактивной мощностей. В этих условиях запросы практики не могли быть удовлетворены на основе существовавших представлений о допустимых режимах работы синхронных машин, и в конце 30-х — начале 40-х годов у нас начались исследования специальных режимов работы синхронных машин.

Основной их целью было достижение нового, более высокого уровня изученности физических процессов, сопровождающих режимы работы синхронных машин и обеспечение возможности более точной количественной оценки этих процессов. Проводившиеся исследования подвергались широкой проверке в эксплуатации. Специальным режимам синхронных машин было посвящено много десятков работ в отечественной литературе. Получаемые результаты неоднократно обсуждались на всесоюзных и международных конференциях. Все это способствовало получению окончательных выводов и рекомендаций.

В настоящее время специальные режимы работы синхронных машин широко применяются в отечественных энергосистемах и во многом способствуют повышению надежности их работы.

К сожалению, достигнутый в большинстве энергосистем высокий уровень надежности работы привел к самоуспокоенности некоторых работников эксплуатации и проектных организаций, которые не уделяют необходимого внимания строгому соблюдению всех действующих предписаний в отношении мер обеспечения надежности электроснабжения

потребителей и, в частности, применения специальных режимов синхронных машин и не используют в полной мере даваемые ими возможности. В ряде мест были случаи ограничений «потолков» возбуждения синхронных генераторов и компенсаторов ниже величин, предписываемых ГОСТ, необоснованного отказа от применения кратковременных асинхронных режимов и т. п. Это может привести к повторению тяжелых аварий, имевших место в прошлом.

Учитывая это обстоятельство, а также большую актуальность дальнейших исследований и применения специальных режимов синхронных машин в новых условиях крупных объединений энергосистем с большим числом машин, имеющих непосредственное охлаждение обмоток, авторы настоящей статьи сочли целесообразным обобщить основные итоги более чем 20-летнего этапа исследований и внедрения этих режимов в энергосистемах Советского Союза.

Форсировка возбуждения генераторов. В 30-е годы многие отечественные энергосистемы были подвержены лавинообразному снижению напряжения, возникавшему вслед за короткими замыканиями в сети и приводившему к нарушению параллельной работы. Основной причиной лавины напряжения был дефицит реактивной мощности. Однако существовавшее автоматическое регулирование возбуждения только лишь поддерживало нормальный уровень напряжения при колебаниях нагрузки. К нему не предъявлялось требования значительного увеличения тока возбуждения при глубоком понижении напряжения. Значительное повышение тока возбуждения считалось недопустимым по условиям сохранности генератора.

В конце 30-х годов в СССР впервые был опробован на практике новый форсированный режим работы генераторов при снижении напряжения в сети при коротких замыканиях и другим причинам [Л. 1]. Резкое увеличение величины реактивной мощности, отдаваемой при этом генераторами в сеть, способствовало ликвидации возникшего дефицита реактивности мощности и тем самым условий, способствующих развитию лавины напряжения.

Перевод генераторов в указанный режим при коротких замыканиях производился шунтированием всего добавочного сопротивления в цепи возбуждения возбудителя. В результате ток возбуждения формировался до потолочного значения, определяемого лишь параметрами возбудителя.

Массовое применение на синхронных генераторах и компенсаторах форсировки возбуждения позволило практически полностью избавиться от аварий, связанных с лавиной напряжения. При этом перегрузка генераторов оказалась менее опасной,

чем при отсутствии форсировки, когда перегрузка, обусловленная понижением напряжения в сети, продолжалась намного дольше [Л. 2].

Форсировка возбуждения оказалась весьма эффективным средством обеспечения самозапуска ответственных потребителей и в том числе двигателей собственных нужд электростанций, существенно повысив, таким образом, надежность работы электрических станций и промышленных предприятий.

В дальнейшем было показано, что эффективность форсировки возбуждения резко возрастает при увеличении потолка возбuditеля и скорости подъема напряжения на его выводах [Л. 2 и 3]. В связи с этим в 1950—1951 гг. в ГОСТ на электрические машины на основании упомянутых исследований были записаны новые параметры возбuditелей: для турбогенераторов и синхронных компенсаторов потолок не менее 2 и для гидрогенераторов 1,8, а скорости нарастания напряжения 2 и 1,5 соответственно.

В результате проведенной работы автоматическое регулирование возбуждения в сочетании с форсировкой возбуждения применяется практически на всех генераторах электростанций Советского Союза и является в настоящее время хорошо испытанным, дешевым и весьма эффективным мероприятием, повышающим устойчивость работы энергосистем.

Тенденция применять относительно высокие значения потолков и скоростей нарастания возбуждения отмечается в последние годы и в ряде зарубежных стран, в частности в Италии и Швеции [Л. 4].

В последние годы в СССР успешно начала применяться форсировка возбуждения синхронных двигателей, что повышает устойчивость работы узлов нагрузки.

Асинхронные режимы работы. Широкие экспериментальные и теоретические исследования асинхронных режимов синхронных машин были начаты в СССР в 1945—1946 гг. Практической их целью было кратковременное использование асинхронных режимов для повышения надежности работы энергетических систем.

Необходимо отметить, что вопрос о целесообразности использования таких режимов рассматривался в СССР еще до войны в работах П. С. Жданова [Л. 5 и 6], в которых теоретически были рассмотрены основные особенности асинхронных режимов синхронных машин в энергосистемах и возможности их ресинхронизации. Однако недостаточная изученность реальных параметров и характеристик генераторов, определяющих их поведение в асинхронном режиме, и отсутствие на генераторах устройств автоматического регулирования и форсировки возбуждения не позволили в то время развить начатые исследования и рекомендовать асинхронные режимы для практического использования в энергосистемах.

После массового внедрения устройств автоматического регулирования и форсировки возбуждения появилась принципиальная возможность реализации асинхронных режимов. Однако оставался нерешенным вопрос допустимости асинхронного хода

применительно к самим генераторам. Не было необходимых данных о фактических асинхронных характеристиках машин. В ряде случаев представления об этих характеристиках были ошибочными.

Так, считалось, что турбогенераторы, даже имеющие массивную бочку ротора, в асинхронном режиме способны развивать электромагнитный момент, равный номинальному, только при скольжении порядка 2—5%. При таких скольжениях потери в роторе должны быть настолько большими, что они способны нагреть ротор до опасных температур даже за короткий промежуток времени. Поэтому предписывалось немедленное отключение турбогенераторов от сети в случае потери возбуждения. Указанное представление было основано на ряде теоретических работ, в которых неправильно учитывалось влияние массовой бочки ротора на характеристики машин, а также на некритическом восприятии единичных экспериментальных данных, полученных на относительно малых машинах и при значительных понижениях напряжения сети.

Первые же теоретические исследования с учетом реальных параметров бочки ротора и испытания, проведенные в СССР в 1946 г. на двухполюсном турбогенераторе мощностью 25 Мвт, показали ошибочность этих представлений [Л. 7].

Специально организованные вскоре после этого массовые испытания, проводившиеся при активном участии работников энергосистем, позволили накопить в короткие сроки очень ценный экспериментальный материал о поведении турбогенераторов в асинхронном режиме при потере возбуждения.

К настоящему времени испытано более 50 турбогенераторов в диапазоне мощностей от 1,0 до 150 Мвт [Л. 8 и 9].

Результаты этих испытаний показывают, что у двухполюсных турбогенераторов с массивной бочкой ротора и косвенным охлаждением обмоток при номинальном напряжении на зажимах статора максимальное значение среднего асинхронного момента в 2 и более раз превышает номинальное, а момент, равный номинальному, как правило, имеет место уже при скольжениях порядка 0,2—0,7%. Меньшие цифры характерны для машин больших мощностей.

При этом, однако, ток статора превышает номинальное значение и для его ограничения приходится уменьшать допустимую активную нагрузку примерно до 50—70%, что еще снижает скольжение и обусловленные им потери в роторе, которые, как правило, оказываются значительно меньше нормальных потерь на возбуждение и не могут вызвать опасного нагрева ротора. В качестве примера сошлемся на результаты испытаний по проверке нагрева турбогенераторов Т2-50-2 и ТВО-30 (последний с непосредственным охлаждением проводников обмоток) при работе в асинхронном режиме без возбуждения с активной нагрузкой порядка 60% от номинальной. У обоих генераторов в асинхронном режиме нагрев обмоток возбуждения уменьшился по сравнению с синхронным режимом, а нагрев бочки ротора возрос незначительно (на 5—7°С). Турбогенератор ТВО-30 в асинхронном режиме работал при скольжении 0,35%. Суммар-

ные потери в его роторе составляли лишь 40% от потерь на возбуждение при синхронном режиме с номинальной нагрузкой.

Испытания четырехполюсных турбогенераторов показали, что они имеют несколько худшие характеристики среднего асинхронного момента, чем двухполюсные турбогенераторы. Однако и для таких машин при более глубокой разгрузке по активной мощности, чем у двухполюсных турбогенераторов, может быть допущен асинхронный режим работы без возбуждения.

В соответствии с действующими в СССР с 1947 г. инструкциями при наличии в энергосистеме резерва реактивной мощности турбогенераторы с массивными роторами и косвенным охлаждением в случае потери возбуждения могут оставаться в работе в асинхронном режиме в течение 30 мин. При этом ток статора не должен превышать 1,0—1,1 номинального тока, чему обычно соответствует активная нагрузка порядка 50—70% от номинальной (с учетом некоторого снижения напряжения на зажимах).

Работа в таком режиме уже неоднократно использовалась в энергосистемах.

Только за период с 1958 по 1961 г. в 22 энергосистемах зарегистрировано 50 случаев работы турбогенераторов при потере возбуждения. Этот режим имел место на генераторах до 100 Мвт включительно. Из этих 50 случаев потери возбуждения в 25 случаях возникший асинхронный режим завершился ресинхронизацией после восстановления нормального возбуждения. В остальных случаях генератор после кратковременной работы в асинхронном режиме отключался от сети, так как не удавалось восстановить возбуждение.

В практике эксплуатации уже известно очень много случаев работы турбогенераторов с косвенным охлаждением обмоток в кратковременном асинхронном режиме без возбуждения, однако не известно ни одного случая, когда такой режим приводил бы к повреждению турбогенератора.

В отношении современных турбогенераторов с непосредственным охлаждением обмоток пока еще имеются только предварительные испытания на упоминавшемся выше турбогенераторе ТВО-30 завода «Электросила», на турбогенераторах того же завода ТВФ-60-2, ТВФ-100-2 и на турбогенераторе завода «Электротяжмаш» ТГВ-200.

Результаты испытаний и предварительных расчетов показывают, что и эти машины могут работать в асинхронном режиме без возбуждения, но с меньшими активными нагрузками, чем у машин с косвенным охлаждением обмоток.

Это объясняется большими номинальными электромагнитными нагрузками и снижением кратности максимального значения среднего асинхронного момента из-за увеличения реактивных сопротивлений рассеяния у первых машин по сравнению со вторыми.

Необходимо проведение специальных испытаний на большом числе современных мощных турбогенераторов с непосредственным охлаждением обмоток для определения их асинхронных характеристик. Впредь до проведения специальных испытаний для таких турбогенераторов по согласованию

с заводами-изготовителями установлены следующие нормативные работы в асинхронном режиме:

для турбогенераторов типа ТВФ нагрузка не более 40% от номинальной в течение 30 мин;

для турбогенераторов типов ТВВ и ТГВ нагрузка не более 40% от номинальной в течение 15 мин [Л. 10].

Проведенные исследования показали, что гидрогенераторы должны отключаться от сети в случае возбуждения, если его не удастся быстро (30—60 сек) восстановить, так как длительная работа в таком режиме для них недопустима. Это объясняется тем, что явнополюсные генераторы с воздушным охлаждением имеют, как правило, $OK_3 \geq 1$ и поэтому при потере возбуждения ток статора может быть больше номинального даже при очень малых активных нагрузках, когда машина может остаться в синхронизме за счет момента явнополюсности или перейти в асинхронный режим с незначительным скольжением; если же активная нагрузка велика, то вследствие значительно худших, чем у турбогенераторов, характеристик среднего асинхронного момента скольжение может быть большим, что приводит к значительному возрастанию тока статора и появлению, кроме того, опасности повреждения успокоительных клеток и конструктивных элементов ротора из-за перегрева.

Восстановление возбуждения, как правило, приводит к успешной ресинхронизации гидрогенераторов. Восстанавливать возбуждение лучше всего тогда, когда под действием регулятора скорости гидротурбины скольжение уменьшится до относительно небольших величин (порядка 2—4%).

Экспериментальные исследования поведения синхронных генераторов при потере возбуждения, а также при всех других рассматриваемых ниже асинхронных режимах этих машин сопровождались развитием и уточнением теории самих машин и их поведения в энергосистемах. В частности, была разработана приближенная инженерная методика определения среднего асинхронного момента турбогенератора с учетом вытеснения токов в массивной бочке ротора при изменении скольжения [Л. 7].

В соответствии с полученными данными о соизмеримости постоянных времени контуров возбуждения и успокоительных обмоток были уточнены некоторые общие соотношения теории синхронных машин. С учетом этого были исследованы процессы при различных асинхронных режимах работы синхронных машин (при потере возбуждения, самосинхронизации, несинхронных включениях, ресинхронизации и др.) [Л. 11]. В области больших скольжений необходим учет вытеснения тока в массивной бочке ротора, что может быть приближенно сделано по способу, указанному в [Л. 7 и 8], или путем анализа более сложных многоконтурных схем замещения ротора генератора, что практически возможно при применении современных средств вычислительной техники [Л. 12]. Подбор параметров этих схем замещения, а также анализ ряда общих вопросов поведения машин при асинхронных и переходных процессах в настоящее время можно проводить на основе частотных характеристик машин и асинхронных

машин с использованием частотных характеристик [Л. 13].

Для исследования асинхронных режимов синхронных машин в энергосистемах уже в течение нескольких лет успешно применяются современные вычислительные машины.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования открыли перспективу широкого использования ряда кратковременных асинхронных режимов синхронных машин для повышения надежности работы энергосистем и электроснабжения промышленных предприятий.

Для быстрого восстановления параллельной работы частей энергосистем при аварийных отключениях линий передачи с двухсторонним питанием с 1954—1955 гг. в Советском Союзе стал успешно применяться метод несинхронного АПВ (НАПВ) отключившейся линии передачи без контроля частот и угла расхождения фаз отделившихся частей системы. Такие включения допускаются при условии, что ток, протекающий через генератор при включении с углом 180° , не должен превышать примерно 70% тока трехфазного короткого замыкания на зажимах машины для турбогенераторов и 80—85% для гидрогенераторов [Л. 14 и 15].

При этих условиях электродинамические усилия в обмотках составляют 50 и 70% от усилий, возникающих при коротком замыкании на выводах соответственно для турбогенераторов и гидрогенераторов, и примерно равны усилиям, возникающим при коротких замыканиях в сети. Учитывая недостаточную изученность электромеханических характеристик некоторых новых типов турбогенераторов с непосредственным охлаждением по согласованию с заводами-изготовителями, иногда устанавливают для них частные критерии допустимости НАПВ. Так, для турбогенераторов типов ТВВ и ТВФ несинхронные АПВ допускаются при условии, что ток не превышает трехкратного номинального тока [Л. 16]. Эти частные нормативы подлежат уточнению после накопления экспериментальных данных.

Благодаря своим преимуществам — простоте и надежности — НАПВ получило широкое распространение в большинстве энергосистем СССР. За первые 3 года его эксплуатации с 1954 по 1957 г. имело место 339 случаев несинхронных включений линий электропередач. Из этого числа в 257 случаях (76%) несинхронное АПВ было успешным и синхронизм между отделившимися частями системы восстанавливался. За период 1958—1960 гг. в энергосистемах было 586 случаев несинхронных включений, а количество успешных включений составило 80% [Л. 17]. Неуспешные несинхронные АПВ в подавляющем большинстве случаев имели место из-за неустранившихся повреждений изоляции линии электропередачи и ложной работы релейной защиты. Только в 9 из 900 случаев работы НАПВ возникал длительный асинхронный режим, не завершавшийся ресинхронизацией, что приводило к отключению электропередач защитой или вручную.

Допустимость кратковременного асинхронного режима возбужденных генераторов дала возмож-

ность принимать меры по обеспечению успешной ресинхронизации после нарушения устойчивости без деления энергосистемы на отдельные несинхронные части. Во многих случаях при современном уровне автоматизации энергосистем кратковременный асинхронный ход завершается успешной ресинхронизацией вообще без принятия каких-либо дополнительных мероприятий.

В настоящее время кратковременные асинхронные режимы применяются на линиях передач 220—500 кВ Волжская ГЭС им. Ленина — Москва, Волжская ГЭС им. XII съезда КПСС — Москва и во многих других энергосистемах.

Применение кратковременного асинхронного хода позволило предотвратить большое число аварий. Только за последние несколько лет в энергосистемах было более 30 случаев нарушений устойчивости, завершившихся успешной ресинхронизацией.

Допустимость кратковременного асинхронного режима дает возможность в ряде случаев отказаться от сохранения синхронной динамической устойчивости, обеспечивая восстановление нормального режима путем ресинхронизации. Отказ от необходимости сохранения синхронной динамической устойчивости является качественно новым подходом к определению и нормативам устойчивости энергосистем, нашедшим дальнейшее развитие в специальной литературе по устойчивости [Л. 18] и директивных материалах [Л. 19].

Важным практическим результатом исследования асинхронных режимов синхронных машин явилось развитие способа самосинхронизации, применявшегося ранее в единичных случаях и только для подключения к сети малых машин. Проведенные в этом направлении работы позволили включать этим способом мощные генераторы [Л. 20].

В настоящее время способ самосинхронизации на большинстве электростанций с агрегатами большой мощности применяется при аварийном включении генераторов. В нормальных условиях этот способ применяется на автоматизированных гидроэлектростанциях. Для случаев, когда применение НАПВ недопустимо, в энергосистемах используется автоматическое повторное включение генераторов и линии с самосинхронизацией (АПВС). В энергосистемах установлено 16 комплектов АПВС в основном на гидростанциях [Л. 17].

Исследование общих закономерностей асинхронных режимов синхронных машин и специально проведенные многочисленные испытания на промышленных предприятиях позволили разработать и осуществить целый ряд важных мероприятий по упрощению схем пуска и повышению надежности работы синхронных электродвигателей и, в частности, по обеспечению их самозапуска [Л. 8 и 21].

Изучение ряда эксплуатационных режимов работы синхронных машин потребовало разработки специальных методов и аппаратуры для исследования механических явлений в машинах [Л. 22]. К настоящему времени проведены уже многочисленные испытания гидрогенераторов и ряда крупных электродвигателей. Эти испытания и изучение опыта эксплуатации показали, что при нормальном

выполнении машины, т. е. хорошем закреплении обмоток, хорошей прессовке и стыковке активной стали и т. п., применяемые в энергосистемах и на предприятиях режимы работ не вызывают заметных отклонений в состоянии машин и в их повреждаемости.

Несимметричные режимы работы. Практическая необходимость в таких режимах может возникнуть, например, при повреждении или выводе в ремонт одной фазы трансформаторной группы, при работе линии на двух фазах, при питании электротяги на переменном однофазном токе и т. п. Однако из-за отсутствия достоверных данных о допустимой для генераторов несимметрии токов несимметричные режимы работы синхронных машин, как правило, не использовались.

Исследования несимметричных режимов синхронных машин начались в 40-х годах [Л. 23]. Для возможности выдачи мощности генераторов, работающих через две трансформаторные фазы, был разработан способ компенсации несимметрии, неоднократно применявшийся на практике [Л. 24].

Необходимость более широкого применения несимметричных режимов, особенно для гидроэлектростанций, побудила к проведению широких экспериментальных и теоретических исследований несимметричных режимов синхронных машин, главным образом гидрогенераторов [Л. 25].

Производство опытов стало возможным лишь после создания аппаратуры, фиксирующей и количественно оценивающей все дополнительные физические явления, сопровождающие несимметричный режим, и разработки методики его экспериментального исследования [Л. 26].

На разнотипных генераторах были получены опытные данные о дополнительном нагреве ротора в зависимости от величины несимметрии $\frac{I_2}{I_n}$ (отношение тока обратной последовательности к номинальному току). Эти данные показали, что в явнополюсном роторе могут быть выделены значительные дополнительные потери. В этом смысле особенно благоприятными оказались роторы с полной успокоительной системой, так как большая часть дополнительных потерь выделяется именно в ней, а охлаждается она наиболее интенсивно по сравнению с другими частями ротора [Л. 26 и 27]. В результате оказалось, что по нагреву ротора действительная длительная несимметрия $\frac{I_2}{I_n}$ во много раз больше, чем регламентированная старыми нормами.

В большинстве встречающихся на практике случаев несимметрия токов $\frac{I_2}{I_n}$ получается не больше 0,3. При этой несимметрии амплитуда дополнительного знакопеременного момента частоты 100 гц не превышает 0,35 M_n [Л. 26]. Усилие, создаваемое указанным моментом, не более 5% усилия тяжения полюсов. Однако будучи знакопеременным, оно при определенных условиях может вызвать значительную вибрацию и, как следствие, значительные инерционные силы. Для установления возможности проявления таких условий было проведено деталь-

ное виброобследование нескольких десятков самых разнообразных гидрогенераторов мощностью от 1—2 Мвт до 100—225 Мвт. На подавляющем большинстве обследованных машин отсутствовали условия резонанса основных деталей при частоте тангенциальной возмущающей силы 100 гц. Таким образом, было установлено, что дополнительные

усилия при несимметрии $\frac{I_2}{I_n} = 0,3$ обычно незначительны. Однако для окончательного заключения об их допустимости была рассмотрена еще и нагрузка конструкции генератора под действием сил, неизбежно возникающих в генераторах в симметричных режимах.

При этом было принято во внимание (и отражено в методике анализа [Л. 26]), что продолжительность несимметричного режима весьма мала по сравнению с общим сроком работы генератора, и поэтому можно рассчитывать на использование запасов, обычно не учитываемых при расчете конструкции генератора. Оказалось, что средний уровень напряжений в наиболее нагруженных узлах конструкций, вызываемых силами тяжения полюсов, противоположными им силами неравномерного нагрева корпуса и моментов вращения, далек от разрушающего. Затем этот вывод был проверен измерением напряжений на нескольких десятках генераторов различного качества изготовления (прессовка активной стали и стыковка разъемных частей статора) и различного эксплуатационного состояния. Была выявлена значительная зависимость напряжений в узлах конструкции от указанных факторов, влияющих на степень равномерности распределения усилий в одинаковых элементах конструкции. Однако и с учетом неравномерного распределения сил и напряжений обычно сохраняется вывод о достаточном запасе против разрушающих нагрузок [Л. 26].

Теоретические и экспериментальные исследования несимметричных режимов синхронных машин проводились применительно к гидрогенераторам и турбогенераторам. Наиболее детальные исследования были выполнены на гидрогенераторах, в том числе на генераторах СВ $\frac{1240}{170}$ -100 мощностью 55 Мвт, генераторах СВ $\frac{1160}{180}$ -72 мощностью 72 Мвт, генераторах СВ $\frac{1150}{200}$ -88 мощностью 115 Мвт, генераторе СВ $\frac{1190}{250}$ -48 мощностью 225 Мвт и генераторе СВФ $\frac{1500}{130}$ -58 мощностью 160 Мвт с непосредственным охлаждением обмоток статора водой и форсированным воздушным охлаждением ротора.

На небольших генераторах при опытах несимметрия $\frac{I_2}{I_n}$ доводилась до 50%, а на крупных машинах до 20%. Это позволило совершенно четко фиксировать все явления, сопровождающие несимметричный режим. Эксплуатационное состояние многих генераторов, работавших длительно со зна-

чительной несимметрией, находилось под наблюдением 10—15 лет. При этом не были обнаружены какие-либо его изменения, связанные с длительной несимметричной нагрузкой.

Полученные результаты явились основой увеличения норм на длительно допустимый ток обратной последовательности более чем в 2 раза. В ГОСТ записан для гидрогенераторов как длительно допустимый без специальных испытаний ток $I_2 = 0,12 I_n$. В правилах технической эксплуатации указано, что на основании результатов специальных испытаний [Л. 26] может быть допущена несимметрия $\frac{I_2}{I_n}$ больше 12%.

После указанного изменения в нормах длительный несимметричный режим генераторов стал использоваться при устойчивых однофазных повреждениях элементов линий электропередач, связывающих электростанцию с системой. Во всех подобных случаях был существенно уменьшен аварийный недоотпуск электроэнергии.

Приведем результаты использования несимметричного режима работы генераторов на Волжской ГЭС им. В. И. Ленина [Л. 28]. В период 1962—1964 гг. в связи с переводом линий передач, отходящих от ГЭС, с напряжения 400 на 500 кВ генераторы работали в длительно несимметричном режиме. Это давало возможность не отключать генераторы, работающие на реконструируемый трансформатор. Генераторы работали через две фазы силового трансформатора, пока реконструировалась одна фаза. Они работали и в том случае, когда две фазы имели высшее напряжение 500 кВ и одна 400 кВ (или наоборот). В несимметричных режимах мощность генераторов была 0,5—0,6 P_n , а несимметрия $\frac{I_2}{I_n}$ по результатам специальных испытаний 15—17%. За указанный период было выработано 201,2 млн. кВт·ч. Эта энергия была выработана в условиях дефицита мощности в системе.

Выводы. 1. Проведенные работы по изучению и практическому применению специальных режимов работы синхронных машин позволили существенно повысить надежность работы энергосистем. Результаты этих работ используются и развиваются не только в СССР, но и в ряде стран народной демократии.

В последние годы исследованию асинхронных режимов и ресинхронизации уделяется внимание и в ряде других стран (Англия, Япония и др.).

2. Создание объединенных энергосистем и применение в качестве основных источников мощных генераторов с непосредственным охлаждением обмоток, имеющих существенно отличные параметры и эксплуатационные характеристики по сравнению с машинами с косвенным охлаждением обмоток, делает весьма актуальным проведение в настоящее время нового этапа исследований с целью выяснения особенностей применения специальных режимов работы синхронных машин в указанных новых условиях.

3. Эти исследования должны проводиться в следующих основных направлениях:

теоретические и экспериментальные исследования эксплуатационных характеристик современных генераторов большой мощности с непосредственным охлаждением обмоток и в особенности кратковременной перегрузочной способности, параметров и частотных характеристик, асинхронных характеристик, механических параметров;

разработка и внедрение методов расчета и конструирования машин с учетом необходимости их работы в специальных режимах;

исследование и разработка мероприятий, обеспечивающих наиболее эффективное применение специальных режимов работы синхронных машин в условиях объединений энергосистем большой мощности.

Теоретические и экспериментальные исследования по всем указанным направлениям должны сочетаться с повседневным изучением опыта эксплуатации синхронных машин в энергосистемах.

Литература

1. Сыромятников И. А., Опыт борьбы за сохранение устойчивой работы системы Азэнерго, «Электрические станции», 1941, № 1.
2. Сыромятников И. А., Опыт эксплуатации электрических систем СССР после введения форсировки возбуждения генераторов, Доклад СИГРЭ, 1948.
3. Тер-Газарян Г. Н., О влиянии форсировки возбуждения синхронных генераторов на устойчивость асинхронных двигателей, «Электричество», 1945, № 3.
4. Laurent P., Carpentier L., Report on the activities of study committee № 17 a. c. generators CIGRE, 1962, Report № 158.
5. Жданов П. С., Синхронизация машин при нарушениях устойчивости, «Электричество», 1934, № 6.
6. Жданов П. С., Асинхронный режим в электрических системах, «Электричество», 1936, № 21.
7. Сыромятников И. А., Вопросы эксплуатации синхронных генераторов, Госэнергоиздат, 1948.
8. Сыромятников И. А., Режимы работы синхронных генераторов, Госэнергоиздат, 1952.
9. Савогин Н. А., Осипенко В. А. и Германов А. П., Асинхронный режим работы турбогенератора ТВ2-150-2 и включение его в сеть методом самосинхронизации, «Электрические станции», 1963, № 8.
10. Эксплуатационный циркуляр № Э-13/63 от 30 ноября 1963 г. «Об эксплуатации турбогенераторов с непосредственным охлаждением обмоток при неустановившихся режимах», «Электрические станции», 1964, № 4.
11. Мамиконянц Л. Г., Токи и моменты вращения, возникающие в синхронной машине при включении ее в сеть способом самосинхронизации, Труды ЦНИЭЛ, вып. IV, Госэнергоиздат, 1956.
12. Под редакцией Н. И. Соколова, Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов, изд-во «Энергия», 1964.
13. Казовский Е. Я., Переходные процессы в электрических машинах переменного тока, Академия наук СССР, 1962.
14. Главное энергетическое управление при Госплане СССР (Союзглавэнерго), Эксплуатационный циркуляр № Э-9/61, июль 1961.
15. Мамиконянц Л. Г. и Хачатуров А. А., Условия применения несинхронных включений в энергосистемах, «Электричество», 1965, № 1.
16. Эксплуатационный циркуляр № Э-5/63 от 26 марта 1963 г., «Электрические станции», 1963, № 6.
17. Мамиконянц Л. Г., Портной М. Г. и Хачатуров А. А., Обобщение опыта применения в энергосистемах асинхронных режимов, Сборник «Средства противоаварийной автоматики энергосистем», изд-во «Энергия», 1964.
18. Веников В. А., Электромеханические переходные процессы в электрических системах, Госэнергоиздат, 1958.

Об оптимальной системе напряжений для городских и сельских электросетей

Кандидат техн. наук Я. М. ЧЕРВОНЕНКИС и инж. Л. М. ФИНГЕР

Москва

В подавляющем большинстве районов нашей страны для сельской электрификации применяется в настоящее время система напряжений 110/35/10 кВ, а в городских кабельных сетях — чаще всего система 110/35/6 кВ. Между тем многочисленные исследования ЭНИН, Гипрокоммунэнерго и других организаций показали, что для современных плотностей нагрузки эти две системы (особенно последняя) отнюдь не оптимальны: в воздушных сетях значительно меньших затрат денег, цветного металла и особенно трансформаторной мощности требует в широком диапазоне плотностей нагрузки система 110/20 кВ с непосредственной трансформацией 20/0,4 кВ, в кабельных сетях — на ближайшее время — система 110/10 кВ. В обеих системах исключается промежуточная ступень напряжения 35 кВ и увеличивается количество глубоких вводов 110 кВ.

Система 110/20 кВ получила у нас широкое распространение только в Латвийской ССР. Внедрению этой системы способствовало то обстоятельство, что в Латвии до войны не было сетей 35 кВ, сети же 60 и 80 кВ допускали перевод на 110 кВ. К 1961 г. распределительные сети (РС) Латвии были — за исключением нескольких крупных городов — почти полностью переведены на 20 кВ. По расчетам Латгипросельстроя [Л. 1] система 110/20 кВ дает в целом по республике по сравнению с обычной системой 110/35/10 кВ экономию средств в 20%. К тому же она значительно ускорила присоединение мелких городов и сельскохозяйственных районов Латвии к сетям энергосистемы. По проработкам ЭНИН аналогичный эффект могло бы дать применение системы 110/20 кВ и во многих других республиках и областях страны, где плотность нагрузки сельскохозяйственных районов близка к латвийской.

В РСФСР городские РС 20 кВ имеются только в г. Бийске. В ряде других городов Российской Федерации существовали сети промежуточного напряжения 20 кВ, питавшие обычно РС 2—3 кВ. В большинстве случаев эти сети были в дальней-

шем переведены на 35 кВ. В наших городах совершенно не практиковался оправдавший себя за рубежом прием преобразования сети промежуточного напряжения 20 кВ в РС, с исключением сети 2—6 кВ. Применению такого приема препятствовало отсутствие у нас серийного выпуска оборудования 20 кВ, что затрудняло развитие сетей этого напряжения.

Широкое развитие сетей 110/35/10 кВ в нашей стране было, разумеется, не технической ошибкой, а вполне закономерным этапом развития, через который в той или иной форме прошли и зарубежные страны. На ранней стадии электрификации страны, когда количество опорных точек 110 кВ было очень мало, добавочная ступень трансформации была необходима для создания сети дополнительных недорогих опорных точек 35/10 или 35/6 кВ. Однако по мере электрификации страны количество подстанций 110 кВ быстро возрастало и продолжает быстро расти, а система 110/35/10 кВ с ее дополнительной ступенью трансформации начинает устаревать.

За рубежом с каждым годом все яснее вырисовывается тенденция к повышению напряжения РС значительно выше 10 кВ и одновременно к ликвидации сетей промежуточного напряжения 30—60 кВ.

Так, в ФРГ протяженность сетей 30—35 кВ сокращается за последние годы не только в процентном отношении, но и абсолютно. Одновременно все большее число сетей в городе и на селе переводится с 15 или — реже — с 6—10 кВ на 20 кВ [Л. 2]. Перевод воздушных сетей 5—6 кВ на 10 кВ, широко практиковавшийся до 1960 г., в последующие годы почти прекратился. Ряд западногерманских энергосистем завершает переход к системе 110/20 кВ во всех сельских районах и в небольших городах, расположенных в сельской местности. В крупных городах с сетями промежуточного напряжения 20 кВ (например, в Маннгейме, где от такой сети питалась РС 4 кВ) сеть 20 кВ преобразуется в распределительную с непосредственной трансформаци-

19. Основные положения и временные руководящие указания по определению устойчивости энергетических систем, изд-во «Энергия», 1964.

20. Мамиконянц Л. Г., Включение синхронных машин на параллельную работу способом самосинхронизации, Доклад на 15-й сессии Международной конференции по большим электрическим системам, Госэнергоиздат, 1954.

21. Линдорф Л. С., Повышение надежности работы синхронных двигателей, Информационные материалы ВНИИЭ № 50, Госэнергоиздат, 1960.

22. Элькин Ю. М., Экспериментальное исследование электромеханических процессов в синхронных машинах, Госэнергоиздат, 1961.

23. Сыромятников И. А., Определение допустимой нагрузки синхронных машин при несимметричных режимах, «Электрические станции», 1941, № 21—22.

24. Сыромятников И. А., Определение допустимой нагрузки синхронных машин при несимметричных нагрузках, Госэнергоиздат, 1944.

25. Тер-Газарян Г. Н., Экспериментальное исследование несимметричного режима гидрогенераторов, «Электричество», 1950, № 8.

26. Тер-Газарян Г. Н., Несимметричный режим работы гидрогенераторов, Госэнергоиздат, 1956.

27. Тер-Газарян Г. Н., Нагрев ротора гидрогенератора дополнительными потерями, «Электричество», 1963, № 8.

28. Костанян Г. Г. и Тер-Газарян Г. Н., Не-полнофазные режимы на ГЭС и в энергосистемах, Известия ТНТИСЭИ, 1964, т. 15.



ей на 0,4 кв. На перспективу западногерманские специалисты рекомендуют сохранить в стране лишь две системы напряжений — 110/20 кв для сельской местности, небольших и средних городов и 110/10 кв для крупных городов [Л. 3]. Для новых кабельных сетей любая из этих систем дает по сравнению с системой 110/35/10 кв при больших плотностях нагрузок экономию до 20—40%, что обычно оправдывает постепенную ликвидацию сетей промежуточного напряжения. Система 110/20 кв признается для новых кабельных РС с большой плотностью нагрузки несколько выгоднее системы 110/10 кв, но преимущества ее не столь значительны, чтобы оправдать перевод существующих кабельных РС 10 кв на повышенное напряжение.

Оборудование и кабели на 20 кв стоили в прошлом значительно дороже, чем на 10 кв. По мере освоения массового выпуска аппаратуры 20 кв эта разница сократилась. В настоящее время ТП и воздушные линии 20 кв обходятся в ФРГ на 10%, ячейки РУ и кабели (при равном сечении жил) — на 20% дороже, чем при 10 кв. При равной пропускной способности стоимость ЛЭП и кабелей 20 кв нередко ниже, чем при 10 кв.

В ГДР распределительные сети 20 кв широко применяются в сельских районах и в ряде городов, в частности в новых городах и поселках. В столице ГДР преобладает пока система 110/30/6 кв; в северной части города начат переход к системе 110/10 кв. В остальных районах Берлина ликвидация сетей 30 кв признана преждевременной, так как на этом напряжении выдает свою мощность большинство электростанций города; однако по мере исчерпания мощности существующих источников и центров питания и здесь будет постепенно вводиться трансформация 110/10 кв [Л. 4].

В большинстве городов Польской Народной Республики намечено ввести единое напряжение 15 кв, общее для городов и прилегающей сельской местности. Отдается предпочтение системе 110/15 кв.

В Болгарии принято решение строить новые городские сети на 20 кв и приступить к переводу существующих РС на это напряжение.

В Праге старые РС 3 кв постепенно вытесняются сетями 22 кв — кабельными в центральных районах и воздушными на окраинах города.

В столице Австрии преобладает до сих пор устаревшая система 110/28/5 кв. В настоящее время дальнейшее развитие сетей промежуточного напряжения практически прекращено: в центральной части города внедряется система 110/10 кв, на городских окраинах и в пригородной зоне — система 110/20 кв. В перспективе существующие подстанции 28/5 кв будут по мере роста нагрузки постепенно преобразованы в подстанции глубокого ввода 110/10 и 110/20 кв [Л. 5].

Во Франции сельские районы питались до 1961 г. преимущественно на 15 кв, в городах преобладали РС 5,5 и 10 кв. В отдельных сельских районах с очень малой плотностью нагрузки имелись небольшие количества РС 30—33 кв с непосредственной трансформацией на 0,4 кв, питавшие в основном крупные изолированные фермы. Сети 20 кв составляли к 1960 г. лишь 4,3% от общей протяженности РС. В связи с необходимостью усилить

пропускную способность РС в 1961 г. принято решение ввести для РС единое стандартное напряжение — 20 кв и приступить к переводу на это напряжение всех городских и сельских сетей 4—15 кв, а также 30—33 кв. Для облегчения перевода уровень изоляции 20 кв приближен к уровню, принятому для РС 15 кв. В ближайшие 10 лет намечено в основном завершить перевод воздушных и кабельных сетей 5—10 кв, для которых повышение напряжения дает наибольший экономический эффект. В последующие 5 лет будет завершён перевод воздушных сетей других напряжений. Спорным первоначально оставался вопрос о целесообразности перевода на 20 кв городов с новой развитой кабельной сетью 15 кв: после детальных экономических расчетов было принято решение перевести и эти города на 20 кв, но во вторую очередь, завершив перевод в 30-летний срок [Л. 6].

Париж питался до сих пор электроэнергией по системе 220/60/12 кв; сети 12 кв и ниже работали в основном на двухфазном токе. При переводе РС города на 20 кв трехфазного тока сети 60 кв и подстанции 60/12 кв с трансформаторами Скотта ликвидируются. Тем самым город получит прогрессивную систему питания 220/20 кв.

В ряде районов Италии РС переводятся на единое напряжение 15 кв, в других районах — на 20 кв. Города Милан и Турин питаются по системе 220/20 кв.

В сельских районах США электрификация проводилась до войны преимущественно на напряжении 12,5 кв. Начиная с 1948 г., здесь внедряются РС 20,8—24,9 кв.

В городах США в 50-е годы осуществлялся массовый перевод РС 4,16 на 12,5—13,8 кв. В настоящее время оптимальным напряжением для воздушных городских РС признается напряжение класса 20 кв.

В 1964 г. институт Гипрокоммунэнерго обследовал совместно с ВНИИЭ экономичность системы 110/20 кв для городских сетей нашей страны. Обследование проводилось применительно к двухзвеневой сети с разукрупненными РТП. С помощью ЭЦВМ были определены расчетные затраты на центры питания, РТП, питательные и распределительные сети высокого напряжения (с учетом стоимости потерь энергии). Радиус питательной сети r изменялся вариантно от 1,5 до 6 км. Результаты подсчетов для воздушной городской сети даны в таблице. За 100% приняты расчетные затраты на сеть, построенную по системе 110/10 кв.

Таблица

Плотность нагрузки, Мвт/км ²	1,9		3,8		7,5	
	110/6	110/20	110/6	110/20	110/6	110/20
Система напряжений, кв						
Расчетные затраты при $r = 1,5$ км, %	119	94	127	88	133	81
То же при $r = 3$ км	128	88	134	83	140	74
То же при $r = 6$ км	150	82	157	74	—	67

Как видно из таблицы, воздушная городская сеть 20 кВ имеет по расчетным затратам преимущества во всем рассматриваемом диапазоне расстояний и плотностей нагрузки. Затраты, приведенные в таблице, не учитывают удорожания ТП при переходе от 6/10 кВ к 20 кВ — порядка 0,3 руб/кВт по расчетным затратам. С учетом этого удорожания вариант 110/20 кВ практически утрачивает свои преимущества при $r=1,5$ км; при $r=3$ км он на 5—15%, при $r=6$ км — на 12—25% выгоднее системы 110/10 кВ. По расходу цветного металла система 110/20 кВ дает экономию в 18—45%, по потерям энергии — в 50—55% по сравнению с системой 110/10 кВ: это последнее соотношение делает РС 20 кВ особо актуальным для районов с напряженным топливно-энергетическим балансом. Системы 110/6 и 110/35/6 кВ были во всех случаях наименее выгодными из рассмотренных.

Как подробнее показано в статье И. С. Бесмертного, публикуемой в этом же номере, для кабельных городских сетей оптимальной оказалась при современном соотношении цен на кабели 10 и 20 кВ система 110/10 кВ. Исключение составят городские и промышленные кабельные сети, питающиеся непосредственно от ГРУ крупных станций с генераторным напряжением 20 кВ [Л. 9].

В расчетах не рассматривались РС 35 кВ, неприемлемые для наших городов и рабочих поселков как в воздушном, так и в кабельном варианте: воздушные РС 35 кВ не могут пройти по большинству городских улиц по условиям соблюдения габаритов между проводом и зданиями; кабели же 35 кВ могут быть по условиям градиента потенциала изготовлены с сечением жилы не менее 70 мм² и минимальной пропускной способностью порядка 6 Мвт, излишне большой для РС даже на перспективном уровне. В этих условиях повышение напряжения кабельных РС до 35 кВ привело бы не к экономии, а к перерасходу цветного металла.

В сельских сетях с их намного большими радиусами действия преимущества системы 110/20 кВ перед системами 110/10 и тем более 110/6 кВ бесспорны. В большинстве сельских районов приходится выбирать только между системами 110/20, 110/35 и 110/35/10 кВ. Выбор оптимальной системы зависит теоретически от плотности нагрузок и от густоты расположения ТП. По данным [Л. 1] при 0,1 ТП/км² система 110/20 кВ оптимальна для плотностей нагрузки от 0,5 до 5 кВА/км², при 0,2 ТП/км² — для плотностей от 1 до 15 кВА/км². При меньших плотностях нагрузки рациональна система 110/35/10 кВ, при больших — 110/35 кВ. Если учесть, что по мере роста плотностей нагрузки медленно увеличивается и число ТП на 1 км², становится ясным, почему система 110/20 кВ оправдывает себя в сельских районах в столь широком диапазоне плотностей нагрузки.

По данным [Л. 7] система 110/22 кВ обеспечивает для типичного сельскохозяйственного района по сравнению с системой 110/35 кВ экономию в капиталовложениях на 9%, а в расчетных затратах — на 8%.

Наиболее эффективна система 110/20 кВ в том случае, когда вопросы городской и сельской элек-

трификации рассматриваются не в отрыве друг от друга, а как единое целое. Действительно, масштабы сосредоточенных городских нагрузок требуют в перспективе сооружения опорных подстанций 110 кВ в большинстве городов и рабочих поселков страны. В очень многих районах страны от этих несельских подстанций можно питать все сельские потребители непосредственно на 20 кВ без дополнительной трансформации. В городе средней величины можно при этом, как правило, ограничиться сооружением одной простейшей подстанции 110/20 кВ с двухобмоточными трансформаторами. Система 110/10 кВ, приемлемая для многих городов, потребовала бы создания дополнительной густой сети сельских подстанций 110/10 кВ, что непомерно утяжелило бы электрификацию села. Система 110/35 кВ, как мы видели, неприемлема для городов. Наконец, система 110/35/10 кВ требует сооружения в городах подстанций с трехобмоточными трансформаторами, а в сельской местности — дорогой сети 35 кВ, не оправданной при малом расстоянии между подстанциями 110 кВ; такое решение невыгодно как для городской, так и для сельской энергетики.

Эффект от применения системы 110/20 кВ для комплексной электрификации сельской местности, небольших городов и поселков был рассмотрен институтом Гипрокоммунэнерго применительно к Омской области. В настоящее время централизованным электроснабжением обеспечена в основном лишь центральная часть области, прилегающая к электрифицированной Сибирской магистрали; в северных и южных районах области начинается централизация электроснабжения по системе 110/35/10 кВ. Расчеты показали, что система 110/20 кВ оптимальна для юго-восточных, южных и северо-восточных районов области, пока не имеющих сетей централизованного электроснабжения. Для районов в этих же частях области, уже имеющих сети 35 кВ, лет через 10 встанет вопрос о переводе основных магистралей 35 кВ на 110 кВ и замене крупнейших подстанций 35/10 кВ подстанциями 110/20 кВ. В центральной части области тяговые подстанции 110 кВ расположены вдоль железных дорог столь густо, что электроснабжение может здесь на ближайшие 10—12 лет осуществляться по системе 110/10 кВ без использования сетей 35 кВ. На существующих подстанциях 110/35/10 кВ в этой зоне обмотки среднего напряжения могут быть после ликвидации сельских сетей 35 кВ переключены на треугольник, что позволит использовать эти подстанции в дальнейшем как опорные точки для постепенного перевода сельских сетей на 20 кВ. В северных таежных районах области плотность нагрузки пока столь мала, что осуществляемое здесь электроснабжение по системе 110/35/10 кВ может быть сохранено до 1975 г. В отдаленной перспективе с ростом нагрузок система 110/20 кВ может стать актуальной и для этой части области.

Эффективность перехода от запроектированной системы 110/35/10 кВ к системе 110/20 кВ можно показать на примере узла рабочий поселок Черлакский — районный центр Русская Поляна (юг Омской области). Как показано на рис. 1,а, по запроектированному варианту намечалось питать узел от

одной подстанции 110 кВ и четырех подстанций 35 кВ общей мощностью 82,8 Мва. При переходе к системе 110/20 кВ для питания узла требуются три подстанции 110/20 кВ общей мощностью лишь 36,3 Мва. Переход к новой системе по рис. 1, б сокращает потери мощности в высоковольтных сетях с 6 до 1,6 Мвт, годовые потери энергии — с 13,9 до 4,1 млн. кВт·ч. Капитальные затраты по узлу сокращаются (с учетом компенсации стоимости потерь мощности) на 533 тыс. руб., расчетные затраты — на 102 тыс. руб. Достигается также существенная экономия цветного металла.

Против системы 110/20 кВ нередко выдвигается довод, что важнейшие сельские районы страны уже завершают электрификацию по системе 110/35/10 кВ и что говорить о переходе к иной системе уже поздно. Этот довод совершенно несостоятелен. Как мы видели, система 110/20 кВ наиболее интенсивно внедряется по мере роста нагрузки именно в странах, где охват сельских районов сетями централизованного электроснабжения очень высок. При этом перевод РС на повышенное напряжение почти повсеместно оказывается наиболее экономичным способом повышения их пропускной способности. Так, в энергосистеме ЕАМ в центральной части ФРГ [Л. 2] к 1958 г. 40% РС питалось на 15 кВ, 60% — на 20 кВ. Сеть питала сельские районы площадью 3 600 км² и четыре небольших города. Сравнение между усилением сети 15 кВ и переводом на 20 кВ в течение 20-летнего срока показало, что вариант

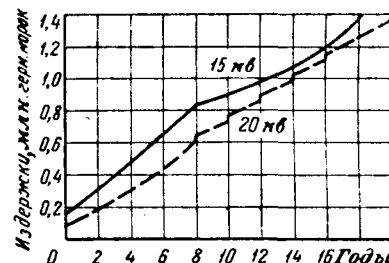


Рис. 2. Динамика издержек на развитие сетей ЕАМ при сохранении напряжения 15 кВ и при переводе сети на 20 кВ.

перевода дает на всем рассматриваемом промежутке времени значительную экономию расчетных затрат, доходщую в отдельные годы до 35% (рис. 2). Экономия достигается как за счет сокращения потерь, так и за счет отсрочки во вводе дополнительных центров питания. Соответственно было принято решение перевести всю РС 15 кВ системы с нагрузкой 74 Мвт на 20 кВ. Подготовка к переводу была начата в 1953 г. — за 5 лет до начала перевода. За это время на всех ЦП было установлено по меньшей мере по одному трансформатору, допускающему переключение на 20 кВ. Были приобретены сетевые трансформаторы, допускающие переключение на 20 кВ, в количестве 30% от общей потребности. Сам перевод был произведен по участкам в течение 1958—1962 гг. Перевод одного участка продолжался в среднем 8 суток. Ежедневно переводилось на 20 кВ 20 км воздушных линий. В отдельных точках — на стыках РС 15 и 20 кВ — были установлены автотрансформаторы связи 15/20 кВ.

В нашей стране нагрузки растут как в городе, так и особенно на селе намного быстрее, чем в любой из стран Западной Европы. Поэтому рационализация системы распределения энергии по мере роста нагрузки для нас еще более актуальна, чем для наших западных соседей.

В этих условиях в большинстве районов, уже электрифицированных по схеме 110/35/10 кВ, в недалеком будущем станет актуальным перевод всех крупных подстанций 35/10 кВ на 110 кВ и одновременно перевод РС 10 кВ на 20 кВ. Это значительно эффективнее повышает пропускную способность РС, чем перевод ЛЭП 15 кВ, столь широко практикуемый на Западе. Габариты ЛЭП 10 кВ согласно ПУЭ 1964 г. не отличаются от габаритов ЛЭП 20 кВ; перевод ЛЭП сводится в этих условиях к замене изоляторов и крючьев. В районах с малым загрязнением воздуха имеется возможность, как показывает зарубежный опыт [Л. 3], сохранить хотя бы временно изоляцию 10 кВ и после перевода на 20 кВ (мы не останавливаемся здесь на возможности заземления нейтрали при переводе на 20 кВ, позволяющей, по мнению отдельных авторов, вообще отказаться от усиления изоляции ЛЭП). ЛЭП 35 кВ на порталных опорах с проводами большого сечения допускают, как правило, перевод на 110 кВ. Переоборудование крупных сельских подстанций 35/10 кВ на 110/20 кВ и мачтовых ТП 10/0,4 на 20/0,4 кВ требует значительных

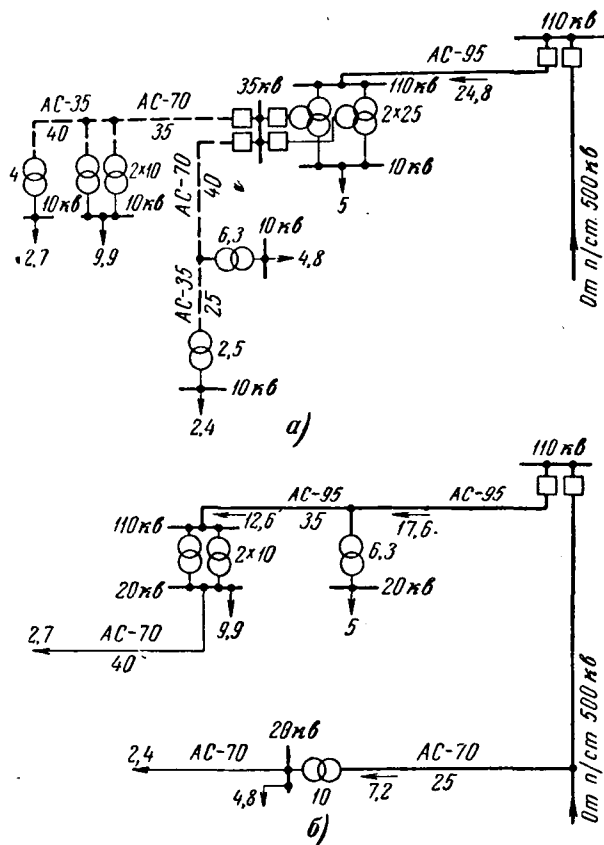


Рис. 1. Варианты электроснабжения узла Черлакский — Русская Поляна.

а — вариант 110/35/10 кВ; б — вариант 110/20 кВ; — ЛЭП 110 кВ; --- ЛЭП 35 кВ; - - - ЛЭП 20 кВ.

затрат оборудования, но не представляет обычно особых проблем.

В районах с очень малой плотностью нагрузок можно сохранить на ближайшие 10 лет систему 110/35/10 кВ, сочетая ее с размещением отдельных ТП 35/0,4 кВ вдоль трассы ЛЭП 35 кВ.

В городских сетях воздушные ЛЭП 35 кВ на металлических опорах часто допускают перевод на 110 кВ: в других случаях удается использовать при переводе только трассу ЛЭП с полным демонтажем существующей линии. Кабельные ЛЭП 35 кВ перевода на 110 кВ не допускают. Помещения закрытых ТП 6—10 кВ должны быть при переводе на 20 кВ — в случае сохранения обычной компоновки — расширены на 50%; использование их без расширения возможно только при условии применения особо компактных КРУ 20 кВ [Л. 8]. Кабели 6—10 кВ для перевода на 20 кВ непригодны и должны быть заменены.

Как видно из изложенного, перевод существующей городской сети 110/35/6—10 кВ, особенно кабельной, на 110/20 кВ значительно труднее, чем перевод сельской сети. Поэтому в городах с развитой кабельной сетью 10 кВ эту сеть надо сохранять до полной ее амортизации с постепенным переходом к системе 110/10 кВ. В городах с развитой кабельной сетью 6 кВ могут быть рассмотрены два варианта:

переход к системе 110/10 кВ с переводом кабелей 6 кВ на повышенное напряжение;

вариант «замораживания» сети 6 кВ с наложением новой сети 20 кВ. При этом существующие кабели и трансформаторы 6 кВ сохраняются в эксплуатации до их амортизации, но весь прирост нагрузки покрывается за счет развития сети 20 кВ; воздушные участки сети 6 кВ переводятся на 20 кВ. В отдельных случаях возможна временная установка трансформаторов 20/6 кВ. Для г. Южносахалинска такое решение даст по расчетам Гипрокомунэнерго через 5 лет экономию в 18%¹ на капитальных вложениях и 9% на ежегодных издержках.

Выводы. 1. В перспективе возможны несколько основных систем распределения электроэнергии:

а) 110/10/0,4 кВ в ряде крупных городов с развитой кабельной сетью и в некоторых районах с очень густым расположением подстанций 110 кВ;

б) 110/20/0,4 кВ — для большинства городов и районов страны, иногда с «замороженными» и постепенно отмирающими островками кабельных сетей 6—10 кВ;

в) 110/35/10/0,4 кВ в сочетании с 110/35/0,4 кВ в районах с очень малой плотностью нагрузок.

2. Во избежание очень крупных бросовых затрат необходимо в ближайшее время силами ведущих организаций, проектирующих городские и сельские распределительные сети, разработать тех-

нико-экономический доклад по внедрению в разных районах СССР наиболее прогрессивных систем распределения электроэнергии, в частности системы 110/20/0,4 кВ. При этом возможно несколько направлений внедрения этой последней системы:

а) В районах, где уже сейчас имеются сети 20 или 15 кВ, необходимо безотлагательно развивать распределение энергии на 20/0,4 кВ с вытеснением других систем [Л. 9].

б) В районах со значительной плотностью населения, не имеющих пока сетей централизованного электроснабжения, обычно будет целесообразным строительство сетей 110/20 кВ. На первом этапе, пока нагрузки малы, может оказаться целесообразной работа сетей 20 кВ на напряжении 10 кВ, а ЛЭП 110 кВ — на 35 кВ. Радиус действия РС должен с самого начала соответствовать возможностям системы 20/0,4 кВ: это позволит отказаться от строительства многих намечаемых в настоящее время подстанций 35/10 кВ, улучшить использование каждой создаваемой в этих районах опорной точки и тем самым значительно ускорить и удешевить электрификацию сельского хозяйства.

в) В районах с развитой сетью 35 и 10 кВ должна быть проверена целесообразность постепенного перевода (по мере роста нагрузок) подстанций 35/10 кВ на напряжение 110 кВ, а линий 10 кВ — на 20 кВ; должны быть определены оптимальные сроки такого перевода. Правильное решение этого вопроса позволит в ряде случаев еще до начала перевода ускорить и удешевить сплошную электрификацию района за счет отказа от сооружения ряда подстанций 35/10 кВ, которые стали бы излишними после перевода.

Литература

1. Могильницкий Н. А. и Шулов Б. С., Применение напряжения 20 кВ в Латвийской ССР, Госэнергоиздат, 1963.
2. ETZ-A. Bd 82, 1961, № 22 (Ряд статей и дискуссия).
3. Elektrizitätswirtschaft, Bd 59 (1960), № 3, 16, 19 (Ряд статей и дискуссия).
4. Bach G., Rekonstruktion und zukünftige Gestaltung des Berliner Verteilungsnetzes. Energietechnik, Bd 14 (1964), № 7, S. 308—313.
5. Werner L., Der Ausbau der Wiener Versorgungsnetze. E. und M. 1963, № 17, S. 365—374.
6. Pelissier R., Robert R., La normalisation à 20 kV des réseaux à moyenne tension en France. Bull. SFE, t. 4, 1963, № 45, p. 487—509.
7. Динабургский И. М. и Имшенецкий В. Н., Повышение пропускной способности сельскохозяйственных электрических сетей, «Механизация и электрификация», 1962, № 2.
8. Moser E., Müller G., Entwicklung einer neuartigen Ortsnetzstation. Elektrizitätswirtschaft, Bd 64 (1965), № 2, S. 25—28.
9. Мукосеев Ю. Л., Об оптимизации напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий, «Промышленная энергетика», 1965, № 4.

[26.4.1965]



Применение напряжений 6—10—20 кВ в городских электрических сетях

Кандидат техн. наук И. С. БЕССМЕРТНЫЙ

Гипрокоммунэнерго

Согласно ГОСТ 721-62 для распределения энергии могут выбираться напряжения 6, 10 и 20 кВ. Однако в подавляющем большинстве городов существуют сети 6 кВ, и их расширение легче производить на том же напряжении. Это вызывает практические препятствия к реализации указания ПУЭ-1-2-65, по которому сети должны выполняться, как правило, на напряжение не ниже 10 кВ и после проведения профилактических испытаний допускается использование проложенных кабелей 6 кВ на 10 кВ.

Между тем в зарубежных распределительных сетях происходит повсеместное внедрение напряжений 10—20 кВ вместо более низких [Л. 1 и 2]. В ГДР напряжение 6 кВ даже не допускается для распределения энергии согласно Государственному стандарту 1961 г. [Л. 3].

Выпущенный Гипрокоммунэнерго в 1964 г. технико-экономический доклад содержит соображения по применению повышенных напряжений. Эти соображения обоснованы работами по сравнению вариантов кабельных (и частично воздушных) сетей 6—10—20 кВ применительно к микрорайону новой 4—5-этажной жилищной застройки. Кроме запроектированных конкретных вариантов сетей и их питания, в частности, воздушными линиями глубокого ввода 35—110 кВ, было проведено исследование показателей сетей на электронной цифровой вычислительной машине в лаборатории энергосистем Всесоюзного научно-исследовательского института электроэнергетики.

При исследовании показателей сетей и сравнении вариантов электроснабжения участка (микрорайона) предусматривалось от районных подстанций энергосистемы с трансформаторами 110/35/6 (10—20) кВ, располагаемых с изменением средней дальности передачи энергии или расстояния от пунктов питания сети в пределах 1,5—6 км. Количество последних варьировалось в соответствии с вариантами схемы и уровнями расчетных нагрузок, указанных в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные нагрузки на шинах ТП

Индекс	Уровень нагрузок	Общая нагрузка, тыс. кВт	Плотность нагрузки, тыс. кВт/км
0	Начальный	12,7	3,75
1	Промежуточный	25,4	7,5
2	Перспективный	49,6	14,6

Пункты питания распределительной сети, обычно называемые распределительными пунктами (РП), в современной практике проектирования обычно укрупняются ввиду их высокой стоимости. В некоторых случаях они превращаются в центральные распределительные пункты (ЦРП), подобные распределительным устройствам 6—10 кВ подстанций глубокого ввода высшего напряжения 35—110 кВ.

С другой стороны, возможное в принципе укрупнение РП по той же, что и выше, причине заведомо будет неэффективным без значительного удешевления их конструктивного выполнения. Это и предусмотрено в некоторых вариантах, причем питательными пунктами служат в этих случаях несколько расширенные трансформаторные подстанции (РТП), играющие роль распределительных. Такие варианты были приняты в основу теоретизированных расчетов сетей на ЭЦВМ, поскольку это облегчило усреднение исходных данных. Результаты этих расчетов сопоставлены с показателями из конкретного проектирования сетей участка по всем вариантам: I — с ЦРП; II — с РП; III — с РТП, как показано ниже на рис. 1.

Предварительно были намечены сети 380 В и сетевые трансформаторные подстанции (ТП) для обеспечения трех уровней электропотребления, отвечающих удельным нагрузкам по указаниям СН 167-61. Для начального уровня (0) принято до 15 Вт/м² жилой площади на вводе в дом.

Расчеты на ЭЦВМ, выполненные во ВНИИЭ под руководством кандидата техн. наук Ф. Ф. Карпова, производились путем оценки большого числа исполнений — вариантов сетей с различным количеством РТП при трех разных значениях параметров: уровней нагрузки, напряжений и средних расстояний РТП от районной подстанции энергосистемы.

В основу этих расчетов были положены исходные данные, определившиеся из конкретного проектирования сетей участка: общее число ТП, общая длина распределительной сети, среднее число магистралей, отходящих из РТП (равное четырем).

Точно так же были приняты одинаковые единичные стоимости элементов, нормы отчислений и расчетные условия, указанные ниже в приложении.

Полученные результаты в виде технических и стоимостных показателей разных вариантов позволили установить зависимости показателей от количества или мощности РТП при разных значениях параметров.

На рис. 1 показаны, например, удельные капиталовложения для кабельных сетей 10 кВ при среднем расстоянии РТП от подстанции системы 1,5 км. Кривые отвечают полученным на ЭЦВМ значениям, а отдельные точки — трем вариантам в конкретном исполнении. Резкие различия в показателях отдельных вариантов вызваны в основном различиями в стоимости пунктов питания (ЦРП в варианте I; РП в варианте II; РТП в варианте III). Верхняя граница мощности РТП, указанная на графике, обусловлена пропускной способностью головных участков распределительных магистралей.

Поскольку показатели оптимальных исполнений сетей, выявленные из расчетов на ЭЦВМ, были определены для напряжений 6, 10 и 20 кВ, имеется возможность сравнения их экономичности. Для это-

го сопоставлены удельные показатели, полученные для оптимального количества РТП при каждом из трех напряжений, для случаев непосредственного питания от районных подстанций энергосистемы.

В табл. 2 и 3 приведены показатели капиталовложений и расчетных затрат по кабельным сетям в зависимости от плотности нагрузки по данным ЭЦВМ. Эти показатели соответствуют оптимальному количеству пунктов питания (РТП), различному для разных напряжений и уровней нагрузки. Изменения стоимости ТП при 20 кв должны учитываться отдельно.

Таблица 2

Показатели кабельных сетей 10 кв для различных расстояний от районной подстанции

Плотность нагрузки, тыс. квт/км ²	3,8	7,5	15	Расстояние, км
Удельные расчетные затраты, тыс. руб/Мвт	2,6 3,2 4,3	1,9 2,5 3,5	1,6 2,1 3,2	1,5 3,0 6,0
Удельные капиталовложения, тыс. руб/Мвт	11,9 13,8 17,7	8,2 10,1 13,7	6,4 7,7 11,5	1,5 3,0 6,0

Таблица 3

Показатели кабельных сетей 6—20 кв относительно показателей для 10 кв (см. табл. 2), принятых за 100 % для различных расстояний от районной подстанции

Плотность нагрузки, тыс. квт/км ²	3,8		7,5		15		Расстояние, км
Напряжение, кв	6	20	6	20	6	20	
Относительные расчетные затраты, %	119 125 135	150 141 130	126 128 137	132 116 109	125 138 141	112 109 100	1,5 3,0 6,0
Относительные капиталовложения, %	104 107 110	163 158 151	111 114 119	142 136 128	119 123 127	133 130 129	1,5 3,0 6,0

Из приведенных данных следует, что напряжение 10 кв является экономическим для всех рассмотренных случаев.

Для напряжения 6 кв расчетные затраты выше, чем для 10 кв, на 19—41 % и капиталовложения выше на 4—27 %. Они увеличиваются вместе с плотностью нагрузки и длиной питающих кабелей (расстоянием от районной подстанции). В случаях средних условий (7500 квт/м² и 3 км) — соответственно около 30 и 15 %.

Для напряжения 20 кв име-

ет место обратная зависимость от плотности нагрузки и длины питающих кабелей, но расчетные затраты остаются большими, чем для 10 кв, в пределах 0—50 %, а капитальные вложения больше на 29—63 % без учета удорожания ТП при указанных средних условиях соответственно около 15 и 35 %.

Увеличение расчетных затрат для кабельных сетей 20 кв обусловлено в основном высокой стоимостью отечественных кабелей 20 кв по сравнению с 10 кв (дороже 1,5—2 раза). В зарубежных странах соотношение стоимостей кабельных линий значительно более благоприятно для напряжения 20 кв, в ГДР 1 км кабельной линии 20 кв сечением 3×120 мм² (алюминий) стоит на 18 % дешевле 1 км кабельной линии 10 кв сечением 3×185 мм² при одинаковой пропускной способности [Л. 4], тогда как в СССР — на 40 % дороже.

Если в перспективе стоимости отечественных кабелей 20 кв приблизятся к зарубежным данным, напряжение 20 кв станет в ряде случаев оптимальным и для кабельных сетей, особенно при больших плотностях нагрузки и больших расстояниях от подстанций.

Как упомянуто выше, наряду с показателями для кабельных сетей 6—10—20 кв были определены показатели и для воздушных сетей. Полученные результаты, приведенные в публикуемой одновременно статье Я. М. Червоненкиса и Л. М. Фингера, показывают, что напряжение 20 кв является экономичным практически для всех воздушных сетей.

В целях более подробного рассмотрения показатели оптимальных исполнений кабельных сетей 6 и 10 кв представлены на рис. 2, а, б.

Для трех точек, соответствующих принятым уровням нагрузки (плотности 3,75; 7,5; 14,6 тыс. квт/км²) и длине питающих кабелей, непосредственно присоединенных к подстанции 1,5 км, нанесены стрелки, представляющие удельные величины расчетных затрат и капитальных вложений, полученные на ЭЦВМ (П1 группа ва-

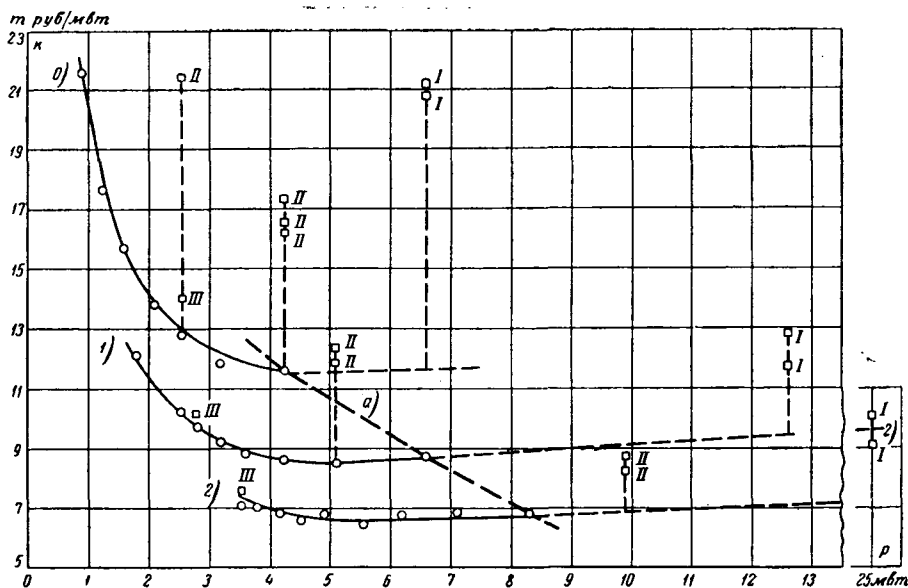


Рис. 1. Удельные капиталовложения по кабельным сетям 10 кв в зависимости от мощности пунктов питания при трех уровнях нагрузки (0, 1, 2). I — сеть с ЦРП; II — сеть с РТП; III — сеть с РТП; □ — точки, полученные из расчетов на ЭЦВМ; ○ — точки, полученные из конкретных проектов по всем вариантам сети при дальности передачи 1,5 км; а — граница области применения РТП.

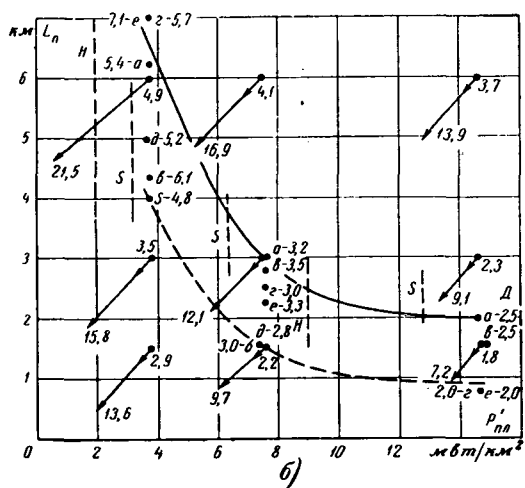
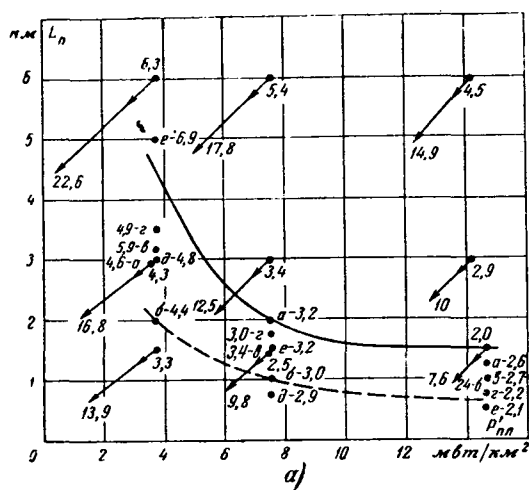


Рис. 2. Удельные показатели кабельных сетей 6—10 кВ в оязи с зависимостью экономической дальности передачи энергии от плотности нагрузки.

а — 6 кВ; б — 10 кВ.
У точек с буквами а, б, в... даны удельные расчетные затраты в тыс. руб/Мвт при равной стоимости глубоких вводов 35 (110) кВ по сравнению с вариантами непосредственного питания напряжением 6—10 кВ.

I — с ЦРП — в (е); II — с РП — б (д); III — с РТП — а (з).

У точек со стрелками даны удельные расчетные затраты и капиталовложения в тыс. руб/Мвт из расчетов на ЭЦВМ по варианту III с числом РТП, как и выше.

риантов — с РТП). Точно так же представлены и аналогичные данные при длине питающих кабелей 3 и 6 км.

Кроме того, для тех же плотностей нагрузки нанесены точки (а, б, в...), полученные из сравнительного исследования запроектированных вариантов сетей конкретного участка. Эти точки представляют показатели исполнений сетей, при которых присоединение питающих кабелей 6—10 кВ к районной подстанции энергосистемы равноценно устройству воздушных линий глубокого ввода 35—110 кВ. Тем самым для разных случаев даются предельные длины питания или экономические дальности передачи электроэнергии при указанных напряжениях.

Например, полные удельные расчетные затраты при экономическом дальностях передачи, т. е. при равноценности питающих сетей по вариантам непосредственного питания ЦРП 6 кВ и глубокого ввода с подстанцией 35/6 кВ, оказались равными по рис. 2, а (точка в):

для начального уровня	$3,2 + 2,7 = 5,9$ руб/квт
для промежуточного уровня	$1,9 + 1,5 = 3,4$ руб/квт
для перспективного уровня	$1,5 + 1,2 = 2,7$ руб/квт

Здесь первые слагаемые относятся к питающим сетям (в том числе и по питательным пунктам или подстанциям), а вторые — к распределительным. Отдельно первые слагаемые показаны ниже (на рис. 3) в точках пересечения линий затрат по питающим сетям при вариантах 6 и 35 кВ для начального уровня.

Как показано на рис. 2, а и б, каждый случай или сравниваемая пара вариантов характеризуется индивидуальной величиной предельной длины, отражающей ряд факторов, специфичных для этого случая и анализируемых в дальнейшем. Поэтому совокупность рассмотренных случаев должна быть представлена не однозначной кривой, а некоторой зоной, ограниченной предельными значениями.

График показывает, что в точках со стрелками, лежащих выше этой зоны, некоторые из полученных ранее оптимальных исполнений сети с питающими кабелями 10 кВ (а особенно 6 кВ) большой длины безусловно неэкономичны по сравнению с глубокими вводами. Последние предусматривали питание по воздушным линиям 35—110 кВ и устройство в городе подстанций с открытыми распределительными устройствами этих напряжений, пристроенными к ЦРП 6—10 кВ.

Предельные длины питающих кабелей 6—10 кВ по сравнению с воздушными линиями глубоких вводов 35—110 кВ зависят от величины напряжения и исполнений РУ районных подстанций системы, а также от способа присоединения к последней (непосредственно или с трансформацией напряжений).

Поскольку в проведенных исследованиях рассматривалась районная подстанция с трансформаторами 110/35/6 — 10 кВ, то удорожание воздушной линии и РУ при глубоком вводе 110 кВ сравнительно с 35 кВ уравнивается дополнительной трансформацией 110/35 кВ в последнем случае. Поэтому практически необходимо различать только изменения предельных длин кабелей при напряжениях 6 или 10 кВ, что и выполнено в табл. 4.

С другой стороны, необходимо учитывать весьма значительное влияние на экономическую дальность передачи стоимости пунктов питания или распределительных подстанций (ЦРП, РП, РТП), которая может сильно различаться в связи с мощностью и схемой питания последних. Поэтому в табл. 4 приведены для каждой плотности нагрузки по две предельные длины, из которых большая относится к упрощенной схеме питания и резервирования распределительной сети (РТП) или дорогостоящим подстанциям глубокого ввода, например, сооружаемым сразу на полную проектную мощность. Удорожание линий глубоких вводов при кабельном исполнении их еще более увеличит предельные длины.

Таблица 4

Предельные (экономические) дальности передачи или длины питающих кабелей 6—10 кВ по сравнению с воздушными линиями глубоких вводов 35—110 кВ

Напряжение, кВ	Длины, км, при плотности нагрузки, тыс. кВт/км		
	3,8	7,5	15
6	2—4,5	1—2,0	<1—1,5
10	4—6,5	1,5—3,0	1—2,0

Предельные значения из табл. 4 нанесены в виде кривых на рис. 2, а и б.

При меньших плотностях нагрузки экономические длины для глубоких вводов 35 кВ меньше, чем для 110 кВ, а при больших плотностях, наоборот, больше. Отсюда следует, что при учете дальнейшего роста нагрузок глубокие вводы 110 кВ почти всегда более выгодны, чем глубокие вводы 35 кВ. Этот вывод подтверждается и многочисленными конкретными проработками схем электроснабжения крупных городов, произведенными институтом Гипрокоммунэнерго в 1963—1964 гг.

Преимущества глубоких вводов 110 кВ особенно велики в том случае, когда такое решение позволяет установить на главной подстанции вместо трехобмоточных трансформаторов двухобмоточные напряжением 110/6—10 кВ.

Влияние упрощенной схемы с РТП сказывается большими длинами для точек а и г по сравнению с точками б и д для РП.

Влияние удороженной подстанции глубокого ввода с использованием на начальном уровне трансформаторов 15—20 Мва сказывается наибольшими длинами (для данного напряжения 35 или 110 кВ) в точках в и е по сравнению с другими точками.

Описанные графики могут быть использованы для анализа более сложных случаев, чем те, которые определяются данными табл. 4. Так, для сравнения вариантов питающей и распределительной кабельной сети 10 кВ и глубокого ввода ВЛ 35 кВ с распределительной подстанцией 35/6 кВ и кабельной сетью 6 кВ следует рассмотреть совместно графики, изображенные на рис. 2, а и б.

Из рис. 2, а видно, например, что при плотности нагрузки 3,8 Мвт/км² вариант 35/6 кВ становится равноценным с вариантом питания сети через РТП 6 кВ при предельной длине 3 км (точка а, расчетные затраты 4,6 руб/кВт) и через РП 6 кВ при предельной длине 2 км, точка б — 4,4 руб/кВт.

Между тем рис. 2, б показывает, что питание и распределение по сети 10 кВ через РТП при той же длине 3 км (стрелка — расчетные затраты 3,5 руб/кВт) и даже до 4 км — экономичнее соответствующего глубокого ввода.

Таким образом, вышеупомянутый вариант 35/6 кВ при сравнении с вариантом 10 кВ имеет большие расчетные затраты на

$$100 \frac{4,6 - 3,5}{3,5} = 31,5\%$$

На том же графике нанесены (пунктирными отрезками с обозначениями D, H, S [Л. 5—7]) пре-

дельные длины, рекомендуемые в зарубежной литературе.

Рассмотренные выше три уровня нагрузок — начальный (0), промежуточный (1) и перспективный (2) — позволили при их последовательном обеспечении уделить внимание поэтапному развитию сетей с учетом фактора времени.

Продолжительность этапов была принята: до промежуточного срока — 8 лет и до перспективного — 7 лет. Методика соответствующих технико-экономических расчетов описана в приложении.

Поскольку, как показано было выше, при выборе оптимального напряжения распределительной сети необходимо учитывать возможности устройства глубоких вводов, желательно прежде всего выяснить влияние фактора времени на экономичность последних.

Это может быть выполнено при использовании упомянутых выше и показанных на рис. 3 точек пересечения линий затрат при 6 и 35 кВ для начального этапа (уровня нагрузок). В этих точках не приходится учитывать фактор времени, тогда как на последующих этапах, при его учете, условия равноценности отличаются от вышеуказанных, ранее полученных для соответствующих уровней. Для иллюстрации на рис. 3 нанесены точки пересечения (непоказанных линий затрат) для промежуточного и перспективного этапов при нормативном сроке окупаемости 8 лет вместе с точками, полученными без учета фактора времени.

Изменения экономических дальностей передачи оказываются значительными: 2,25 км вместо 1,5 км и 1,5 км вместо 1 км, однако практически укладываются в пределы, приведенные в табл. 4, или зоны, показанные на рис. 2, а. В то же время изменения затрат незначительны (до 10%) и не повлияют на полученные ранее выводы, что объясняется весьма большой долей капиталовложений на начальном этапе.

При уменьшении срока окупаемости до 6 лет экономические дальности передачи почти те же, что и для 8 лет (рис. 3), хотя расчетные затраты, естественно, увеличиваются.

Изложенное выясняет достаточную устойчивость найденных экономических зон и их практическую независимость от возможных изменений нормативных сроков или коэффициентов.

Учет фактора времени приводит в очень многих случаях к пересмотру выводов о целесообразности проектных решениях, еще более существенных, чем в изложенных задачах.

Так, комплексное исследование оптимальных напряжений и мощностей пунктов питания распределительных сетей при их поэтапном развитии может показать значительные преимущества сооружения ЦРП (более крупных, чем обычные РП) с тем, чтобы питающая их сеть 6—20 кВ могла быть при некотором уровне нагрузок заменена глубоким вводом линии 110 кВ. После такого превращения ЦРП в трансформаторную подстанцию прежние питающие линии 6—20 кВ приобретут значение резервирующих или могут быть использованы в качестве распределительных.

Такое решение, очевидно, представит преимущества в тех случаях, когда обоснованно ожидается

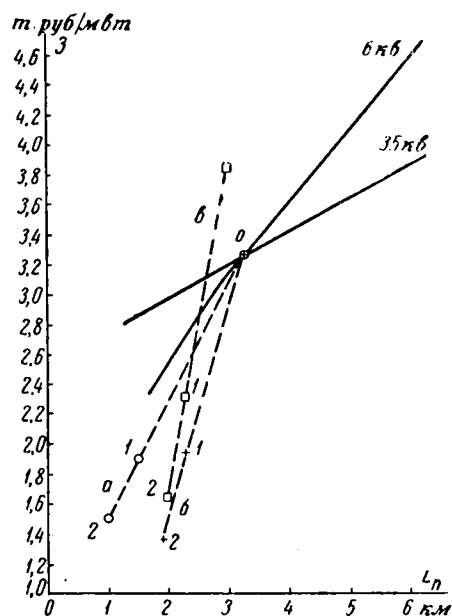


Рис. 3. Удельные расчетные затраты по кабельным сетям 6 кВ при трех уровнях нагрузки (0, 1, 2) и при соответствующих этапах развития (с учетом фактора времени) в зависимости от дальности передачи энергии. Пунктир соединяет точки пересечения кривых при разных условиях:

а — без учета фактора времени при $T_{ок}=8$ лет;
б — с учетом фактора времени при $T_{ок}=8$ лет;
в — с учетом фактора времени при $T_{ок}=6$ лет.

равномерный быстрый рост нагрузок. Если в противоположность этому подобный темп роста не предвидится, то более целесообразными могут оказаться, наоборот, разукрупненные РТП, отличающиеся меньшей удельной стоимостью, а главное — не требующие излишних затрат, связанных с неоправданными прогнозами.

Фактор времени и темпы развития играют первостепенную роль также в выборе повышенного напряжения между 10 и 20 кВ, поскольку первое из них повлечет за собой постепенный перевод существующего сетевого хозяйства города с 6 на 10 кВ, а второе может повлечь за собою нежелательную трансформацию 20/6 кВ.

Очевидно, необходимы дальнейшие технико-экономические исследования для развития способов поэтапного и динамического проектирования сетей с учетом фактора времени. При этом применение ЭЦВМ позволяет в большой степени приблизиться к конкретным условиям и избежать ряда нежелательных допущений, требующихся при аналитических исследованиях с помощью функциональных зависимостей [Л. 8, стр. 206, и Л. 9, стр. 163].

В то же время необходимы экспериментальные исследования и эксплуатационные наблюдения в связи с переводом существующих сетей на повышенные напряжения, особенно кабелей 6 кВ на 10 кВ. Хотя в описанном исследовании рассмотрены новые сети, однако еще больший экономический эффект может быть получен путем использования «внутренних ресурсов» существующих сетей при повышении их напряжения. В конкретных случаях

следует рассматривать при этом целесообразность предотвращения возможного снижения надежности электроснабжения как с помощью профилактики, так и усовершенствованием схем резервирования [Л. 2, стр. 6].

Выводы. Детальное технико-экономическое исследование городских сетей для новой жилищной застройки, оказавшееся возможным при использовании ЭЦВМ, показало значительную эффективность применения повышенных напряжений 10—20 кВ в воздушных сетях и 10 кВ в кабельных сетях. Так, в последнем случае для средних условий удорожание сети оказалось бы по расчетным затратам около 30% не только при непосредственном питании кабелями 6 кВ от районной подстанции энергосистемы, но даже и при глубоком вводе воздушными линиями 35 кВ с трансформацией на 6 кВ.

Большой экономический эффект может быть получен также от реконструкции существующих сетей путем перевода с 6 на 10 кВ, однако это требует для конкретных объектов эксплуатационных испытаний изоляции и технико-экономических расчетов по проектируемым вариантам. Последние необходимо производить с учетом перспективы роста нагрузок до 3—4-кратных.

Имеющиеся данные мировой практики развития сетей подтверждают недопустимость дальнейшего распространения напряжения 6 кВ как основного напряжения для распределения электроэнергии, и во избежание этого можно предложить (в порядке постановки вопросов) следующие мероприятия:

1. Внести в действующий ГОСТ 721-62 изменение, в котором признать напряжение 6 кВ не рекомендуемым, а допускаемым при определенных условиях (с заключением в скобки).

2. Разработать принципы материального поощрения персонала, осуществляющего перевод сетей с напряжения 6 на 10 кВ и последующую эксплуатацию реконструированных сетей.

3. Ускорить утверждение разрабатываемой инструкции по переводу сетей с 6 на 10 кВ, а также указаний по проектированию городских сетей напряжением выше 1000 В.

4. Рассмотреть возможности приспособления распределительных трансформаторов к переключению напряжения с 6 на 10 кВ или с 10 на 20 кВ после возрастания нагрузок.

5. Исследовать возможности удешевления кабелей 20 кВ по меньшей мере до одинаковой стоимости передачи единичной мощности по сравнению с 10 кВ.

6. Установить во избежание противоречий при проектных сравнениях вариантов справочные цены и сроки получения оборудования 20 кВ, исходя из ориентировочной потребности для всех отраслей электроснабжения (см. пп. 3 и 5 настоящих выводов).

Приложение. Расчеты, выполненные на ЭЦВМ, производились, исходя из усреднения данных, полученных по вариантам запроектированной конкретной конфигурации участка сетей.

Общее количество ТП оставалось во всех вариантах неизменно равным 96. Общая длина трасс распределительных

Таблица 5

Коэффициенты	Районы ЕВС СССР						
	Центральный, Северо-Западный, Средне-Волжский, Уральский и Южный				Средняя Азия, Северный Казахстан и Центральная Сибирь		
	Уровень	0	1	2	0	1	2
$k_{ст}$, руб/квт		82	72	62	82	72	62
$k_{с}$, руб/квт		20	20	25	33	28	25
$k_{т.т}$, руб/т у.т.		27	27	28	16	13	12
$b_{с}$, т/квт·ч		$425 \cdot 10^{-6}$	$310 \cdot 10^{-6}$	$300 \cdot 10^{-6}$	$425 \cdot 10^{-6}$	$310 \cdot 10^{-6}$	$300 \cdot 10^{-6}$
$\beta_{ст}$, руб/квт·ч		$5,5 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
$\beta_{с}$, руб/квт·ч		$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$

$k_{ст}$ —удельные капиталовложения на строительство электростанций;
 $k_{с}$ —удельные капиталовложения на строительство сетей;
 $k_{т.т}$ —удельные капиталовложения в топливную базу и транспорт топлива;
 $b_{с}$ —удельный расход топлива в энергосистеме;
 $\beta_{ст}$ —средняя в энергосистеме себестоимость энергии, опущенной с шин новых конденсационных электростанций;
 $\beta_{с}$ —средняя себестоимость передачи энергии в энергосистеме по электрическим сетям 220 кв и более высокого напряжения.

магистралей—29 км. Число пунктов питания сети (РТП) варьировалось от 3 до 22, причем к каждому предусматривалось присоединение до четырех магистралей.

Для каждой из изменяемых величин параметров—напряжения, уровня нагрузки, расстояния от районной подстанции и числа РТП—печатались выходные данные ЭЦВМ о технических и стоимостных показателях каждого варианта.

Исходные данные и единичные стоимости кабелей и воздушных линий приняты по проектным материалам. Стоимость ТП в показателях не учитывалась, удорожание РТП против ТП принято для 6—10 кв—3 тыс. руб., для 20 кв—4 тыс. руб.

Стоимость РП 6—10 кв принята 18,5 тыс. руб.; ЦРП 6—10 кв—35 тыс. руб.

Стоимость в тысячах рублей ячеек РУ и трансформаторной мощности на районных подстанциях при 6—10 кв— $2n+2,2P$, при 20 кв— $2,5n+2,2P$, где n —число ячеек, а P в мегаваттах.

В основе расчетов принята методика технико-экономических расчетов, составленная в Гипрокоммунэнерго Я. М. Червоненкисом при участии автора с использованием работ ТЭП и Горьковского отделения Электропроекта применительно к условиям электроснабжения городов.

Основным экономическим показателем считаются расчетные затраты, определенные по формуле

$$Z = p_{\Sigma} K + Z_W,$$

где процентные отчисления p_{Σ} включают амортизацию, расходы на эксплуатацию и коэффициент эффективности капиталовложений (12,5%), принятые в сумме равными: для кабельной сети 6—10 кв—17,5% и 20 кв—18,6%, а для оборудования РТП и др.—22,8%.

Расчетные затраты по годовым потерям мощности и энергии определяются по формуле

$$Z_W = (A + B\tau) \delta \Delta P,$$

где ΔP —максимальные потери мощности, квт; δ —коэффициент, учитывающий звено электрической сети, в которой определяются потери.

В этом выражении одно из слагаемых обусловлено расширением электростанций и сетей 220—500 кв для компенсации потерь мощности:

$$A = p_n k_m k_p k_{с.н} (k_{ст} + k_{с}),$$

где k —коэффициент участия в максимуме системы, равный 1;

k_p —коэффициент резерва, равный 1;

$k_{с.н}$ —коэффициент собственных нужд, равный 1,07.

Второе слагаемое учитывает расширение топливной базы и себестоимостью выработки энергии и передачи ее по сетям 220—500 кв энергосистемы:

$$B = p_n k_{т.т} b_{с} + \beta_{ст} + \beta_{с}.$$

Некоторые из приведенных коэффициентов зависят от энергосистемы и расчетного уровня. Значения их для различных районов ЕВС СССР даны в табл. 5, составленной по данным ТЭП.

По этим значениям подсчитаны и приведены на рис. 4 соответствующие величины суммы $(A + B\tau)$ в зависимости от числа часов потерь τ . Описанные в статье расчеты произведены для кабельных сетей, исходя из 18 руб/квт·год при учете условий сибирских городов, а для воздушных сетей также исходя из 26,5 руб/квт·год, что однако, незначительно повлияло на результаты по расчетным затратам.

Для выяснения влияния величины нормативного срока окупаемости или коэффициента эффективности вышеприведенное выражение расчетных затрат представлено так:

$$Z = (p_n + p_a + p_o) K + \delta \Delta P [p_n k_m k_p k_{с.н} (k_{ст} + k_{с}) + \tau (p_n k_{т.т} b_{с} + \beta_{ст} + \beta_{с})] = p_n [K_n + 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,7 \delta \Delta P (k_{ст} + k_{с}) + \tau \delta \Delta P k_{т.т} b_{с}] + [K (p_a + p_o) + \delta \Delta P \tau (\beta_{ст} + \beta_{с})].$$

Например, для варианта 6 кв при плотности нагрузки 3,75 Мвт/км² и расстоянии ЦРП от районной подстанции 1,5 км в случае $T_{ок} = 8(6)$ лет или $p_n = 0,125$ (0,167) полу-

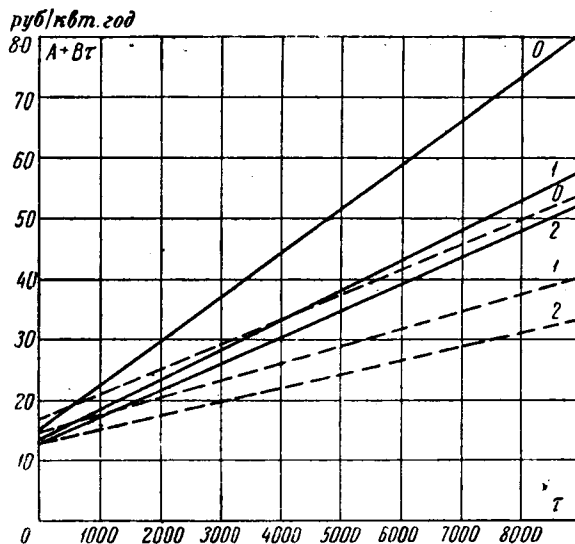


Рис. 4. График стоимости (расчетных затрат) киловатт-года потерь в зависимости от числа часов потерь.
— Центральный, Северо-Западный, Средне-Волжский, Уральский и Южный районы; — — — Средняя Азия, Северный Казахстан и Центральная Сибирь.

чено: $Z = 87,4 p_n + 5,1$ тыс. руб. $\approx 16(20)$ тыс. руб. при значениях $K = 68,7$ тыс. руб.; $\Delta P = 145,5$ квт; $k_{с.т.} = 62$ руб/квт; $k_c = 25$ руб/квт; $k_{т.т.} = 12$ руб/м.у. т.; $b_c = 300 \cdot 10^{-6}$ т/квт.ч; $\beta_{с.т.} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ руб/квт.ч; $\beta_c = 0,3 \cdot 10^{-3}$ руб/квт.ч; $\delta = 1,15$; $\tau = 2500$ ч; $(p_a + p_o)_{каб} = 0,05$; $(p_a + p_o)_{обор} = 0,103$.

Для построения графиков, изображенных на рис. 4, полученные полные значения расчетных затрат преобразованы в удельные значения (путем деления на $R_{вт}$) с добавлением аналогичных по районной подстанции:

$$z \approx \frac{16(20)}{12,7} + 0,95(1,05) = 2,2(2,65).$$

Как видно из вышеприведенных выражений, капиталовложения K не содержат составляющих (связанных с потерями мощности) по электростанциям и смежным объектам. Они учитываются в расчетных затратах по потерям Z_w , как это принято и в некоторых других работах [Л. 8, стр. 19]. Благодаря этому расчетная величина капиталовложений соответствует сметной стоимости данного объекта.

Учет фактора времени при технико-экономических расчетах основан на следующих положениях:

1. В качестве расчетного срока, к которому приводятся все затраты, принимается год начала капиталовложений [Л. 8, стр. 31], обозначаемый индексом 0. Приведенные капиталовложения определяются по формуле

$$K' = K_0 + \frac{K_1}{1 + p_n} + \frac{K_2}{(1 + p_n)^2} + \dots + \frac{K_t}{(1 + p_n)^t}.$$

2. Годовые отчисления приводятся по аналогичной формуле, причем каждый элемент капиталовложений предварительно умножается на соответствующее значение суммарного коэффициента p_x .

3. Приведенная стоимость годовых потерь (расчетные затраты) определяется по формуле

$$Z'_w = Z_{w0} + \frac{\Delta Z_{w1}}{1 + p_n} + \frac{\Delta Z_{w2}}{(1 + p_n)^2} + \dots + \frac{\Delta Z_{wt}}{(1 + p_n)^t},$$

где прирост

$$\Delta Z_{wt} = Z_{wt} - Z_{w(t-1)}.$$

В каждом слагаемом формулы учитываются составляющие, обусловленные компенсацией потерь мощности, а также себестоимостью выработки и передачи электроэнергии.

Литература

1. Фингер Л. М., Повышение напряжения в городских электрических сетях, «Электричество», 1963, № 11.
2. Погарский В. И., Федосенко Р. Я., Волков М. И. и Погарская И. В., Некоторые вопросы эксплуатации кабельных сетей, БТИ ОРГРЭС, 1964.
3. Bach G., Реконструкция и развитие электрических сетей г. Берлина (ГДР), «Energietechnik», 1964, № 7.
4. Hillig W., Схемы соединений упрощенных подстанций 110 кв, там же.
5. Drobisch M., Построение сетей среднего и низкого напряжения, там же.
6. Smith J., Экономичность напряжений 4,16—34,5 кв, «Энергетические системы и электротехническое оборудование» (Power Appar. and Systems), 1961, № 56.
7. Naager K., Ступени напряжения в теории и на практике, «Elektrizitätswirtschaft», 1960, № 16.
8. Дале В. А., Кришан З. П. и Пэгле О. Г., Оптимизация электрических сетей при росте нагрузок, изд. АН Латв. ССР, Рига, 1964.
9. Бессмертный И. С., Схемы городских электрических сетей, изд. МКХ РСФСР, 1963.

[23.4.1965]



УДК 621.316.57:001.12:001.4

Современные проблемы проектирования и испытания высоковольтных выключателей

Доктор техн. наук, проф. Г. В. БУТКЕВИЧ и кандидат техн. наук Н. М. ЧЕРНЫШЕВ

Москва

Введение. За последние годы в связи с развитием электрических сетей к высоковольтным выключателям стали предъявляться все более жесткие требования. С одной стороны, это продиктовано растущими параметрами сетей, такими как рабочее напряжение, длительный рабочий ток, мощность короткого замыкания, собственная скорость восстановления напряжения, допустимая длительность короткого замыкания, а с другой—неудовлетворительной работой выключателя, например: отключение малых индуктивных и емкостных токов, ликвидация неудаленных коротких замыканий на линиях, размыкание систем в режиме противофазы и пр.

Большинство из перечисленных режимов работы и требований к выключателям было известно и ранее. Однако детальное изучение эксплуатационных режимов работы выключателей высокого напряжения и их характеристик привлекает в по-

следнее время все большее и большее внимание специалистов.

Необходимо отметить, что значительно изменился и характер самих сетей. Имеет место возникновение в сетях мощных трансформаторных узлов, дающих высокие скорости восстановления напряжения при больших мощностях коротких замыканий. Все эти вопросы стали в настоящее время весьма актуальными. Кроме того, в высоковольтных сетях весьма реальны и довольно часты случаи коротких замыканий в небольшом удалении за выключателями (1÷5 км), которые характерны высокими частотами и начальными скоростями восстановления напряжения на выключателе. Появление все большего числа межсистемных связей требует от выключателей высокого напряжения (обычно выше 110 кв) отключения токов в условиях противофазы. Условия укрупнения систем и появления новых связей между ними повышают

требования к выключателям в отношении их быстродействия и АПВ.

Весьма серьезные требования предъявляются за последние годы к высоковольтным выключателям в отношении уровней длительных номинальных токов. Эти требования усложняют решения вопросов быстродействия и отключающей способности. Так, например, номинальный длительный ток сверхвысоковольтных выключателей на напряжение 750 кВ должен достигать 4000 А, а генераторных выключателей на напряжение 20 кВ — около 25000 А. При таком токе необходимо внедрение форсированного водяного охлаждения контактов и шин.

Рост мощностей короткого замыкания до таких величин, как 50000 МВА при 750 кВ, 25000 МВА при 220 кВ, 10000 МВА при 110 кВ, 5000 МВА при 15–20 кВ, создает весьма серьезные проблемы в отношении испытания таких выключателей в лабораториях и эксплуатации. Поэтому весьма важное значение приобретает правильный подход к выбору конструктивных решений с тем, чтобы имелась возможность испытаний единичных разрывов с последующим распространением полученных результатов испытания на весь выключатель (на все разрывы). Имеет также большое значение правильная оценка режимов испытаний выключателей или их разрывов в отношении величин и форм восстанавливающихся напряжений с учетом всей совокупности возможных условий работы выключателя в эксплуатации.

Номинальные параметры высоковольтных выключателей. Номинальное напряжение. С ростом мощностей, передаваемых по линиям электропередач и расстояний, на которые должна передаваться энергия, появляется требование дальнейшего роста номинального рабочего напряжения. Еще не так давно наивысшим номинальным рабочим напряжением сетей было 220 кВ. За последние годы в нашей стране были освоены ЛЭП на напряжения 330 и 500 кВ. В настоящее время строится линия на 750 кВ. Эти новые классы напряжений потребовали создания и соответствующих мощных выключателей с многократным разрывом.

Появление выключателей на такие высокие рабочие напряжения, естественно, ставит вопрос о равномерности распределения напряжения между разрывами выключателя как в статическом состоянии (разомкнутый выключатель), так и в динамическом (процесс отключения и переходный режим восстановления напряжения на выключателе).

Необходимо отметить, что применение многократного разрыва и использования разумной системы деления напряжения между разрывами позволит создать выключатель на любое рабочее напряжение с надлежащими характеристиками. Здесь, по-видимому, не могут возникать какие-либо принципиальные затруднения.

Номинальный рабочий ток. Требование повышения рабочих токов при высоких напряжениях (500–750 кВ) до 4000 А создает серьезные затруднения в получении единичного разрыва. Переход на существенно большие номинальные токи в клас-

се сверхвысоких напряжений не позволяет применить серийный единичный разрыв выключателей 110–220 кВ для дугогасительной камеры выключателей 500–750 кВ. Это нарушает принцип универсальности элементов выключателей для всех классов напряжений. В связи с этим необходимо поставить вопрос о возможности сохранения единого серийного разрыва для выключателей всех классов напряжений (110–750 кВ), добиваясь повышения рабочего тока методом шунтирования разрывов так же, как это делается, например, в классах более низких напряжений.

Применение форсированного водяного охлаждения на выключателях высокого напряжения (выше 110 кВ) вряд ли может быть признано рациональным.

В классе генераторного напряжения при применении выключателей на сверхвысокие рабочие токи (20000–25000 А) наиболее рациональной следует считать систему водяного охлаждения, так как в противном случае объем и вес контактных узлов получился бы недопустимо большим. Это влечет за собой увеличение весов механизмов и привода и габаритов всего аппарата в целом. Применение водяного охлаждения в генераторных выключателях, по-видимому, окажется рациональным, начиная с токов 10000 А и выше при напряжениях 10, 15, 20 и 35 кВ.

Мощность отключения. При заданном классе напряжения мощность отключения находится в прямой зависимости от отключаемого тока. В существующем и действующем в СССР ГОСТ 687-41 на выключатели высокого напряжения допускается вычислять ток отключения выключателя с учетом постоянной составляющей по формуле

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_c^2},$$

где I_c — действующее значение симметричного тока короткого замыкания;

I_a — постоянная составляющая тока в момент расхождения контактов выключателя.

За счет постоянной составляющей общее действующее значение тока отключения может увеличиться на 40–50% по сравнению с действующим значением симметричного тока. Таким образом, возникает вопрос о правомочности применения формулы полного тока для определения мощности отключения выключателя, полагая, что мощность отключения $P = \sqrt{3} UI \cdot 10^{-6}$ МВА может определяться при полном токе любой асимметрии, в том числе и при чисто симметричном токе, т. е. в тех случаях, когда постоянная составляющая к моменту расхождения контактов практически уже отсутствует (затухает). Эквивалентны ли по своему действию эти токи? Применительно к дуги они уже не эквивалентны по своему тепловому действию, потому что дуговой канал не имеет постоянного сопротивления¹. Если же учесть, что при этом возникают еще и другие вопросы, имеющие боль-

¹ Применительно к нелинейным дуговым процессам понятие действующее значение как среднеквадратичное, очевидно, теряет свой смысл.

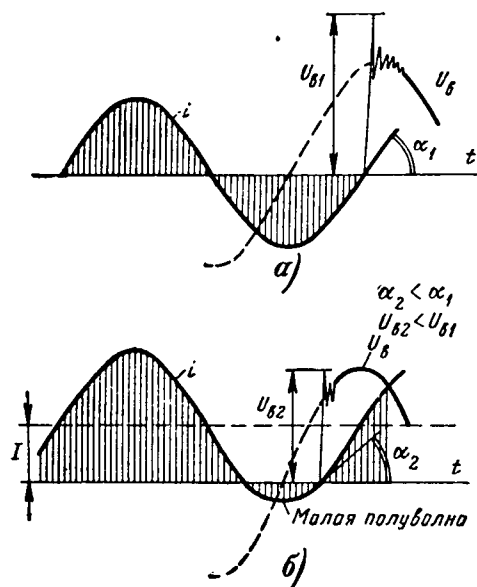


Рис. 1. Влияние постоянной составляющей тока на условия гашения дуги.

а — чисто симметричный ток короткого замыкания; б — тот же симметричный ток, но с наложением постоянной составляющей.

шее значение с точки зрения гашения дуги, как, например, различные скорости спадания тока до нуля (углы α) (рис. 1), то неэквивалентность действующих значений асимметричного и симметричного токов, равных по величине, становится совершенно очевидной. Известно, что постоянная составляющая, накладываемая на симметричный процесс в токе, в ряде случаев не только не затрудняет процесс гашения дуги, а наоборот, его облегчает, поскольку, с одной стороны, снижается скорость спадания тока до нуля и величина и скорость восстанавливающегося напряжения, а с другой — при постоянной составляющей в токе возникает малая полуволна, после которой обрыв дуги может быть значительно облегчен (рис. 1).

Поэтому в новой редакции ГОСТ на выключатели решено отказаться от определения отключающей способности выключателя по полному току, а оценивать ее только по симметричному току. Однако при этом требуется, чтобы выключатель был способен отключать ток при наличии в нем постоянной составляющей. Величина допустимой асимметрии тока может быть определена по кривой МЭК, устанавливающей значение постоянной составляющей в функции времени, прошедшего от начала короткого замыкания до начала размыкания контактов.

Требования в отношении скоростей восстанавливающегося напряжения. Возрастание мощностей короткого замыкания в сетях приводит к повышению скоростей восстанавливающегося напряжения на контактах выключателей, которое оказывается особенно значительным вследствие того, что развитие современных энергетических систем идет по пути резкого увеличения номинальных мощностей генераторов и трансформаторов.

Известно, что при колебательном процессе частота восстанавливающегося напряжения опреде-

ляется произведением индуктивности короткого замыкания на емкость, шунтирующую испытуемый выключатель, и находится в обратной зависимости от этих величин. Если индуктивность однозначно определяется частным от деления номинального напряжения на ток короткого замыкания, то величина емкости зависит от конфигурации сети, количества и параметров подключенных трансформаторов. Наиболее высокие частоты восстанавливающегося напряжения имеют место при отключении короткого замыкания непосредственно за трансформаторами, когда емкость, шунтирующая выключатель, равна суммарной емкости самого трансформатора и подводящих проводов. Поскольку емкость одного трансформатора всегда меньше суммарной емкости нескольких параллельно включенных трансформаторов той же общей мощности, то внедрение трансформаторов мощностью 270 Мва и выше привело к появлению чрезвычайно высоких частот восстанавливающегося напряжений. Так, например, измерения показали, что выключатель, установленный на стороне обмотки напряжением 110 кВ автотрансформатора 350 Мва, должен быть в состоянии отключить мощность порядка 3500 Мва при частоте восстанавливающегося напряжения около 25 кГц.

Таким образом, к выключателям, предназначенным для работы в цепях мощных трансформаторов, должны быть предъявлены требования в отношении обеспечения высокой отключающей способности при высокой частоте восстанавливающегося напряжения. Это требование особенно важно, если учесть, что мощность трансформаторов в единицу продолжает расти.

Общее количество выключателей, требующихся для работы в таком режиме, относительно невелико, и здесь, очевидно, речь должна идти о специальных конструкциях, разрабатываемых в соответствии с техническими условиями.

Однако развитие энергосистем значительно повысило требование в отношении скорости восстановления напряжения не только к трансформаторным выключателям, но и к выключателям, установленным в ряде других точек сети и, в первую очередь, в точках с высокими мощностями коротких замыканий, причем эти требования носят не только количественный, но и качественный характер.

Качественное отличие процесса восстановления напряжения в точках с высокой мощностью короткого замыкания в современных сетях заключается в характере кривой восстанавливающегося напряжения: из колебательной она превратилась в апериодическую.

Для того чтобы выяснить причину этого изменения, рассмотрим, при каких условиях линия с точки зрения влияния ее на процесс восстановления напряжения на контактах выключателя может рассматриваться как сосредоточенная емкость и при каких — как цепь с распределенными элементами.

Допустим, что в данной точке сети имеет место колебательный процесс восстановления напряжения с некоторой частотой. Представим себе, что

к этой точке затем была присоединена линия. Легко видеть, что если время пробега волны по линии от начала до конца и обратно во много раз (скажем, на порядок) меньше времени, в течение которого восстанавливающееся напряжение достигает максимальной величины, то такая линия может рассматриваться как сосредоточенная емкость.

В противном случае она должна рассматриваться как линия (как цепь) с распределенными постоянными. Таким образом, начиная с некоторой длины, линия должна рассматриваться как цепь с распределенными постоянными. Эта длина растет по мере снижения частоты восстанавливающегося напряжения, т. е. при прочих равных условиях по мере увеличения индуктивности короткого замыкания цепи. Следовательно, с увеличением мощности короткого замыкания все более короткие линии проявляют себя как цепи с распределенными постоянными.

Например, при мощностях отключения 6 000—10 000 Мва и напряжении 110 кВ линии длиной 10—15 км считаются «длинными». Известно, что длинная линия до прихода отраженной волны действует как активное сопротивление и в комбинации с индуктивностью образует апериодический контур.

Процесс восстановления напряжения в реальных сетях напряжением 110 кВ при мощностях отключения 4 000 Мва и выше (особенно в начальной части) носит апериодический характер.

То обстоятельство, что при апериодическом восстанавливаемомся напряжении скорость нарастания в начальной части кривой существенно выше, чем при колебательном, может значительно затруднить условия работы выключателей. Это, в первую очередь, относится к воздушным выключателям, у которых электрическая прочность после погасания дуги вначале растет относительно медленно.

Различие в воздействии на выключатель апериодической и колебательной кривых восстанавливающегося напряжений настолько значительно, что представляется целесообразным испытывать выключатель на номинальную мощность отключения при апериодическом процессе восстановления напряжения, а на отключение 60% от номинальной мощности — при колебательном процессе.

Требования в отношении неудаленных коротких замыканий. Увеличение токов короткого замыкания в сетях сказалось не только на повышении скоростей восстанавливающегося напряжения за счет снижения индуктивности цепи. Резкое ухудшение условий отключения выключателями коротких замыканий произошло также и за счет того, что начал проявляться эффект «неудаленных коротких замыканий». Сущность этого эффекта заключается в следующем.

Если короткое замыкание произошло не непосредственно за выключателем В (рис. 2, а), а на некотором удалении l , то на участке линии mn в момент перехода тока через нуль произойдет падение напряжения

$$\Delta U = I\omega L' l \sqrt{2},$$

где I — действующее значение тока короткого замыкания;

L' — индуктивность линии на единицу длины.

Это падение напряжения распределяется вдоль линии равномерно.

Если далее в этот момент времени погаснет дуга в выключателе В, то на отключенном участке линии начнется волновой процесс выравнивания напряжения. Как известно, частота этого процесса равна:

$$f_0 = \frac{v}{4l},$$

где v — скорость распространения электромагнитной волны, равная для воздуха приблизительно 300 000 км/сек.

Пренебрегая активными потерями, кривую напряжения между точкой m и землей можно представить в виде, показанном на рис. 2, в.

Легко видеть, что скорость изменения напряжения в точке m равна:

$$\left| \frac{dU}{dt} \right|_m = \left| \frac{I\omega L' l \sqrt{2}}{l/v} \right| = I\omega L' v \sqrt{2}.$$

Принимая во внимание, что

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} = \frac{1}{L'} \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \frac{Z}{L'},$$

где C' — емкость линии на единицу длины;

Z — волновое сопротивление линии, записываем:

$$\left| \frac{dU}{dt} \right|_m = I\omega Z \sqrt{2}.$$

Принимая для воздушной линии $Z \approx 500$ ом, получаем:

$$\left| \frac{dU}{dt} \right|_m \approx I \cdot 314 \cdot 500 \sqrt{2} \cdot 10^{-6} \approx 0,2 I \text{ кВ/мксек.}$$

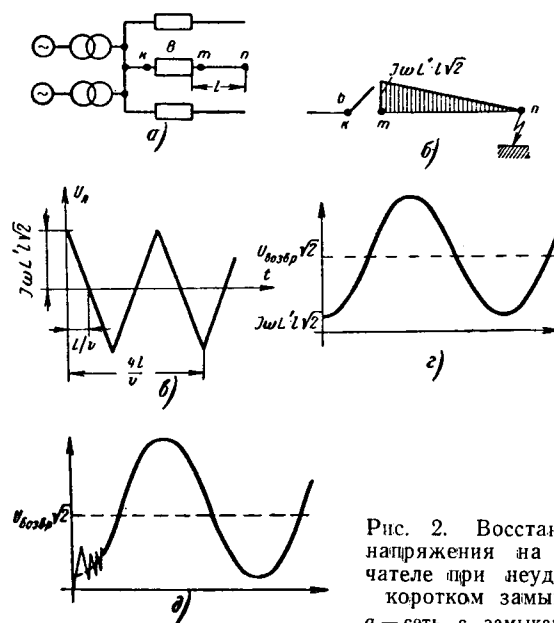


Рис. 2. Восстановление напряжения на выключателе при неудаленном коротком замыкании.

а — сеть с замыканием на линии в точке k ; б — распределение падения напряжения вдоль линии при токе короткого замыкания I ; в — процесс колебания напряжения в точке m после отключения выключателя; г — изменение напряжения на выключателе в точке k (со стороны питания); д — изменение напряжения на зажимах выключателя после прохождения тока через нуль.

Таким образом, скорость изменения напряжения в начале отключаемой поврежденной линии зависит только от величины тока.

Восстанавливающееся напряжение на выключателе В равно разности потенциалов точек m и k . Потенциал точки k изменяется от начального значения $I_{\omega} L' l \sqrt{2}$ до установившегося значения $U_{\text{возвр}} \sqrt{2}$ (рис. 2,з).

На рис. 2,д показана кривая восстанавливающегося напряжения (с учетом затухания) на выключателе, отключающем неудаленное короткое замыкание.

Амплитуда первого пика восстанавливающегося напряжения, если пренебречь затуханием, будет равна:

$$U_1 = I_{\omega} L' l \sqrt{2} \cdot 2 = \frac{2,82 U_{\phi}}{x_c + x_l} x_l = \frac{2,82 U_{\phi}}{1 + \frac{x_c}{x_l}},$$

где U_{ϕ} — фазовое напряжение системы, от которой отключается линия;

x_c — реактанс короткого замыкания этой системы;

x_l — реактанс отключаемой линии.

Легко видеть, что с ростом длины отключаемой линии (длина отсчитывается до места короткого замыкания) снижаются отключаемый ток и начальная скорость восстанавливающегося напряжения, равная $0,2 I_{\text{откл}}$, но растет первый пик восстанавливающегося напряжения. Вследствие такого неоднозначного влияния длины отключаемой линии на условия работы выключателя оказывается, что по мере удаления места короткого замыкания от выключателя вначале утяжеляются условия отключения короткого замыкания, а затем облегчаются. Таким образом, для каждого типа выключателя существует критическая зона коротких замыканий на линии, в которой отключение представляет наибольшие трудности.

Для воздушных выключателей на 110 кВ наибольшие трудности представляет отключение коротких замыканий на расстоянии 1—3 км.

Для облегчения условий работы дугогасительных разрывов при отключении неудаленного короткого замыкания существуют два пути: увеличение числа разрывов и применение низкоомных шунтирующих сопротивлений.

Поскольку отрезок линии, на котором происходят колебания напряжения, может рассматриваться как источник с внутренним сопротивлением, равным волновому сопротивлению линии, шунтирующее сопротивление выключателя должно быть достаточно низким (порядка сотен, а иногда десятков ом).

Требования в отношении отключения токов в режиме противофазы. При эксплуатации энергосистем возникает потребность в выключателях, выполняющих функции размыкания и замыкания двух систем или двух частей системы, имеющих раздельные источники питания. При таких коммутациях возможны отключения процессов особого вида, возникающих при условии, когда эти системы (или части системы) разойдутся по фазе. Если не приняты специальные меры защиты, то можно

считать вероятным такое положение, когда выключатель, разрывающий связь двух систем, будет отключать ток в полной противофазе, т. е. когда векторы напряжений этих систем разойдутся на 180° . В этом случае ток в цепи будет определяться суммарным напряжением систем и суммарным их реактивным сопротивлением.

Теоретически в режиме противофазы первая отключающая фаза выключателя в трехфазном режиме может воспринимать возвращающееся напряжение до $3 U_{\phi}$ при незаземленных нейтралях и $2,6 U_{\phi}$ при эффективно заземленных нейтралях систем. Эти коэффициенты получаются путем механического удвоения величин возвращающихся напряжений для первой отключающей фазы в трехфазной системе, т. е.

$$2 \times 1,5 U_{\phi} = 3 U_{\phi} \text{ и } 2 \times 1,3 U_{\phi} = 2,6 U_{\phi}.$$

Расчеты, проведенные для 10 итальянских систем при напряжениях 130 и 220 кВ, охватывающих 335 станций и имеющих эффективное заземление нейтралей, показали, что в 95% всех рассмотренных случаев ожидаемое напряжение в противофазе равно или ниже $2,5 U_{\phi}$.

Однако в реальных условиях эксплуатации возникновение таких случаев, когда при заземленных нейтралях систем возвращающееся напряжение на первой отключающей фазе достигает $2,5 U_{\phi}$, весьма редко при условии, что для этого требуется совпадение ряда обстоятельств, как-то:

а) отключение в противофазе с расхождением векторов напряжений на угол, близкий к 180° , что представляет собой явление весьма редкое;

б) отношение реактансов нулевой и прямой последовательностей должно иметь максимально допустимое значение.

По-видимому, было бы правильным принимать в качестве испытательного напряжения на фазу выключателя величину не более $2 U_{\phi}$. Этот вопрос, однако, требует более детального специального рассмотрения реальных эксплуатируемых и проектируемых систем.

Второй вопрос, возникающий при рассмотрении требований к выключателю при его работе в режиме противофазы, — какой должна быть принята при испытаниях величина тока по отношению к номинальному отключаемому току?

В условиях эксплуатации реальных систем и их совместной работы всегда могут возникать такие режимы, когда один и тот же выключатель, установленный на связи между системами, должен отключать и суммарную мощность короткого замыкания двух систем, и быть готовым к отключению токов в режиме противофазы. Например, каждый из четырех выключателей B_1, B_2, B_3 и B_4 на рис. 3,а должен соответствовать по своим характеристикам и тому, и другому режимам. Две системы связаны в рассматриваемом примере двумя линиями. В случае, изображенном на рис. 3,б, короткое замыкание происходит за выключателем B_3 , который при отключенном выключателе B_4 отключает суммарную мощность короткого замыкания двух систем. На рис. 3,в показано, как тот же выключатель может работать в режиме противофазы

(при замкнутом B_4). Если выключатель B_3 выбран по току отключения I , исходя из суммарной мощности короткого замыкания при номинальном возвращающемся напряжении $1,3U_{\phi}$ (при эффективно заземленных нейтралях), то теоретически при равенстве реактивных сопротивлений систем ($x_1 = x_2$) ток в режиме противофазы для этого же выключателя должен быть равен 50% от I , так как напряжение возрастает в 2 раза, а реактивное сопротивление в 4 раза по сравнению с теми, которые имеют место в режиме короткого замыкания двух систем (рис. 3, б). Эти соотношения представляют, однако, только теоретический интерес, так как вероятность их возникновения очень мала. Здесь должно иметь место сочетание нескольких явлений, вероятность появления каждого из которых невелика (полная противофаза, равенство реактансов и пр.).

В Международной электротехнической комиссии (МЭК) была высказана большинством национальных комитетов точка зрения, что при испытании выключателя ток в режиме противофазы следует принимать равным не более 25% от номинального отключаемого тока выключателя.

В Советском Союзе практикой эксплуатации выключателей на напряжение 220 кВ и выше предусмотрено их испытание при токах 25% от номинального отключаемого и при возвращающемся напряжении порядка двух фазовых. Случаи отключения в режиме противофазы могут представлять собой при развитии энергосистем и сетей все более реальное явление для рабочих напряжений выше 110 кВ.

Международная практика в этих вопросах разнообразна. Например, в Швейцарии, Франции и Швеции практиковались испытания при двойных напряжениях и токах порядка 25% при номинального тока отключения. В США таких испытаний не проводилось, и в новый стандарт США эти требования также не вошли.

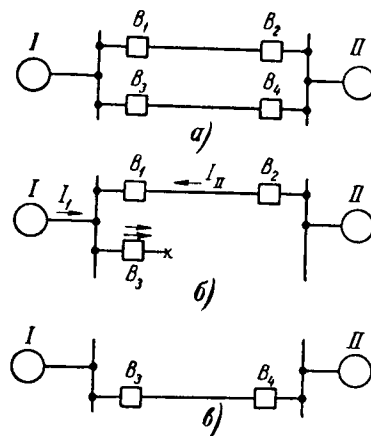
По-видимому, в СССР все же следует нормировать испытания выключателей на 220 кВ и выше в режиме противофазы. Возвращающееся напряжение на выключателе при этом следует ограничить двойной величиной от фазового и ток короткого замыкания 25% от номинального. Необходимо также решить вопрос, должны ли эти требования распространяться на все выпускаемые выключатели 220 кВ и выше или только на какую-то часть. Все эти вопросы требуют срочного рассмотрения и изучения.

Требования в отношении отключения малых индуктивных токов и зарядных токов воздушных линий. Эти два условия накладывают на высоковольтный выключатель до некоторой степени противоречивые требования.

Известно, например, что наиболее радикальной мерой борьбы с перенапряжениями, возникающими при отключении холостых линий, является построение выключателя с такой дугогасительной камерой, в которой не возникает повторных зажигания при отключении зарядного тока ненагруженной линии. При этих условиях на отключаемой линии напряжение достигает величины не более ам-

Рис. 3. Возможные режимы работы выключателей на линиях связи систем.

а — две системы I и II связаны между собой двумя линиями; б — выключатель B_3 отключает суммарную мощность обеих систем; в — одна линия разомкнута, выключатель B_3 может работать в режиме противофазы.



плитуды фазового, а на выключателе — не более двойной величины от фазового (рис. 4). Величина напряжения до уровня двойного фазового ($2U_{\phi.м}$) нарастает на выключателе с вполне определенной скоростью. Мировая практика показывает, что возможна конструкция выключателей с дугогасительной камерой, в которой не возникает повторных зажиганий при отключении емкостных токов холостых линий. Этому чрезвычайно способствует увеличение числа разрывов выключателя. При этом скорость нарастания прочности промежуток камеры выше, чем скорость нарастания напряжения, так как при n разрывах скорость нарастания прочности при расхождении контактов будет примерно в n раз выше, чем номинальная прочность одного промежутка (при условии равномерного распределения напряжения). Для многоразрывных выключателей важно, чтобы контакты всех разрывов расходились одновременно. Неодновременность размыкания контактов может явиться причиной повторных пробоев и, как следствие, перенапряжений в линиях. Таким образом, для обеспечения отсутствия повторных зажиганий дуги должны быть приняты меры для достаточно быстрого нарастания минимальной «холодной прочности» дугогасительной камеры выключателя.

Термин «холодная прочность» здесь введен в отличие от прочности промежутка, устанавли-

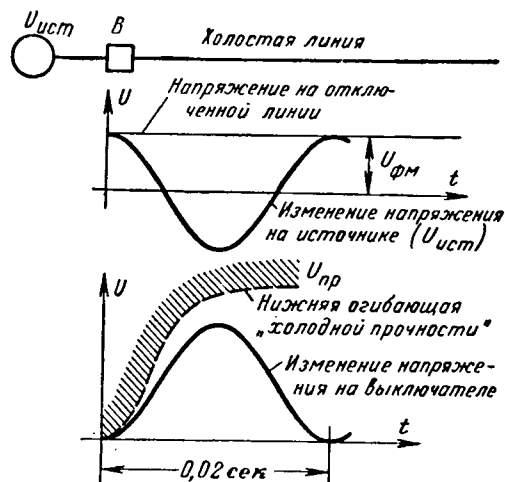


Рис. 4. Изменение напряжения на выключателе после отключения тока холостой линии.

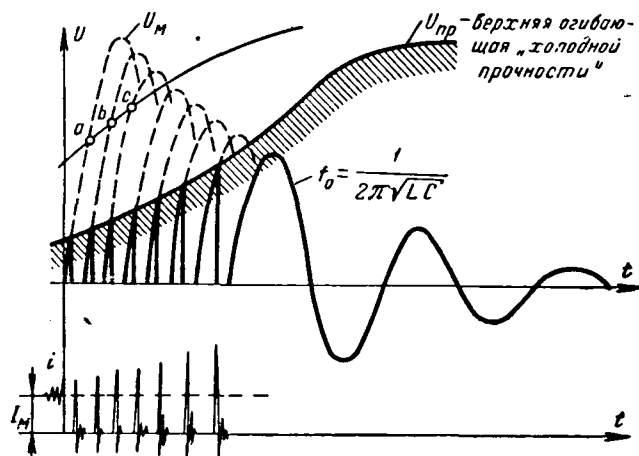


Рис. 5. Процесс отключения малого индуктивного тока.

вающейся сразу после перехода тока через нуль при гашении дуги. «Холодная прочность» есть огибающая минимальных прочностей промежутка при отключении вхолостую, которая определяется в основном расстоянием между контактами, давлением газа и характером истечения среды. «Холодная прочность» в момент перехода тока через нуль (при гашении дуги) — предельная прочность, устанавливающаяся после гашения дуги для данного положения контактов. Поскольку «холодная прочность» имеет разброс, то можно говорить о нижней и верхней огибающих «холодной прочности». С точки зрения гарантий отсутствия перенапряжений в системе при отключении холостых линий следует учитывать нижний предел, а при отключении трансформатора, работающего вхолостую, — верхний предел «холодной прочности».

На рис. 4 в зависимости от времени показано взаимное расположение кривых напряжения на выключателе и нарастания нижней огибающей прочности промежутка $U_{пр}$. Необходимо, чтобы на протяжении всего времени нарастания напряжения на выключателе не возникало таких положений, когда минимальная прочность дугогасительной камеры (рис. 4, пунктирная кривая) оказалась ниже приложенного к ней напряжения.

При отключении малых индуктивных токов (трансформаторов, работающих вхолостую) возникают так называемые «срезы» тока и в связи с этим значительные перенапряжения, определяемые запасом электромагнитной энергии $\frac{I_{ср}^2 L}{2}$.

Вся эта энергия стремится перейти в электростатическую $\frac{U_m^2 C}{2}$, где U_m — «ожидаемое» напряжение, которое может достигать весьма высоких величин, опасных как для изоляции отключаемого трансформатора, так и для изоляции выключателя и всего оборудования.

Обычно эти «ожидаемые» напряжения не проявляются в полной мере, так как промежуток камеры выключателя не выдерживает их и пробивается в процессе нарастания напряжения после «среза» тока.

Таким образом, уровень перенапряжений, возникающих при отключении трансформаторов, работающих вхолостую, определяется электрической прочностью межконтактного промежутка дугогасительной камеры выключателя, т. е. верхней огибающей кривой «холодной прочности». Если в первом случае (отключение холостой линии) «холодная прочность» камеры может быть сколь угодно высокой, то во втором случае (отключение трансформаторов) она не должна достигать таких величин, так как определяет уровень перенапряжений, воздействующих на изоляцию.

На рис. 5 показан процесс «среза» тока и последующие пробои межконтактного промежутка. При этом напряжение на трансформаторе стремится достигнуть величины U_m («ожидаемое» напряжение), но оно поднимается до величины, определяемой «холодной прочностью» отключающей камеры выключателя. Пики ряда повторных пробоев зависят от нарастания прочности межконтактного промежутка и продолжаются до тех пор, пока напряжение, возникающее в обмотке трансформатора, не станет ниже кривой «холодной прочности». При оценке этих явлений следует иметь в виду, что «ожидаемое» напряжение на трансформаторе после каждого повторного пробоя снижается из-за того, что часть энергии рассеивается в дуговом промежутке и в активном сопротивлении контура. После прекращения пробоев остающаяся в сердечнике трансформатора энергия теряется в контуре $L-C$ (индуктивность трансформатора и его емкость) в процессе свободных колебаний с частотой $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Рисунок 5 показывает, что если бы кривая «холодной прочности» пошла выше, то напряжения повторных пробоев поднялись бы до величин, характеризующихся точками a, b, c и т. д.; когда кривая «холодной прочности» поднимается очень круто, можно получить недопустимые перенапряжения в трансформаторе и на изоляции оборудования, связанного с ним. В этом и заключается противоречивость и сложность решения вопроса.

Если не удастся согласовать эти противоречивые требования удовлетворительным образом, то имеется возможность применять шунтирующие сопротивления на выключателе для снижения перенапряжений при отключении малых индуктивных токов. При этом обеспечивается ограничение перенапряжений, возникающих при отключении холостой линии, полным исключением повторных зажиганий после первого разрыва емкостного тока. Следовало бы в первую очередь предъявить более строгое требование к воздушным выключателям — отключать холостые линии без повторных зажиганий.

Практика США решает вопросы координации требований к выключателям таким образом, что на всех ответственных мощных трансформаторах устанавливаются вентильные разрядники, легко справляющиеся с ограничением перенапряжений при отключении трансформаторов, работающих вхолостую.

Некоторые вопросы, связанные с испытаниями выключателей в режиме отключения токов короткого замыкания. Основные проблемы, возникающие при испытаниях выключателей на коммутационную способность, связаны с тем, что, как правило, мощность коротких замыканий испытательных установок существенно ниже мощности отключения выключателей.

Для повышения возможностей испытательных установок в настоящее время применяют метод испытания выключателей по разрывам, а также испытания с помощью синтетических схем. Следует отметить, что мощности отключения выключателей становятся столь высокими, что и с помощью синтетических схем не представляется возможным испытать выключатель целиком, а приходится довольствоваться испытаниями одного или нескольких дугогасительных разрывов.

Можно сформулировать следующие критерии, при которых допустима замена испытаний на коммутационную способность всего выключателя испытаниями на отдельные разрывы:

а) отсутствие взаимного влияния разрывов друг на друга в процессе отключения и включения (речь идет об электро- и газодинамических явлениях, механических связях через общий привод и т. п.);

б) практически одновременное размыкание контактов при отключении и замыкание их при включении (разница во времени между началом размыкания или замыкания различных контактов полюса допускается не более 0,005 сек);

в) распределение напряжения по разрывам практически не зависит от величины отключаемого тока и практически одинаково как для восстанавливающегося напряжения промышленной частоты, так и для переходной составляющей.

Исходя из рассмотрения процесса отключения выключателем тока как явления, подверженного статистическому разбросу, ряд авторов ставит под сомнение обязательность требований п. «в». Однако этот вопрос является дискуссионным и еще не настолько экспериментально изученным, чтобы можно было сейчас изменить требования в отношении стабильности распределения напряжения в испытываемом выключателе.

Если вместо всей дугогасительной камеры испытывается только часть ее, на которую приходится $\frac{1}{n}$ восстанавливающегося напряжения полюса, то, очевидно, э. д. с. испытательной цепи должна быть уменьшена в n раз по сравнению с той, которая потребовалась бы при испытании всего выключателя. Из условия получения требуемого тока коротких замыканий следует, что индуктивность испытательной цепи должна быть также снижена в n раз. Для сохранения частоты восстанавливающегося напряжения при испытании по разрывам величина шунтирующей емкости должна быть увеличена в n раз. Это также относится к шунтирующим сопротивлениям в выключателях, если они имеются. Можно показать, что при выполнении перечисленных условий влияние выключателя на процессы в испытательной цепи при

испытаниях по разрывам будет таким же, как и при испытании всего выключателя.

При отключениях неудаленных коротких замыканий влияние линии на условия работы выключателя, как мы видели выше, определяется ее индуктивным и волновым сопротивлениями (первое влияет на величину тока, второе — на скорости восстановления напряжения). Поскольку эти сопротивления оказываются включенными последовательно в цепь, то при испытании части дугогасительной камеры они должны быть уменьшены в n раз.

При испытаниях с использованием реальных линий выполнение этого требования весьма затруднительно. Для снижения волнового сопротивления линии потребовалось бы параллельное включение линий одинаковой длины. Параллельное соединение трех проводов одной трехфазной линии снижает волновое сопротивление менее чем в 2 раза вследствие электромагнитной и электростатической связей между проводами.

Легко себе представить те трудности, которые возникают при испытании, например, одного разрыва выключателя на 220 кВ ($n=4$), — потребовалось бы параллельное соединение четырех линий. Для осуществления испытания выключателей по разрывам в режиме отключения неудаленных коротких замыканий необходимо создание экспериментальных искусственных линий. Здесь имеется несколько путей: цепочечные схемы, эквивалентные схемы с относительно небольшим числом звеньев, специально подобранным для воспроизведения треугольной формы кривой восстанавливающегося напряжения, имеющего место при отключениях неудаленных коротких замыканий, и, наконец, сооружение специальной линии, у которой волновое сопротивление может регулироваться путем подключения к ней через определенные интервалы сосредоточенных емкостей.

С учетом того, что создание специальных схем для испытания выключателей на отключение неудаленных коротких замыканий связано с большими трудностями, представляется целесообразным проведение специальных исследований с целью выявить, с какой степенью точности должны воспроизводиться в лаборатории процессы в линии при неудаленных коротких замыканиях.

Возможно, при этом окажется, что для некоторых типов выключателей испытания в режиме неудаленных коротких замыканий можно производить при соответствующей частоте для обычной схемы с одночастотным восстанавливающимся напряжением.

Исследования последних лет показали, что на условия работы воздушных выключателей большое влияние оказывает момент размыкания контактов, т. е. длительность дуги при отключении. Для полноценных испытаний необходимо, чтобы длительность дуги во время опытов была более одного полупериода. Это, по-видимому, относится и к другим типам выключателей, следовательно, при испытании масляных выключателей, у которых длительность дуги может быть больше, чем у воздушных, также необходимо обеспечить получение

соответствующей длительности дуги. Между тем практически все синтетические схемы, реально используемые в настоящее время для испытания, позволяют испытывать выключатели при длительности дуги немногим более полупериода. Трудности получения большой длительности дуги в синтетической схеме объясняются следующими причинами.

Во всех синтетических схемах напряжение источника отключаемого тока существенно ниже номинального напряжения выключателя. Поэтому вероятность окончательного погасания дуги в первый момент перехода тока через нуль значительно повышается.

Можно указать два способа искусственного увеличения длительности дуги в выключателе при испытаниях в синтетической схеме:

а) создание таких условий, при которых гашение дуги при переходе тока через нуль становится невозможным;

б) изменение формы кривой отключаемого тока таким образом, чтобы он достигал нулевого значения только в конечный момент горения дуги.

При первом способе увеличение длительности дуги достигается либо путем значительного повышения скорости восстанавливающегося напряжения, либо путем резкого увеличения скорости изменения тока при переходе через нуль. В первом случае от источника тока отключаются все дополнительные конденсаторы, регулирующие частоту восстанавливающегося напряжения, и включаются только в момент перехода тока через нуль, при котором должно произойти окончательное гашение дуги. Экспериментальная проверка таких схем показала, что они применимы к ограниченному числу типов выключателей и требуют достаточно мощного источника высокого напряжения.

Искусственное увеличение скорости изменения тока при переходе через нуль обычно производится путем разряда через некоторый импеданс предварительно заряженной емкости. Полярность заряда емкости и момент ее разряда выбираются такими, чтобы непосредственно перед переходом через нуль ток резко изменил свою полярность и далее продолжал возрастать. Опыты со схемами подобного рода показали, что они достаточно эффективны при работе с выключателями, у которых интенсивность дугогашения нарастает от полупериода к полупериоду (например, масляные выключатели). Если же выключатель обладает высокой интенсивностью дугогашения в первый полупериод тока (воздушные выключатели), то для успешной работы схемы с разрядом емкости необходимо, чтобы напряжение источника тока было достаточно высоким.

Таким образом, применение первого способа увеличения длительности дуги связано с необходимостью повышения напряжения источника тока, что снижает экономическую эффективность синтетической схемы.

Второй способ предусматривает проведение тех или иных коммутаций в цепи тока непосредственно во время горения дуги, вследствие которых кривая тока становится не синусоидальной, а более сложной и имеет униполярный характер.

Существуют две разновидности схем, работающих на этом принципе. В одной из них используются аperiodические составляющие тока, возникающие при коммутациях, другие схемы являются по существу двухполупериодными выпрямителями без сглаживающих фильтров. В выпрямительных схемах ток является пульсирующим, а моменты включения вентилей выбираются так, чтобы в процессе коммутации ток не достигал нулевого значения.

При соответствующем выборе параметров схем и надлежащей их настройке можно получить достаточно близкую к реальной форму кривой отключаемого тока при подходе к нулю. В схеме с пульсирующим током обеспечивается также эквивалентность условий нагрузки на дугогасительное устройство по энергии, выделяемой в нем в течение всего времени горения дуги.

Второй способ искусственного увеличения длительности дуги обладает преимуществом по сравнению с первым, поскольку не требует дополнительного повышения напряжения источника тока.

Существует много предложений по схемам для искусственного увеличения длительности дуги и синтетических испытаний, однако ни одна из них не доведена до промышленного внедрения. Усовершенствование этих схем и их промышленное внедрение — одна из актуальных задач.

Заключение. Совершенно очевидно, что в настоящей статье авторы могли затронуть лишь важнейшие вопросы требований, предъявляемых к выключателям.

Из рассмотренного выше вытекает, что современный надежный высоковольтный выключатель должен удовлетворять ряду требований. Необходимо эти требования уточнить и оформить в виде руководящих указаний и по возможности быстро ввести их в практику разработки выключателей.

Исключительно большое значение для надежности работы выключателей в эксплуатации имеет правильная постановка испытания их в режиме короткого замыкания и других режимах (противофазы, отключения холостых линий и трансформаторов).

Вопросу разработки руководящих указаний по испытанию мощных высоковольтных испытаний выключателей в различных режимах должно быть уделено самое серьезное внимание. В этих направлениях уже проводятся исследования в ВЭИ, ВНИИЭ, Энергосетьпроекте и других организациях.

Без тщательно разработанных технических требований не может быть создан надежный высоковольтный выключатель!

[30.4.1965]



Трехфазные силовые трансформаторы с расщепленными обмотками

Кандидат техн. наук А. Г. КРАЙЗ

Московский электрозавод им. Куйбышева

Опыт последних лет показал, что один из действенных и экономически выгодных путей ограничения токов короткого замыкания заключается в увеличении сопротивления одного из элементов высоковольтных сетей — силовых трансформаторов — путем расщепления их обмоток.

За последние годы такие трансформаторы с расщепленной обмоткой уже получили значительное распространение, причем с каждым годом растет число новых типов и общее количество таких трансформаторов.

Тем не менее некоторые связанные с ними вопросы, особенно применительно к трехфазным единицам, еще недостаточно освещены.

Основные требования. Ввиду имеющего место разнообразия следует установить единую и четкую терминологию в рассматриваемой области. Неправильно говорить о «расщепленных обмотках», когда в двух- или трехобмоточном трансформаторе одна из его обмоток (как правило, обмотка низшего напряжения) расщеплена на две части или более. Применение неправильной терминологии приводит, например, к таким наименованиям, как «двухобмоточный трансформатор с тремя (!) расщепленными обмотками».

Под трансформатором с расщепленной обмоткой, по нашему мнению, следует понимать такой трансформатор, одна (или более) из обмоток которого расщеплена на две (или более) части (ветви, цепи). Эти части нормально электрически не соединены между собой, и суммарная мощность их равна номинальной мощности трансформатора. В частном случае части расщепленной обмотки могут быть выполнены на разные номинальные напряжения, например 6 и 10 кВ.

К трансформаторам с расщепленной обмоткой предъявляют следующие основные требования, определяющие их принципиальную конструкцию:

1. Достаточно большое полное сопротивление между ветвями расщепленной обмотки (для повышающих трансформаторов).

2. Равенство полных сопротивлений между каждой из ветвей расщепленной обмотки и другими (нерасщепленными) обмотками.

3. Возможность работы каждой из ветвей расщепленной обмотки при отключенной другой (или других) ветви.

4. Возможность работы трансформатора с параллельным включением ветвей расщепленной обмотки (при их выполнении на одно номинальное напряжение).

5. Достаточная электрическая прочность изоляционной конструкции между частями расщепленной обмотки и относительно других обмоток.

6. Простота конструкции, которая по возможности должна приближаться к конструкции трансформаторов без расщепленных обмоток.

Особенности трехфазных трансформаторов с расщепленной обмоткой. Если не рассматривать

однофазные трансформаторы с одностержневым магнитопроводом, которые в отечественном трансформаторостроении вообще не применяются, то можно сказать, что по своему устройству однофазный (двух- или трехстержневой) трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения (НН) почти не отличается от соответствующего трансформатора с нерасщепленной обмоткой. Разница заключается лишь в том, что обмотки НН различных стержней не соединены между собой последовательно или параллельно; вместо этого их начала и концы выведены независимо наружу (рис. 1, а и б).

В трехфазном трансформаторе для удовлетворения указанным выше основным требованиям части расщепленной обмотки НН каждой фазы располагаются не на разных стержнях, а на одном стержне сдвинутыми в осевом направлении (например, согласно рис. 1, в). При этом возникают конструктивные проблемы, связанные с самим устройством расщепленной обмотки и выводом ее внутренних (от середины по высоте стержня) концов; вопросы изоляции между частями расщепленной обмотки и необходимой величины разрыва; воздействия на изоляцию между частями обмотки НН, в том числе при импульсных напряжениях; изменяются параметры схемы замещения и электромагнитные характеристики из-за более тесной магнитной связи между частями расщепленной обмотки, чем в однофазных трансформаторах.

В [Л. 1] было показано, что однофазные трансформаторы с расщепленной обмоткой можно (в первом приближении) рассматривать как два независимых трансформатора. Это положено в основу при определении параметров схемы замещения таких трансформаторов в [Л. 2 и 3]. Однако применительно к трехфазным трансформаторам такое допущение приводит к значительным неточностям в расчетах сопротивлений и токов короткого замыкания.

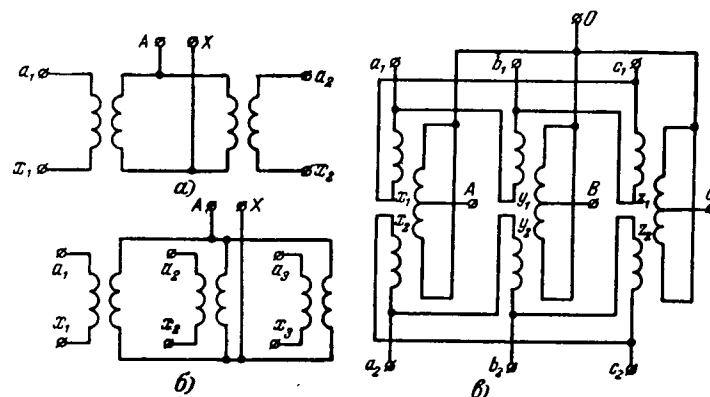


Рис. 1. Принципиальные схемы соединения обмоток трансформаторов с расщепленной обмоткой НН.

а — однофазный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части; б — однофазный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на три части; в — трехфазный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части.

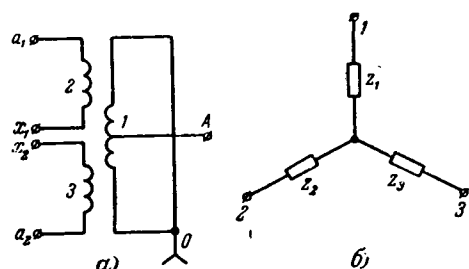


Рис. 2. Трёхфазный двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой НН.
а — принципиальная схема обмоток одной фазы;
б — схема замещения трансформатора.

В табл. 1 приведены основные параметры и напряжения короткого замыкания трёхфазных двухобмоточных трансформаторов с расщепленной обмоткой НН, изготовляемых Московским электрозаводом. Данные испытаний представляют собой средние значения для ряда изготовленных трансформаторов.

Из табл. 1 видно, что хорошо удовлетворяется второе из указанных выше основных требований о равенстве напряжений короткого замыкания между обмотками высшего напряжения (ВН) и частями НН₁ и НН₂ расщепленной обмотки НН, т. е.

$$u_{\text{кВН}-\text{НН}_1} \approx u_{\text{кВН}-\text{НН}_2},$$

или, введя индексы 1, 2 и 3 (рис. 2,а), $u_{\text{к1-2}} \approx u_{\text{к1-3}}$.

Необходимо отметить, что трансформаторы с расщепленной обмоткой, изготовляемые отечественными заводами, удовлетворяют также остальным перечисленным требованиям. В связи с вопросами, возникающими при эксплуатации таких трансформаторов, следует попутно указать, что их перегрузочная способность такая же, как у нормальных трёхфазных трансформаторов с нерасщепленной обмоткой. При этом перегрузки необходимо считать для каждой ветви в отдельности и относить к мощности этой ветви.

В табл. 1 приведены также значения коэффициента расщепления K_p [Л. 2], являющегося одной из основных характеристик трансформатора с расщепленной обмоткой. Этот коэффициент равен отношению сопротивления короткого замыкания между частями расщепленной обмотки к «сквозному» сопротивлению трансформатора, когда цепи

2 и 3 несут одинаковые нагрузки или соединены параллельно (случай обычного двухобмоточного трансформатора):

$$K_p = \frac{u_{\text{кНН}_1-\text{НН}_2}}{u_{\text{кВН}-(\text{НН}_1+\text{НН}_2)}} = \frac{z_{\text{к2-3}}}{z_{\text{к1}-(2+3)}}. \quad (1)$$

Если для однофазных трансформаторов с большой степенью точности можно принять $K_p=4$, то, как видно из табл. 1, для трёхфазных единиц K_p колеблется в пределах 3,34—3,60 (по результатам испытаний). Учитывая сравнительно малый разброс значений K_p , можно рекомендовать для существующих конструкций трёхфазных двухобмоточных трансформаторов классов напряжения 10—220 кВ с расщепленной обмоткой НН (как Московского электрозавода, так и Запорожского трансформаторного завода) принимать коэффициент расщепления $K_p=3,5$.

Схема замещения двухобмоточного трансформатора с расщепленной на две части обмоткой НН. Рассматривая такой трансформатор как трехобмоточный с обмотками 1, 2 и 3 (рис. 2,а), можно его представить схемой замещения в виде обычной трехлучевой звезды (рис. 2,б) с сопротивлениями лучей

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{z_{\text{к12}} + z_{\text{к13}} - z_{\text{к23}}}{2}; \\ z_2 &= \frac{z_{\text{к12}} + z_{\text{к23}} - z_{\text{к13}}}{2}; \\ z_3 &= \frac{z_{\text{к13}} + z_{\text{к23}} - z_{\text{к12}}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где в правой части стоят парные сопротивления короткого замыкания.

Ввиду симметрии цепей 2 и 3 относительно обмотки 1 можно записать:

$$z_{\text{к12}} = z_{\text{к13}}. \quad (3)$$

Подставив выражение (3) в (2), получим:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= z_{\text{к12}} - \frac{z_{\text{к23}}}{2}; \\ z_2 &= z_3 = \frac{z_{\text{к23}}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Соединяя параллельно цепи 2 и 3, получаем:

$$z_{\text{к1}-(2+3)} = z_1 + \frac{z_2}{2} = z_{\text{к12}} - \frac{z_{\text{к23}}}{4}. \quad (5)$$

Таблица 1

Характеристики изготовляемых трёхфазных двухобмоточных трансформаторов с расщепленной обмоткой НН

Номинальная мощность, кВа	Класс напряжения обмотки ВН, кВ	Класс напряжения обмотки НН, кВ	Напряжения короткого замыкания, приведенные к номинальной мощности, %								Коэффициент расщепления K_p	
			ВН—(НН ₁ + НН ₂)		ВН—НН ₁		ВН—НН ₂		НН ₁ —НН ₂		По расчету	По испытанию
			Расчет	Испытание	Расчет	Испытание	Расчет	Испытание	Расчет	Испытание		
20 000	10—35	6	8,3	2,28	—	15,14	—	15,12	—	27,72	—	3,35
20 000	110	6 или 10	10,4	10,2	—	19,1	—	19,1	—	35,6	—	3,50
40 500	110	6 или 10	10,3	9,6	19,8	17,7	19,8	17,7	30,5	32,0	2,96	3,34
63 000	110	6 или 10	11,2	10,75	23,4	20,0	23,4	20,3	32,6	39,2	2,91	3,64
32 000	220	6 или 10	12,0	11,87	—	22,6	—	22,6	43,6	42,6	3,64	3,60
63 000	220	6 или 10	12,0	—	—	—	—	—	38,6	—	3,16	—

Подставив значение z_{k12} из выражения (5) в (4), в соответствии с [Л. 2] можно записать следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= z_{k1-(2+3)} - \frac{z_{k23}}{4}; \\ z_2 &= z_3 = \frac{z_{k23}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Используя выражение (1), получим вместо (6) следующие формулы для лучей схемы замещения (рис. 2,б), выраженные через «сквозное» сопротивление короткого замыкания трансформатора:

$$z_{k1-(2+3)} = U_{кВН} / (H_1 + H_2)$$

и коэффициент расщепления K_p :

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= z_{k1-(2+3)} \left(1 - \frac{K_p}{4} \right); \\ z_2 &= z_3 = z_{k1-(2+3)} \frac{K_p}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Из выражения (7) непосредственно следует, что для однофазных трансформаторов с расщепленной обмоткой НН, для которых $K_p = 4$, получаются следующие сопротивления схемы замещения:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= 0; \\ z_2 &= z_3 = 2z_{k1-(2+3)}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для существующих конструкций трехфазных трансформаторов 10—220 кВ с расщепленной обмоткой НН можно, как указано выше, принять $K_p = 3,5$. Тогда сопротивления лучей схемы замещения будут:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= z_{k1-(2+3)} \left(1 - \frac{3,5}{4} \right) = 0,125 z_{k1-(2+3)}; \\ z_2 &= z_3 = 1,75 z_{k1-(2+3)}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Очевидно, что

$$z_1 + \frac{z_2}{2} = z_{k1-(2+3)} \left(0,125 + \frac{1,75}{2} \right) = z_{k1-(2+3)}.$$

Согласно ГОСТ 401-41 для мощных трехфазных двухобмоточных трансформаторов класса 35 кВ напряжение короткого замыкания составляет 7,5—8,5%, а для класса 110 кВ — 10,5—11%. Приняв значения соответственно 8,0 и 10,5%, а для трансформаторов класса 220 кВ — 12,0%, можно согласно (9) рекомендовать следующие параметры схемы замещения трехфазных двухобмоточных трансформаторов с расщепленной обмоткой НН при расчете режимов в сетях, когда неизвестны точные значения $z_{k1-(2+3)}$ применительно к конкретным трансформаторам:

Класс напряжения трансформатора, кВ	Параметры схемы замещения на рис. 2,б, %	
	z_1	$z_2 = z_3$
10—35	1,0	14,0
110	1,3	18,4
220	1,5	21,0

Схема замещения на рис. 2,б и ее параметры получены, исходя из рассмотрения одной фазы

трехфазного трансформатора. Это допустимо при симметричных режимах. При несимметричных режимах полученная схема замещения действительна для систем прямой и обратной последовательностей. Схема замещения и ее параметры для системы нулевой последовательности могут быть получены тем же методом.

Если ветви расщепленной обмотки выполнены на разные номинальные напряжения, например 6 и 10 кВ, то для двухобмоточного трансформатора сохраняются как схема замещения на рис. 2,б, так и ее параметры, приведенные выше.

Схема замещения трехобмоточного трансформатора с расщепленной на две части обмоткой НН. В настоящее время заводы страны изготавливают трехфазные трансформаторы с расщепленной обмоткой только в двухобмоточном исполнении. Однако создание таких же трехобмоточных трансформаторов является, очевидно, лишь вопросом времени. Несомненно, что в будущем они поступят на вооружение нашей энергетики, обеспечивая те же преимущества в отношении ограничения токов короткого замыкания, что и двухобмоточные трансформаторы с расщепленной обмоткой.

На рис. 3,а показана принципиальная схема обмоток одной фазы трехобмоточного трансформатора с нерасщепленными обмотками 1 и 2 и расщепленной на части 3 и 4 третьей обмоткой.

В [Л. 2] для такого трансформатора предложены две схемы замещения. Одна из них получена на основе схемы замещения четырехобмоточного трансформатора по [Л. 4]. Другая, приведенная без вывода, но более удобная, имеет вид, показанный на рис. 3,б. В приложении к настоящей статье дан вывод этой схемы замещения, исходя из основных уравнений теории многообмоточного трансформатора.

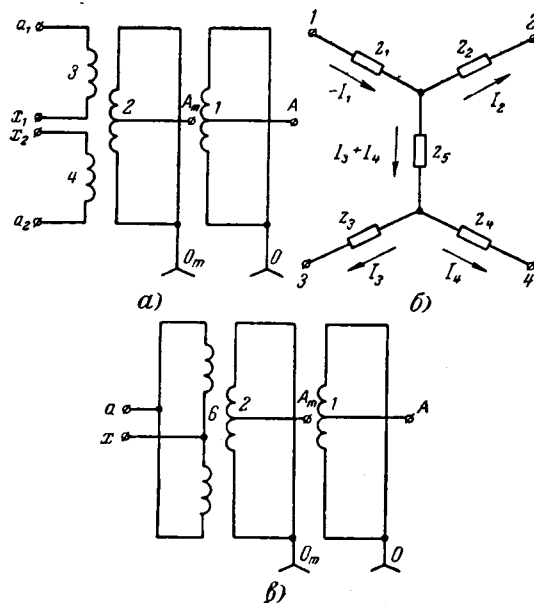


Рис. 3. Трехфазный трехобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой НН.

а — принципиальная схема обмоток одной фазы; б — схема замещения трансформатора; в — схема обмоток одной фазы при параллельном соединении частей расщепленной обмотки.

Сопротивления элементов схемы замещения на рис. 3,б:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{z_{K12} + z_{K13} - z_{K23}}{2}; \\ z_2 &= \frac{z_{K12} + z_{K23} - z_{K13}}{2}; \\ z_3 &= z_4 = \frac{z_{K34}}{2}; \\ z_5 &= \frac{z_{K13} + z_{K23} - z_{K12} - z_{K34}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Величины сопротивлений z_1 — z_5 , рассчитанные по уравнениям (10), получаются со значительными погрешностями по следующим причинам. Расчет сопротивления рассеяния между обмотками разной высоты (z_{K13} и z_{K23}) громоздок и не обеспечивает достаточной точности.

Кроме того, в числителях выражений для z_1 , z_2 и z_3 стоят разности этих величин, что еще больше снижает точность при определении сопротивлений схемы замещения.

Для повышения точности предположим, что части расщепленной обмотки 3 и 4 трансформатора, изображенного на рис. 3,а, соединены параллельно и образуют нерасщепленную обмотку 6 (рис. 3,в).

Схема замещения такого трансформатора имеет вид трехлучевой звезды (аналогично рис. 2,б) с сопротивлениями лучей [Л. 2]:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{z_{K12} + z_{K16} - z_{K26}}{2}; \\ z_2 &= \frac{z_{K12} + z_{K26} - z_{K16}}{2}; \\ z_6 &= \frac{z_{K16} + z_{K26} - z_{K12}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Эту же схему можно получить из схемы, изображенной на рис. 3,б, соединив в ней точки 3 и 4. Тогда, используя выражение (10), получим:

$$z_6 = z_5 + \frac{z_{K34}}{4}. \quad (12)$$

На основании формул (10), (11) и (12) можно получить следующие выражения для сопротивлений схемы замещения трехобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой (рис. 3,б), удобные для практического использования:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{z_{K12} + z_{K16} - z_{K26}}{2}; \\ z_1 &= z_{K12} - z_1; \\ z_3 &= z_4 = \frac{z_{K34}}{2}; \\ z_5 &= z_6 - \frac{z_3}{2} = z_{K16} - z_1 - \frac{z_3}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Для определения сопротивлений z_1 — z_5 по (13) достаточно знать четыре парных сопротивления короткого замыкания. Из них три (z_{K12} , z_{K16} и z_{K26}) представляют собой обычные сопротивления трех-

обмоточного трансформатора, легко определяемые расчетом или из опытов короткого замыкания. Четвертое сопротивление z_{K34} между частями расщепленной обмотки также нетрудно определить, причем расчет значительно менее трудоемок и более точен, чем определение z_{K13} и z_{K23} , входящих в выражения (10).

Изоляция и перенапряжения. Если в однофазных трансформаторах с расщепленной обмоткой практически не возникают новые вопросы, касающиеся их изоляционной конструкции (за исключением, например, отводов) по сравнению с нормальными, то в трехфазных имеются свои особенности и в этом отношении.

Основная из них заключается в необходимости обеспечения достаточной электрической прочности изоляции между частями расщепленной обмотки, расположенными на одном стержне, например, друг над другом. Эта изоляция создается увеличенным радиальным каналом между частями обмотки («разрывом»), заполненным изоляционными деталями.

Выбор этой изоляции должен производиться, исходя из нормированных воздействий на нее при испытании внутренней изоляции трансформатора напряжения переменного тока и импульсными. Однако в ГОСТ 1516-60 вообще не предусмотрены нормы испытательных напряжений между частями расщепленных обмоток трансформаторов.

Вместе с тем при определенных условиях изоляция между частями расщепленной обмотки может испытывать значительные воздействия, которые в случае непринятия необходимых мер могут вывести трансформатор из строя. Это иллюстрируется данными табл. 2, в которой приведены напряжения между соседними концами частей расщепленной обмотки (классов напряжения 6 и 10 кВ) при воздействии импульсного напряжения на линейный конец обмотки ВН. Данные получены при измерениях на пониженном импульсном напряжении по схемам, изображенным на рис. 4. При измерениях одна часть расщепленной обмотки НН (например, a_2x_2) замыкалась накоротко и заземлялась, а вторая (например, a_1x_1) оставалась разомкнутой и изолированной. При этом измерялись напряжения на участке x_1 — x_2 .

Таблица 2

Напряжения между соседними концами частей расщепленной обмотки НН трехфазных двухобмоточных трансформаторов при воздействии импульсного напряжения на линейный конец обмотки ВН (схемы испытания на рис. 4)

Трансформатор	Полная волна 1,5/40 мксек		Срезанная волна $\tau_{ср} = 2$ мксек	
	В процентах амплитуды падающей волны	В киловольтах	В процентах амплитуды падающей волны	В киловольтах
20 Мва, 110 кВ	8	38,4	10	55
40,5 Мва, 110 кВ	15,4	74	15,7	86,4
63 Мва, 110 кВ	6,5	31,2	—	—
32 Мва, 220 кВ	3	75,6	14,3	156

Из табл. 2 видно, что при данных условиях импульсные воздействия на изоляцию между частями расщепленной обмотки НН могут значительно превосходить нормированные в ГОСТ 1516-60 для классов напряжения 6 и 10 кВ.

Предусматривать изоляцию между частями расщепленной обмотки НН на выдерживание таких напряжений нецелесообразно.

Нам представляется, что испытательные напряжения переменного тока и импульсные для этой изоляции должны быть установлены равными тем, которые нормированы для класса напряжения данной обмотки НН. Испытательное напряжение (50 Гц или импульсное) подводится поочередно к одной из ветвей обмотки НН при заземлении другой ветви и обмотки ВН.

Соответствующие дополнения должны быть внесены в ГОСТ 1516-60.

Предпосылкой принятия указанных норм испытательных напряжений является правило эксплуатации трансформаторов с расщепленной обмоткой, заключающееся в том, что при работе только одной ветви обмоток НН и отключенной от сети второй последняя должна быть защищена подключением разрядников соответствующего класса напряжения или заземлением одной из вершин треугольника.

Другая особенность трехфазных трансформаторов по сравнению с однофазными заключается в наличии отводов от внутренних концов частей расщепленной обмотки НН ($x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ на рис. 1,б), проходящих вдоль них.

Изоляцию между частями расщепленной обмотки НН и этими отводами необходимо выбирать, исходя из воздействия на нее при импульсном испытании как обмотки НН (см. выше), так и ВН.

В некоторых случаях определяющим для выбора рассматриваемой изоляции может оказаться именно испытание обмотки ВН срезанной волной по следующей причине. Частота колебаний напряжения после среза волны, определяемая индуктивностью петли среза и входной емкостью испытываемого трансформатора, обычно составляет около 1 мксек. При расщеплении обмотки НН на две части частота собственных колебаний каждой из них может измениться по сравнению с собственной ча-

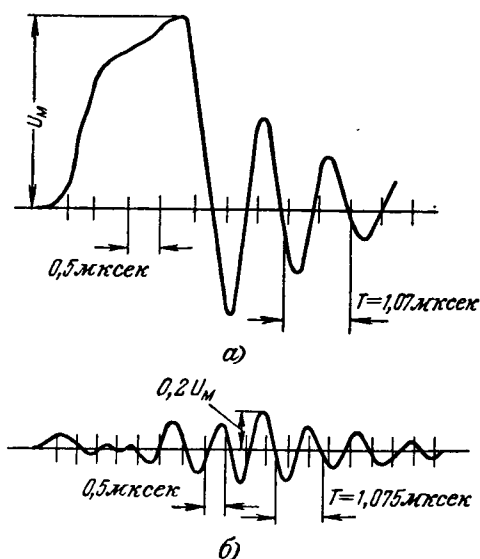


Рис. 5. Осциллограммы, снятые при импульсном обмере трехфазного двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН.

а — срезанная волна на линейном конце обмотки ВН; б — напряжение между серединой и концом одной части расщепленной обмотки НН.

стотой нерасщепленной обмотки НН и оказаться близкой к частоте среза. В этом случае вследствие резонанса колебания напряжения на отдельных участках одной ветви обмотки НН могут получить значительный размах и превысить соответствующие напряжения при импульсном испытании самой обмотки НН.

Такой случай показан на рис. 5, на котором приведены осциллограммы, полученные при импульсном обмере трехфазного двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН. Период колебаний волны на линейном конце ВН после среза в этом случае составил 1,07 мксек (рис. 5,а), а период колебаний напряжения между серединой одной ветви НН и ее концом (а следовательно, и отводом) — 1,075 мксек (рис. 5,б), т. е. практически совпал с периодом среза. В результате эти воздействия достигли значительной величины (20% амплитуды среза на стороне ВН) и стали определяющими для выбора изоляции между обмоткой НН и проходящим вдоль нее отводом.

Технико-экономические вопросы. Целесообразность применения трансформаторов с расщепленной обмоткой должна рассматриваться в каждом конкретном случае при проектировании электрической установки с учетом как чисто технических, так и экономических факторов.

Однако в подавляющем большинстве случаев как на районных понижающих подстанциях, так и на мощных электростанциях (в качестве трансформаторов собственного расхода) применение трансформаторов с расщепленными обмотками обеспечивает значительные преимущества по сравнению с другими способами ограничения токов короткого замыкания — использованием одинарных и двоянных реакторов, трансформаторов с повышенным сопротивлением рассеяния, дроблением транс-

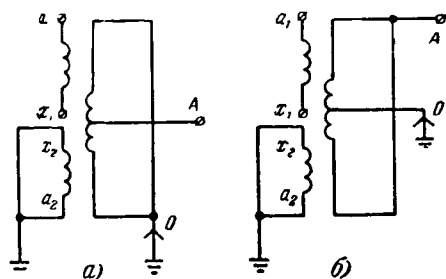


Рис. 4. Схемы измерения импульсных напряжений между частями расщепленной обмотки НН при воздействии импульсного напряжения на линейный конец обмотки ВН.

а — двухобмоточный трансформатор класса 220 кВ; б — двухобмоточный трансформатор класса 110 кВ.

форматорной мощности на более мелкие единицы и др.

Например, согласно опыту Мосэнергонпроекта применение трехфазных трансформаторов Московского электрозавода мощностью 63 Мва на напряжения 110/6—6 кВ с расщепленной обмоткой НН позволило отказаться от сооружения типового распределительного устройства 6 кВ с двойной системой сборных шин и применить более простую схему, обладающую большой степенью надежности [Л. 6].

Значительные преимущества обеспечило также применение трехфазных двухобмоточных трансформаторов Московского электрозавода мощностью 32 Мва и напряжением $230 \pm 12\% / 6,3—6,3$ кВ с встроенной аппаратурой для регулирования напряжения под нагрузкой и расщепленной обмоткой НН для обеспечения пуска агрегатов и резервного питания собственных нужд ряда крупных тепловых электростанций с блоками 300 Мвт, на которых нет распределительных устройств на напряжение менее 220 кВ (в соответствии с проектом Теплоэлектропроекта).

Правильное экономическое сравнение вариантов электроустановок должно учитывать увеличение расхода материалов и стоимости трансформаторов с расщепленной обмоткой по сравнению с нормальными. Для получения этих данных были выполнены сравнительные расчеты трехфазных двухобмоточных трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой на напряжения $115 \pm 10\% / 6,3$ кВ мощностью 20 и 63 Мва в исполнениях с расщепленной и нерасщепленной обмотками НН. Сравнение велось на базе одинаковых номинальных данных (мощность, номинальные напряжения, пределы регулирования, число ступеней) и технических характеристик (суммарные потери, напряжение короткого замыкания) трансформаторов с применением минимально допустимых изоляционных расстояний в обоих случаях.

Стоимость трансформаторов определялась с учетом стоимости активных и конструктивных материалов, трудозатрат, отчислений и стоимости переключающих устройств. Данные сравнительных расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение весов активных материалов и стоимостей трехфазных двухобмоточных трансформаторов нормального исполнения и с расщепленной обмоткой НН

Трансформатор	Обмотка НН	Вес активной стали, т	Вес обмоточной меди, т	Стоимость трансформатора, тыс. руб.
20 Мва, 110/6 кВ	Нерасщепленная	14,9	3,86	24,1
	Расщепленная	15,5	4,29	25,6
63 Мва, 110/6 кВ	Нерасщепленная	35,0	9,20	48,5
	Расщепленная	36,4	9,88	51,0

Из этих данных видно, что расщепление обмотки НН в двухобмоточных трехфазных транс-

форматорах класса 110 кВ существующей конструкции обуславливает увеличение расхода активной стали примерно на 4%, обмоточной меди до 11% и стоимости трансформатора в целом на 5—6% или несколько больше.

Этими данными можно пользоваться как усредненными для сравнительных технико-экономических расчетов при проектировании электрических установок.

Выводы. 1. При проектировании силовых трансформаторов с расщепленной обмоткой необходимо руководствоваться основными требованиями, предъявляемыми к их характеристикам и конструкции.

2. Трехфазные трансформаторы с расщепленной обмоткой имеют по сравнению с однофазными ряд особенностей, касающихся конструктивных, изоляционных и электромагнитных вопросов.

3. Применительно к трехфазным трансформаторам с расщепленной обмоткой допущение о двух независимых трансформаторах приводит к неточностям в расчетах сопротивлений и токов короткого замыкания в системах.

4. Для расчетов режимов в сетях рекомендуется для трехфазных двухобмоточных трансформаторов классов 10—220 кВ с расщепленной обмоткой НН существующей конструкции принимать коэффициент расщепления $K_p = 3,5$. При неизвестных значениях напряжения короткого замыкания рекомендуется использовать параметры схемы замещения, приведенные в статье отдельно для классов напряжения 10—35, 110 и 220 кВ.

5. Приведенная в [Л. 2] без вывода схема замещения трехобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой может быть получена на основе строгой теории многообмоточного трансформатора.

6. В ГОСТ 1516-60 необходимо внести дополнения о нормах на испытательные напряжения переменного тока и импульсные напряжения, а также о методах испытаний изоляции между частями расщепленной обмотки трехфазных трансформаторов.

7. При проектировании трехфазных трансформаторов с расщепленной обмоткой НН необходимо учитывать, что для определенных участков внутренней изоляции обмотки НН определяющими могут быть воздействия, возникающие не при импульсном испытании этой обмотки, а обмотки ВН.

8. При работе только одной ветви расщепленной обмотки НН и отключенной от сети второй последняя должна быть защищена подключением разрядников.

9. При сравнительных технико-экономических расчетах электрических установок с применением трансформаторов нормальных и с расщепленной обмоткой необходимо учитывать увеличение стоимости последних согласно приведенным ориентировочным данным.

10. Принципиально возможно выполнение трансформаторов с двумя расщепленными обмотками, а также с расщепленной обмоткой, ветви которой имеют разные номинальные напряжения (например, 6 и 10 кВ).

Приложение. Рассматривая трехобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой (рис. 3,а) как четырехобмоточный с обмотками 1, 2, 3 и 4, на основании строгой теории многообмоточных трансформаторов [Л. 5] получены следующие выражения для падения напряжения обмоток:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{U}_2 &= I_2 Z_{K12} + I_3 Z_{123} + I_4 Z_{124}; \\ \dot{U}_1 - \dot{U}_3 &= I_2 Z_{132} + I_3 Z_{K13} + I_4 Z_{134}; \\ \dot{U}_1 - \dot{U}_4 &= I_2 Z_{142} + I_3 Z_{143} + I_4 Z_{K14}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-1})$$

где

$$\left. \begin{aligned} Z_{123} &= Z_{132} = \frac{Z_{K12} + Z_{K13} - Z_{K23}}{2}; \\ Z_{124} &= Z_{142} = \frac{Z_{K12} + Z_{K14} - Z_{K24}}{2}; \\ Z_{134} &= Z_{143} = \frac{Z_{K13} + Z_{K14} - Z_{K34}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-2})$$

Из-за симметрии частей 3 и 4 расщепленной обмотки относительно обмоток 1 и 2

$$\left. \begin{aligned} Z_{K13} &= Z_{K14}; \\ Z_{K23} &= Z_{K24}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-3})$$

Подставляя (16) в (15), тогда

$$\left. \begin{aligned} Z_{123} &= Z_{132} = Z_{124} = Z_{142} = \frac{Z_{K12} + Z_{K13} - Z_{K23}}{2}; \\ Z_{134} &= Z_{143} = \frac{2Z_{K13} - Z_{K34}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-4})$$

Пренебрегая током холостого хода, можно написать:

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0. \quad (\text{П-5})$$

Подставив выражение (П-4) в (П-1) и используя (П-5), после преобразований получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{U}_2 &= -I_1 Z_{123} + I_2 (Z_{K12} - Z_{123}); \\ \dot{U}_1 - \dot{U}_3 &= -I_1 Z_{123} + I_3 (Z_{K13} - Z_{123}) + \\ &\quad + I_4 (Z_{134} - Z_{123}); \\ \dot{U}_1 - \dot{U}_4 &= -I_1 Z_{123} + I_3 (Z_{134} - Z_{123}) + \\ &\quad + I_4 (Z_{K13} - Z_{123}). \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-6})$$

Обозначив в соответствии с (10)

$$Z_1 = Z_{123} = \frac{Z_{K12} + Z_{K13} - Z_{K23}}{2};$$

$$Z_2 = Z_{K12} - Z_{123} = \frac{Z_{K12} + Z_{K23} - Z_{K13}}{2};$$

$$Z_3 = Z_4 = \frac{Z_{K34}}{2};$$

$$Z_5 = \frac{Z_{K13} + Z_{K23} - Z_{K12} - Z_{K34}}{2}$$

и введя эти обозначения в (П-6), получим после преобразования:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{U}_2 &= -I_1 Z_1 + I_2 Z_2; \\ \dot{U}_1 - \dot{U}_3 &= -I_1 Z_1 + (I_3 + I_4) Z_5 + I_3 Z_3; \\ \dot{U}_1 - \dot{U}_4 &= -I_1 Z_1 + (I_3 + I_4) Z_5 + I_4 Z_4. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-7})$$

Системе уравнений (П-7) соответствует эквивалентная схема замещения трехобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой, показанная на рис. 3,б.

Литература

1. Петров Г. Н., Трехобмоточные трансформаторы с «расщепленной» обмоткой, «Вестник электропромышленности», 1960, № 7.
2. Полевой В. А., Схемы замещения трансформаторов с расщепленными обмотками, «Электричество», 1949, № 10.
3. Глушко А. И., Схемы замещения многообмоточных трансформаторов и автотрансформаторов, Известия высших учебных заведений, Энергетика, 1961, № 9.
4. Starr F. M., An Equivalent Circuit for Four-Winding Transformer, GER, 1933, № 3.
5. Петров Г. Н., Трансформаторы, т. 1, Госэнергоиздат, 1934.
6. Батурин Л. А., Применение сдвоенных реакторов и трансформаторов с расщепленными обмотками, «Электрические станции», 1964, № 10.

[15.2.1965]



УДК 621.331:621.3.024

Повышение напряжения на электрических железных дорогах постоянного тока

Доктор техн. наук В. Е. РОЗЕНФЕЛЬД, кандидат техн. наук В. В. ШЕВЧЕНКО,
кандидат техн. наук В. А. МАЙБОГА и инж. Г. П. ДОЛАБЕРИДЗЕ

Московский энергетический институт

В течение нескольких десятилетий техническая мысль в ряде стран работает над проблемой выбора системы тока и величины напряжения для электрификации магистральных железных дорог. В процессе исторического развития электрической тяги получила наибольшее признание вначале система постоянного тока низкого напряжения 600 в, затем переменного тока пониженной частоты, позднее постоянного тока более высокого напряжения 3000 в. С 30-х годов этого столетия все большее внимание привлекает система электрической тяги однофазного тока промышленной частоты, которая получает в настоящее время широкое распространение при использовании электропоездов и мотор-

ных вагонов с ионными и особенно полупроводниковыми выпрямителями.

Однако в связи с тем, что основные технические проблемы системы однофазного тока промышленной частоты решаются лишь в течение последних 10—15 лет, в СССР и других странах имеется уже большое количество железнодорожных линий, электрифицированных на постоянном токе напряжением 3000 в, перевод которых на переменный ток представляет значительные трудности и не оправдывается экономически. Поэтому сохраняют большое значение вопросы совершенствования и модернизации системы постоянного тока.

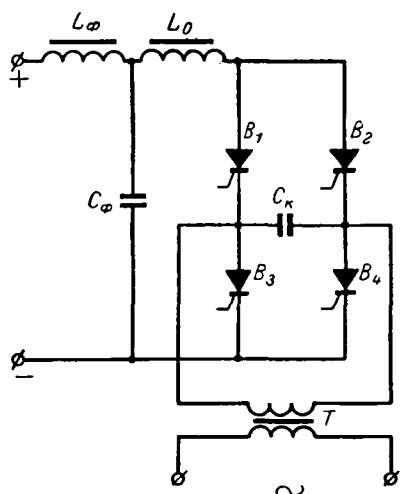


Рис. 1. Схема инвертора, работающего в режиме прерывистого тока.

По мере увеличения мощности электрифицированных линий все резче выявляются противоречия между напряжением, наименее выгодным для устройств электроснабжения, и напряжением, целесообразным для тяговых двигателей и аппаратуры подвижного состава. Принятое в СССР напряжение 3000 в представляет собой компромиссное решение, не удовлетворяющее, однако, системе электроснабжения, для которой это напряжение явно недостаточно, и являющееся предельным для тягового электрооборудования. Тем не менее при непосредственном питании тяговых двигателей от контактной сети напряжение 3000 в приходится признать оптимальным. Попытки применения как более низкого напряжения (1500 в), так и более высокого (4500 в) приводили лишь к ухудшению технико-экономических показателей системы постоянного тока.

Рациональное использование постоянного тока возможно лишь в том случае, если удастся освободиться от жесткой связи между напряжением контактной сети и напряжением тяговых двигателей и пускорегулирующей аппаратуры. Поэтому уже в течение более четверти века изучается вопрос о возможности повышения напряжения электрических железных дорог постоянного тока за счет установки на электровагонах статических преобразователей. Еще в 1932 г. в решениях I Всесоюзной конференции по электрификации железнодорожного транспорта была отмечена необходимость создания опытного участка постоянного тока напряжением 20 000 в [Л. 1]. Большие исследовательские работы проводились в этом направлении в ряде учебных и исследовательских институтов Советского Союза [Л. 2—6]. За рубежом обстоятельное исследование вопроса о применении на электрическом подвижном составе преобразователей постоянного тока опубликовал еще в 1940 г. М. Stöhr [Л. 7]. Однако все эти работы не были завершены и не привели к созданию системы электрической тяги постоянного тока высокого напряжения. Основные препятствия в деле реализации этой систе-

мы связаны с трудностями автономного инвертирования, необходимого для преобразования постоянного тока на электровагонах и моторных вагонах. В случае обычного параллельного инвертора нормальной частоты эти трудности заключаются, как известно, в том, что невключение любого из вентилей инвертора приводит к короткому замыканию; в невозможности отключения инвертора путем записывания вентилей; в неприемлемой, резко падающей с увеличением нагрузки его внешней характеристике и, наконец, в необходимости установки на подвижном составе конденсаторов и дросселей весьма больших габаритов, так как мощность их должна в несколько раз превышать полезную нагрузку.

Проведенное кафедрой электрического транспорта Московского энергетического института детальное изучение проблемы электрической тяги постоянного тока высокого напряжения привело к разработке системы автономного инвертирования и преобразования, позволяющей создать достаточно надежные электровагоны и моторные вагоны с преобразователями постоянного тока высокого напряжения.

Сущность разработанной системы заключается в том, что постоянный ток высокого напряжения инвертируется сначала в переменный ток повышенной частоты (500 гц и более), а затем либо снова выпрямляется после понижения напряжения в инверторном трансформаторе, либо преобразуется в многофазный ток регулируемой частоты. В соответствии с этим возможны две системы электрической тяги — постоянно-постоянного тока и постоянно-многофазного.

Повышенная частота промежуточного переменного тока, в который инвертируется поступающий по контактной сети постоянный ток, дает возможность значительно сократить размеры и веса дросселей и конденсаторов, а также трансформатора преобразователя постоянного тока. При частоте 500 гц и применении принудительного охлаждения удастся в 10 раз повысить мощность конденсаторов и в 3—4 раза — дросселей и трансформаторов по сравнению с их мощностями при частоте 50 гц. Кроме того, повышение частоты облегчает сглаживание пульсации тока как на входе, так и на выходе преобразователя.

Наряду с использованием повышенной частоты, важнейшей особенностью предлагаемого инвертора является его работа в режиме прерывистого тока [Л. 8]. Принципиальная схема этого инвертора приведена на рис. 1, на котором для упрощения показана лишь одна фаза. Основными элементами схемы являются индуктивность L_ϕ и емкость C_ϕ фильтра, токоограничивающий дроссель L_0 , включенные по мостовой схеме управляемые вентили B_1, B_2, B_3 и B_4 и колебательный контур, состоящий из контурной емкости C_k и первичной обмотки инверторного трансформатора T . Для обеспечения достаточной добротности колебательного контура магнитная система трансформатора выполняется с воздушными зазорами, что увеличивает намагничивающий ток, а следовательно, и реактивную мощность этого контура, благодаря чему отпадает

необходимость установки в нем специальных дросселей.

Для осуществления инвертирования независимый задающий генератор импульсов подает в определенном порядке отпирающие импульсы на вентили инвертора, частота которых определяет частоту переменного тока.

На рис. 2 представлены кривые изменения во времени напряжения U_1 первичной обмотки трансформатора, напряжения U_c на конденсаторе C_Φ , тока I_1 в вентилях B_1 и B_4 , тока I_2 вентилей B_2 и B_3 , тока $I_{с\kappa}$ конденсатора C_κ и тока I_T первичной обмотки трансформатора. В момент t_1 вентили B_1 и B_4 открываются под воздействием поданного на них отпирающего импульса. Так как напряжение U_c конденсатора C_Φ выше напряжения U_1 трансформатора, ток I_1 этих вентилей начинает увеличиваться. При этом происходит заряд конденсатора C_κ , вследствие чего повышается его напряжение, а следовательно, и напряжение U_1 первичной обмотки трансформатора. Ток I_1 поступает частично из контактной сети, частично от конденсатора C_Φ , что вызывает некоторое уменьшение напряжения U_c на его зажимах. Разность напряжений U_c и U_1 уравнивается э. д. с. самоиндукции дросселя L_0 . Следовательно, чем меньше индуктивность L_0 , тем быстрее изменяется ток I_1 .

В момент t_2 напряжение U_1 становится равным напряжению U_c , и возрастание тока вентилей B_1 и B_4 прекращается. За счет накопленной в индуктивности L_0 энергии продолжает нарастать напряжение U_1 конденсатора C_κ и первичной обмотки трансформатора, вследствие чего ток I_1 начинает уменьшаться.

При достаточно малой индуктивности L_0 ток I_1 упадет до нуля еще до окончания полупериода с момента включения вентилей B_1 и B_4 , после чего они остаются запертыми до подачи очередного отпирающего импульса. В то время, когда ток вентилей равен нулю или ток контактной сети больше тока вентилей, происходит заряд конденсатора C_Φ и повышается его напряжение.

В момент t_3 , отстоящий на половину периода от момента t_1 , задающий генератор импульсов открывает вентили B_2 и B_3 , и повторяется тот же процесс с тем лишь отличием, что проходящий через обмотку трансформатора ток I_2 течет в направлении, обратном направлению тока I_1 вентилей B_1 и B_4 .

Ток I_T в первичной обмотке трансформатора отстает от напряжения U_1 на угол, зависящий от соотношения активной и реактивной мощностей нагрузки. Наконец, ток $I_{с\kappa}$ конденсатора C_κ равен разности токов вентилей и трансформатора.

Таким образом, из анализа кривых рис. 2 следует, что инвертор работает в режиме прерывистого тока, т. е. в отличие от обычного инвертора ток в каждой группе вентилей прекращается еще до открытия последующей группы. Подобный режим достигается соответствующим подбором параметров колебательного контура и индуктивности L_0 , определяющей скорость нарастания и спадания тока в вентилях. Так как индуктивность контактной сети могла бы настолько замедлить процесс изме-

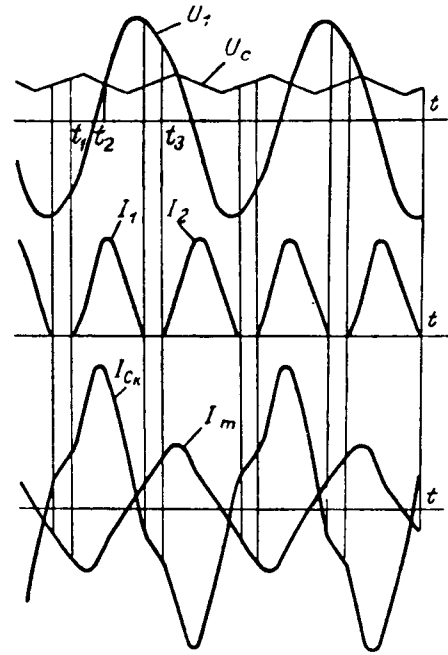


Рис. 2. Процесс автономного инвертирования при прерывистом токе.

нения тока вентилей, что прерывистый режим оказался бы невозможным, для обеспечения этого режима инвертор отделяется от контактной сети при помощи конденсатора C_Φ . Этот же конденсатор вместе с дросселем L_Φ служит одновременно для уменьшения пульсаций тока в тяговой сети.

Благодаря паузе между периодами работы вентилей разных групп и наличию колебательного контура невключение отдельных вентилей не приводит к коротким замыканиям; работа инвертора возможна даже при одной лишь группе вентилей.

Режим прерывистого тока повышает надежность работы инвертора не только за счет уменьшения опасности срыва инвертирования при пропусках включения вентилей, но увеличивает время, предоставляемое на восстановление управляющих свойств вентиля, и уменьшает скорость спадания тока вентилей. Кроме того, этот режим дает возможность отключать инвертор путем прекращения подачи отпирающих импульсов на вентили. Этим же способом можно осуществить быстродействующую защиту при отклонениях работы инвертора от нормального режима еще до развития опасных для него явлений.

В рассматриваемом инверторе сравнительно просто решается также важный вопрос о стабилизации внешней характеристики. Как известно, в инверторе соотношение между входным напряжением U_d постоянного тока и выходным напряжением U_1 первичной обмотки трансформатора зависит от угла β опережения основной гармоники тока колебательного контура. В инверторе прерывистого тока это соотношение может быть выражено следующей эмпирической формулой [Л. 9]:

$$\frac{U_1}{U_d} = \frac{0,6}{\cos(\beta - 1)}.$$

Следовательно, для стабилизации выходного напряжения инвертора при неизменном входном напряжении необходимо обеспечить постоянство угла β при любых изменениях нагрузки.

Угол опережения β определяется выражением

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{P_c - P_L}{P_a} = \frac{U_1^2 \omega C_K - \frac{U_1^2}{\omega L}}{P_a},$$

где P_a — активная мощность нагрузки;
 $P_c = U_1^2 \omega C_K$ — мощность, отдаваемая конденсатором C_K колебательного контура;
 $P_L = U_1^2 / \omega L$ — реактивная составляющая нагрузки;
 L — индуктивность нагрузки;
 ω — частота инвертированного тока.

Из этой формулы вытекает возможность поддержания постоянства угла β при изменениях активной нагрузки P_a путем автоматического регулирования частоты ω инвертора, что вполне осуществимо, поскольку инвертированный ток является промежуточным и его частота не влияет на работу тяговых двигателей. При увеличении нагрузки частота должна увеличиваться, повышая емкостную мощность $U_1^2 \omega C_K$ и снижая реактивную мощность нагрузки $U_1^2 / \omega L$. С уменьшением нагрузки следует соответственно снижать частоту. Необходимое для стабилизации выходного напряжения автоматическое регулирование частоты легко достигается введением в задающий генератор импульсов обратной связи по выходному напряжению. При этом не только стабилизируется внешняя характеристика инвертора, но одновременно полностью компенсируется влияние колебаний напряжения в контактной сети.

Следует подчеркнуть, что воздействие на напряжение путем изменения частоты можно использовать не только для улучшения внешней характеристики инвертора, но и для регулирования напряжения по заданному закону.

Таким образом, рассматриваемый инвертор свободен от основных недостатков обычного параллельного инвертора, что позволяет использовать его для преобразования постоянного тока на электровозах и моторных вагонах. Как уже было отмечено выше, возможны две системы такого преобразования в зависимости от того, выпрямляется ли или снова преобразовывается инвертированный ток.

В системе постоянно-постоянного тока переменный ток повышенной частоты выпрямляется посредством управляемых вентилях. Регулирование скорости тяговых двигателей осуществляется изменением угла открытия управляемых вентилях. В отличие от выпрямительных электровозов и моторных вагонов однофазного тока, где такая система управления привела бы к резкому снижению коэффициента мощности и дополнительному искажению кривой тока в тяговой сети, в рассматриваемой системе это регулирование не оказывает влияния на тяговую сеть, отделенную от выпрямителей инверторной установкой.

Для облегчения сглаживания пульсаций в первичной и вторичной цепях и уменьшения напряжения на вентилях выпрямителя целесообразно

применять трехфазное или шестифазное инвертирование. В случае трехфазного тока выпрямление может производиться как по трехфазной мостовой схеме, так и по схеме с двумя обратными звездами и уравнительным реактором.

Для осуществления рекуперативного торможения тяговые двигатели должны работать на инвертор, а выпрямитель включаться в тяговую сеть. При большой разнице в напряжениях контактной сети и тяговых двигателей осуществление подобного переключения связано с существенным усложнением всей схемы.

При системе постоянно-многофазного тока инвертированный ток преобразуется в многофазный (например, в трех- или шестифазный) более низкой частоты посредством статического преобразователя частоты. Этим током питаются синхронные или асинхронные тяговые двигатели, скорость вращения которых регулируется изменением частоты.

Более простое непосредственное питание бесколлекторных тяговых двигателей от инвертора связано с трудностью регулирования его выходной характеристики, плохим использованием оборудования при работе в зоне низких частот, а также опасностью самовозбуждения асинхронных двигателей. Введение в систему преобразования тока промежуточного преобразователя частоты с непосредственной гибкой связью цепей переменного тока по частоте позволяет преодолеть указанные трудности, так как инвертирование постоянного тока производится на повышенной частоте, тяговые двигатели отделены от коммутирующих конденсаторов инвертора преобразователем частоты и в то же время коммутирующие конденсаторы участвуют в компенсации реактивной мощности асинхронных двигателей. Преобразование постоянного тока в многофазный ток регулируемой частоты и напряжения по системе инвертор — преобразователь частоты — двигатель можно осуществлять с трансформацией напряжения или в звене промежуточной повышенной частоты (между инвертором и преобразователем частоты), или на выходе преобразователя (между преобразователем частоты и двигателями).

Схемы первого типа позволяют получать на выходе практически любые желаемые частоты и тем самым производить частотный пуск как асинхронных, так и синхронных тяговых двигателей. В схемах второго типа включенный на выходе понижающий трансформатор органичивает зону низких частот, и поэтому в случае синхронных тяговых двигателей необходимо производить их асинхронный пуск с последующей синхронизацией путем некоторого снижения частоты подводящего к двигателям тока. Кроме того, эти схемы уступают схемам с трансформацией на повышенной частоте по весу и габаритам трансформатора.

Режим рекуперативного торможения сравнительно просто может быть осуществлен только в схемах второго типа с использованием синхронных двигателей. При этом напряжение тягового двигателя, работающего в режиме синхронного генератора, повышается трансформатором, выпрямляется вентилями преобразователя частоты и по-

дается в контактную сеть помимо вентиля инвертора. В остальных случаях для перевода электровоза в режим рекуперативного торможения требуется произвести в схеме существенные переключения. Так, при использовании асинхронных двигателей необходимо прежде всего обеспечить их возбуждение. Это может быть достигнуто за счет использования коммутирующих конденсаторов инвертора. В схемах с трансформацией напряжения в звене повышенной частоты, кроме обеспечения возбуждения двигателей, преобразователь должен быть переведен в режим повышения частоты, а инвертор — в режим выпрямления тока. Коммутация тока в вентилях преобразователя частоты, как и возбуждение асинхронных двигателей, осуществляется коммутирующими конденсаторами инвертора. Рекуперативное торможение возможно также и без конденсаторного возбуждения асинхронных двигателей, если преобразователь частоты перевести в режим инвертирования, а передачу энергии из звена повышенной частоты в контактную сеть производить через специальный управляемый выпрямитель. Однако такой способ связан с установкой на электровозе дополнительного оборудования.

Систему электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения следует использовать, в первую очередь, на грузонапряженных участках, электрифицированных при напряжении 3 кВ, на которых пропускная способность по условиям электроснабжения становится недостаточной. Единственным действенным способом усиления электроснабжения таких участков при сохранении напряжения 3 кВ является сооружение дополнительных тяговых подстанций, что связано, однако, со значительными затратами.

Наиболее просто и экономично осуществляется усиление электроснабжения путем повышения напряжения в контактной сети с 3 до 6 кВ, которое приблизительно в 4 раза снижает потери энергии и относительную потерю напряжения в тяговой сети. При таком увеличении напряжения может быть сохранена существующая контактная сеть, так как изоляция посредством двух изоляторов, применяемая при напряжении 3 кВ, вполне достаточна и при 6 кВ. Удвоение напряжения на тяговых подстанциях может быть произведено при сохранении установленных в настоящее время преобразовательных агрегатов проще всего путем последовательного соединения двух звезд вторичной обмотки трансформатора и соответствующих выпрямителей и снятия уравнительного реактора. При этом получается известная схема В. П. Вологодина, обеспечивающая шестифазное выпрямление. Более выгодным оказывается параллельное соединение одноименных фаз обеих звезд вторичной обмотки трансформатора и выпрямление по мостовой схеме, так как при этом в полтора раза сокращаются потери энергии во вторичной обмотке по сравнению со схемой с двумя обратными звездами и уравнительным реактором. Наконец, при увеличении напряжения только в 2 раза, т. е. до 6 кВ, оказывается возможным переоборудовать существующий электрический подвижной состав на повышенное напряжение.

Перевод существующих участков постоянного тока на более высокое, чем 6 кВ, напряжение, например 12 кВ, нецелесообразен, так как это потребовало бы переустройства контактной сети, замены преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях и создания нового электрического подвижного состава (размещение преобразователя постоянного тока 12 кВ на существующих электровозах и моторных вагонах вряд ли возможно). Кроме того, при напряжении 6 кВ, как будет показано ниже, значительно проще осуществляется стыкование с участками напряжением 3 кВ.

Повышение напряжения системы электроснабжения до 6 кВ не встречает принципиальных затруднений, поэтому нет необходимости подробно останавливаться на этом вопросе. Единственное, связанное с повышением напряжения затруднение заключается в отсутствии и сложности разработки быстродействующих автоматических выключателей постоянного тока на это напряжение. Поэтому придется изменить систему защиты, что облегчается отсутствием необходимости в сохранении постов автоматического секционирования, поскольку при удвоении напряжения в 2 раза уменьшаются токи нагрузки и вдвое увеличиваются токи короткого замыкания. Для обеспечения защиты тяговой сети без автоматических выключателей придется осуществить раздельную работу подстанционных агрегатов и отключать сначала при помощи сеточной защиты эти агрегаты, затем автоматическими разъединителями или контакторами отделять поврежденные участки, после чего повторно включать выпрямители.

Значительно большие трудности встречаются при переоборудовании электрического подвижного состава на 6 кВ. Они связаны с необходимостью установки на нем мощных статических преобразователей постоянного тока. Эту задачу оказалось возможным решить путем использования системы преобразования, основанной на принципе автотрансформатора, позволяющей значительно уменьшить необходимую мощность большинства элементов преобразователя.

Принципиальная схема питания тяговых двигателей по этой системе в режиме тяги приведена на рис. 3,а. Инвертор И включен последовательно с выпрямителем В, параллельно к которому подключена группа тяговых электродвигателей ТД,

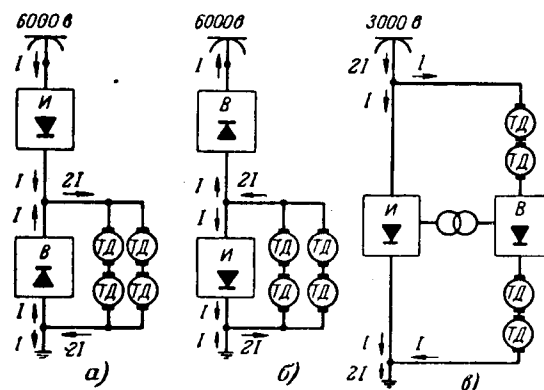


Рис. 3. Схемы питания тяговых двигателей электровоза от контактной сети напряжением 6 и 3 кВ.

рассчитанная на напряжение 3 кВ. При этом напряжении двигателей напряжение сети 6 кВ делится пополам между инвертором и выпрямителем. Ток двигателей также распределяется между выпрямителем и инвертором. На рис. 3,а показано распределение и направления токов в тяговом режиме при полном напряжении двигателей без учета потерь мощности в преобразователе. В этом случае половина тока двигателей поступает непосредственно из контактной сети через инвертор, а вторая половина течет в цепи выпрямителя. Менее благоприятно распределение токов во время пуска при малом напряжении на тяговых двигателях, когда основная часть тока двигателей поступает от выпрямителя. Однако в случае применения схем выпрямления с нулевыми анодами или им эквивалентных этот ток нагружает лишь вентили, а не обмотки трансформатора. Поэтому только вентили преобразователя должны быть рассчитаны на полную мощность электровоза или моторного вагона; трансформатор же и конденсаторы могут быть выбраны на значительно меньшую мощность. Как показало проектирование электровоза на 6 кВ, при этой системе удается снизить вес преобразователя более чем на $\frac{1}{3}$ и на 40% уменьшить потерю мощности в нем, что весьма существенно как для улучшения к. п. д., так и с точки зрения облегчения отвода выделяющегося в преобразователе тепла.

Принятая система преобразования позволяет просто осуществить рекуперативное торможение. Для этого необходимо лишь поменять местами выпрямитель В и инвертор И, как это показано на рис. 3,б. В этом случае инвертор инвертирует ток, получаемый от работающих в генераторном режиме тяговых двигателей, а выпрямитель работает в качестве вольтодобавочного агрегата, доводящего общее напряжение электровоза до 6 кВ. На рис. 3,б показано распределение токов при рекуперации так же, как и на рис. 3,а, без учета потерь мощности в преобразователе.

Электровоз может развивать половинную мощность на участках напряжением 3 кВ, если включить инвертор непосредственно на полное напря-

жение сети и питать тяговые двигатели от одного лишь выпрямителя. Возможна и работа электровоза на участках 3 кВ при полной мощности, но за счет более сложных переключений в силовой цепи электровоза. Для этого все четыре двигателя одной секции электровоза включаются последовательно и питаются сначала от выпрямителя В. После того как напряжение на двигателях достигло 3 кВ (т. е. 750 В на двигатель), они включаются на напряжение контактной сети последовательно с выпрямителем (рис. 3,в), регулируемое напряжение которого складывается с напряжением контактной сети.

На основе принципиальных схем, приведенных на рис. 4,а—в, СКБ по проектированию электровозов СНХ Грузинской ССР совместно с Московским энергетическим институтом разработан проект переоборудования серийного восьмиосного электровоза ВЛ8 постоянного тока, напряжением 3 кВ, мощностью 4 200 кВт на напряжение 6 кВ. Принципиальная силовая схема одной из двух четырехосных секций этого электровоза представлена на рис. 4.

Инверторная установка электровоза состоит из трех сдвинутых по фазе по отношению друг к другу на 120 эл. град однофазных инверторов, собранных из тиратронов по мостовой схеме. При этом на входе инверторов потребляется ток с шестифазными пульсациями небольшой амплитуды, которые благодаря их большой частоте легко сглаживаются простым фильтром, состоящим из индуктивности L_Φ и емкости C_Φ . Первичные обмотки T_{11} , T_{12} и T_{13} инверторных трансформаторов не имеют между собой электрических соединений, вторичные же обмотки образуют две звезды T_{21} , T_{22} , T_{23} и T'_{21} , T'_{22} , T'_{23} , каждая из которых рассчитана на питание двух параллельно соединенных тяговых двигателей ТД. Выпрямление тока производится по мостовой трехфазной схеме кремниевыми вентилями, половина которых является управляемыми. Благодаря тому, что каждая группа из двух параллельно включенных тяговых двигателей получает питание от самостоятельных обмоток трансформатора и выпрямительных мостов, обеспечивается постоянство напряжения на зажимах двигателей при боксовании, что значительно улучшает условия сцепления.

Так как колебания напряжения в контактной сети не влияют на напряжение, подведенное к тяговым двигателям, оно может быть принято не 1500 В, как на существующих электрических железных дорогах постоянного тока, а несколько более высоким: 1650—1700 В, что позволяет заметно повысить мощность и скорость электровоза. Такое повышение напряжения вполне допустимо, поскольку на участках постоянного тока с номинальным напряжением 3 кВ напряжение достигает 3,8 и даже 4 кВ, т. е. 2000 В на двигатель. Благодаря высокой частоте выпрямленного тока и шестифазному выпрямлению обеспечено практически полное сглаживание выпрямленного тока дросселями L_{d1} и L_{d2} .

Преимуществом шестифазного выпрямления

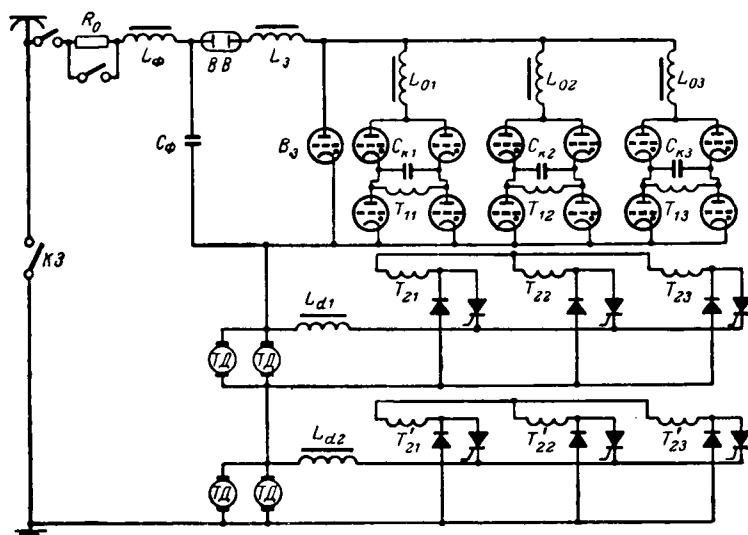


Рис. 4. Силовая схема секции электровоза на напряжение 6 кВ постоянного тока.

по мостовой схеме является также снижение в 1,5 раза обратного напряжения на вентилях по сравнению с однофазным выпрямлением. Вследствие этого, а также благодаря отсутствию колебаний напряжения на выходе инвертора количество последовательно включенных кремниевых вентиляей может быть принято по крайней мере вдвое меньшим, чем на электровозах однофазно-постоянного тока с тяговыми двигателями того же напряжения. Так как обеспечена быстродействующая защита при перегрузках и ограничена мощность короткого замыкания, может быть принят, кроме того, и меньший запас по току вентиляей. В результате необходимое количество кремниевых вентиляей для выпрямления тока получается примерно в 3 раза меньшим, чем в выпрямительном электровозе одинаковой мощности.

Управление скоростью производится регулированием напряжения путем изменения угла отпирания управляемых вентиляей выпрямителя. Благодаря тому, что только половина вентиляей является управляемой, схема обладает свойствами выпрямителя с нулевыми анодами — реактивный ток замыкается непосредственно через вентили и сглаживающие дроссели, не нагружая обмотки трансформатора.

При среднем напряжении на шинах тяговых подстанций 6,6 кВ и потере напряжения в тяговой сети порядка 5% среднее напряжение в контактной сети равно 6,3 кВ. Следовательно, если при полностью открытых вентиляях выпрямителя общее напряжение тяговых двигателей будет равно 3,3 кВ, входное напряжение инвертора составит 3 кВ. Во время пуска и движения с пониженными скоростями напряжения инвертора и выпрямителя перераспределяются, причем напряжение на входе инвертора изменяется от 6,3 до 3 кВ. Однако независимо от этого напряжение первичной обмотки трансформатора автоматически поддерживается неизменным, равным 7,5 кВ.

Пуск инверторов осуществляется вхолостую при полностью запертых выпрямителях через защитное сопротивление R_0 , замыкаемое накоротко после включения инверторов. После этого по мере уменьшения угла запаздывания открытия вентиляей повышается напряжение и уменьшается ток выпрямителя и соответственно уменьшается входное напряжение и увеличивается ток инверторов.

Для регулирования возбуждения тяговых двигателей целесообразно разделить обмотки возбуждения каждого из них на две и, оставив одну из них включенной последовательно в цепь двигателей, питать вторую независимо от специального трансформатора и управляемых вентиляей, плавно изменяющих н. с.

Весьма важными и трудными являются вопросы защиты электровоза от коротких замыканий и коммутационных перенапряжений.

При всех неполадках, происходящих в цепях электровоза, расположенных после инвертора, быстродействующая защита осуществляется путем прекращения подачи отпирющих импульсов на вентили инверторов. При срывах инвертирования защита обеспечивается открытием специального защитного вентиля B_3 . В цепи, состоящей из конден-

сатора C_Φ защитного дросселя L_3 с небольшой индуктивностью и защитного вентиля B_3 , возникает ток, перезаряжающий конденсатор C_Φ , после чего этот конденсатор, разряжаясь на инвертор, запирает его вентили. В это же время цепь инвертирования полностью разрывается вакуумным выключателем $ВВ$. Наконец, в случае отказа этой защиты вся силовая цепь электровоза закорачивается короткозамыкателем $КЗ$.

Перенапряжение, которое могло бы возникнуть при включении электровоза вследствие заряда емкости C_Φ , снимется благодаря защитному сопротивлению R_0 . Для уменьшения перенапряжения при запирании инвертора индуктивность L_Φ должна быть подобрана таким образом, чтобы запасаемая в ней энергия была невелика по сравнению с энергией конденсатора C_Φ .

Опытный электровоз постоянного тока напряжением 6 кВ должен быть построен в ближайшее время на Тбилисском электровозостроительном заводе на базе серийного электровоза ВЛ8. Схема этого опытного электровоза несколько отличается от схемы рис. 4. Выпрямление осуществляется в нем не по мостовой схеме кремниевыми вентилями, а шестью тиратронами при соединении вторичных обмоток трансформатора в две обратные звезды с уравнильным реактором. В качестве тиратронов как для инвертора, так и для выпрямителя используются разработанные заводом «Светлана» и кафедрой газоразрядных приборов Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина) металлические тиратроны на ток 85 а и напряжение 15 кВ. Для нулевых анодов будут применены неуправляемые кремниевые вентили.

Питание собственных нужд электровоза осуществляется не от отдельного инвертора мощностью в 100—150 кВт, как это намечалось при схеме рис. 4, а от соединенных в трехфазную звезду дополнительных обмоток инверторных трансформаторов, путем выпрямления трехфазного тока вспомогательными тиратронами на ток 40 а при напряжении постоянного тока 3 кВ. Электровоз рассчитан на работу при полной мощности не только при напряжении 6 кВ, но и при напряжении 3 кВ, для чего используется схема рис. 3, в. Наконец, в электровозе не предусмотрена рекуперация, которая невозможна в нем из-за отсутствия отдельного инвертора собственных нужд, необходимого для независимого возбуждения тяговых двигателей при рекуперации.

Опытный электровоз будет испытан при напряжениях постоянного тока 3 и 6 кВ. После этих испытаний можно будет вынести окончательное суждение о работоспособности, эксплуатационных качествах и дальнейших перспективах применения новой системы электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения.

Литература

1. Резолюция I Всесоюзной конференции по электрификации железнодорожного транспорта СССР, изд. Всесоюзного энергетического комитета, 1932.
2. Ситников М. М., Выбор системы тока для электрификации железных дорог СССР, Труды НИИ по электрификации железных дорог, «Ионные преобразователи», вып. 1, сб. 1, 1932.

Модифицированное изображение процессов в линейных ключевых схемах с мгновенным контактом и сложным фиксатором

Доктор техн. наук, проф. А. С. ШАТАЛОВ

Москва

В настоящей статье дается распространение методики модифицированного z -изображения импульсных процессов для ключей, формирующих импульсы сложной формы. На основе развиваемого метода параметрических преобразований изображений (λ -преобразований) получены общие формулы для детального расчета реакции линейной системы на последовательность импульсов произвольной формы и длительности.

Общие свойства рассматриваемой системы. Непрерывный сигнал $\varepsilon(t)$ преобразуется ключом в серию импульсов, продолжительность которых равна γT , где T — период повторения. Как показано на рис. 1, сигнал проходит через линейную систему, которой может служить, например, электрический контур. Ключ принят с идеализированными свойствами: а) в начале каждого такта он осуществляет мгновенный съем значения сигнала $\varepsilon(nT)$; б) на протяжении последующей рабочей части каждого периода γT по значению $\varepsilon(nT)$ формируется прямоугольный, треугольный или трапецидальный импульсы (рис. 2, а—в), зависящие от свойств формирующей части ключа.

Разработанная теория импульсных систем [Л. 1] позволяет изучить состояние системы в моменты времени, соответствующие началу каждого такта

$$t = nT$$

на основе z -изображений процессов, и в промежуточные моменты времени

$$t = nT - \kappa T \quad (0 \leq \kappa \leq 1)$$

по модифицированным z -изображениям.

В рассматриваемых в данной статье системах дополнительно учитывается произвольность заданной формы импульса и ограниченная продолжительность рабочей части периода γT . Кроме систем разомкнутого типа, примером которого служит рис. 1, будут рассмотрены также замкнутые системы.

Сигнал на выходе ключа. Прямоугольная формирующая часть. Согласно рис. 2, а на выходе ключа форма сигнала в l -м такте будет:

$$v_l = \varepsilon(lT) \{1 [t - lT] - 1 [t - (l + \gamma)T]\}. \quad (1)$$

Здесь использовано обозначение единичной смещенной функции, имеющей следующие ограничения:

$$1 [t - \vartheta] = 0 \quad \text{при } t < \vartheta; \quad (2)$$

$$1 [t - \vartheta] = 1 \quad \text{при } t > \vartheta. \quad (2a)$$

Изображение по Лапласу смещенных ступенчатых функций в одном такте составляет:

$$\varepsilon(lT) \left\{ \frac{e^{-lTp}}{p} - \frac{e^{-(l+\gamma)Tp}}{p} \right\} = \varepsilon(lT) e^{-lTp} \frac{1 - e^{-\gamma Tp}}{p}. \quad (3)$$

Суммируя по всем тактам $l = 0, 1, \dots, \infty$, получаем общее изображение

$$V^\perp(p) = E^\perp(p) \frac{1 - e^{-\gamma Tp}}{p}. \quad (3a)$$

Для решеток импульсов переход от изображения по Лапласу к его z -форме осуществляется путем элементарной подстановки

$$e^{Tp} = z; \quad (4)$$

$$E^\perp[z] = E^\perp(p) |_{e^{Tp}=z}. \quad (4a)$$

Для непрерывных функций и непрерывных операций переход от изображения по Лапласу к z -форме более сложен. Обозначим его символом $\lambda_p^z \{ \dots \}$, тогда получим:

$$V^\perp[z] = E^\perp[z] \lambda_p^z \left\{ \frac{1 - e^{-\gamma Tp}}{p} \right\}. \quad (4b)$$

Первый сомножитель в правой части z -изображения (4б) содержит информацию о выборке значений непрерывного процесса в начале каждого такта. Эти значения легко восстанавливаются по z -изображению

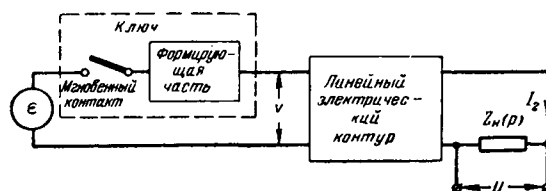


Рис. 1. Исследуемая электрическая схема.

3. Сидоров Н. Н., Применение ионных преобразователей для электрификации железных дорог, Труды НИИ по электрификации железных дорог, «Ионные преобразователи», вып. 1, сб. 1, 1932.

4. Дядьков А. М., К вопросу о выборе системы тока для электрификации железных дорог СССР, Труды ТЭМИИТ, вып. 2, 1941, т. 9.

5. Кантер И. И., Регулирование преобразователя постоянного тока без применения силового выпрямителя, Труды САДИ, сб. 12, 1953.

6. Каганов И. Л., Электронные и ионные преобразователи, ч. 3, изд-во «Энергия», 1956.

7. Stöhr M., Lokomotivsysteme für hochgespannten Gleichstrom, E und M, 1940, Н. 37/38, 39/40.

8. Розенфельд В. Е., Шевченко В. В. и Майбога В. А., Релаксационный инвертор, Авторское свидетельство № 124516 от 5 мая 1958.

9. Майбога В. А., Преобразование тока на электровазах постоянного тока высокого напряжения, Диссертация, МЭИ, 1959.

[22.4.1965]



простым делением. Так, для известного из таблиц z -изображения квадратичной функции

$$\frac{T^2 z(z+1)}{(z-1)^3} = T^2 \frac{z^2 + z}{z^3 - 3z^2 + 3z - 1}$$

непрерывное деление $z^2 + z$ на $z^3 - 3z^2 + 3z - 1$ дает:

$$z^{-1} + 4z^{-2} + 9z^{-3} + 16z^{-4} + 25z^{-5} + 36z^{-6} + \dots$$

Таким образом, получен ряд по степеням z^{-1} , коэффициенты при которых образуют выборку значений квадратичной функции $\left(\frac{t}{T}\right)^2$ в точках $t = lT$.

В промежуточных точках сигнал на выходе ключа постоянен или равен нулю:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(lT) \text{ при } lT < t < (l+\gamma)T; \quad (5)$$

$$\varepsilon(t) = 0 \text{ при } (l+\gamma)T < t < (l+1)T. \quad (5a)$$

Согласно принципу модифицированного z -изображения $V^\perp[z, \kappa]$ для определения сигнала в промежуточных точках вводится показанный на рис. 3 «импульс опроса», положение которого внутри каждого такта определяется смещением $(1-\kappa)T$ от начала такта или соответственно $-\kappa T$ от его конца.

Повторяя импульсы опроса на одном и том же месте, в каждом такте получаем решетку импульсов опроса (РИО). После умножения РИО на сформированный ключом сигнал получим модулированную сигналом решетку импульсов или модифицированное z -изображение сигнала

$$V^\perp[z, \kappa] = E^\perp[z] I[\kappa - \beta], \quad (6)$$

где

$$\beta = 1 - \gamma. \quad (6a)$$

Здесь снова использовано обозначение единичной смещенной функции для аргумента κ , для которого

$$I[\kappa - \beta] = 0 \text{ при } \kappa < \beta; \quad (7)$$

$$I[\kappa - \beta] = 1 \text{ при } \kappa > \beta. \quad (7a)$$

Кроме этого ограничения, само смещение имеет ограниченную область значений

$$0 < \kappa < 1. \quad (7b)$$

Треугольная формирующая часть. Согласно рис. 2, б форма сигнала в l -м такте будет:

$$v_l = \varepsilon(lT) \left\{ \frac{[t-lT]}{\gamma T/2} - 2 \frac{\left[t - \left(l + \frac{\gamma}{2}\right)T\right]}{\gamma T/2} + \frac{[t - (l+\gamma)T]}{\gamma T/2} \right\}. \quad (8)$$

Здесь применено обозначение смещенных линейных для зоны $t > \gamma T$ функций $[t - \gamma T]$ и равных нулю при $t < \gamma T$.

Изображение по Лапласу всего процесса

$$V^\perp(p) = E^\perp(p) 2 \frac{1 - 2e^{-\frac{\gamma T p}{2}} + e^{-\gamma T p}}{\gamma T p^2}. \quad (9)$$

Отсюда следует z -форма

$$V^\perp[z] = E^\perp[z] \frac{2}{\gamma T} \lambda_p^z \left(\frac{1 - 2e^{-\frac{\gamma T p}{2}} + e^{-\gamma T p}}{p^2} \right). \quad (10)$$

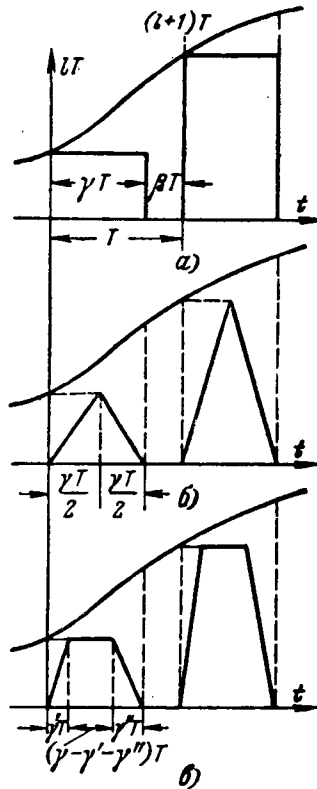


Рис. 2. Условия формирования импульсов.

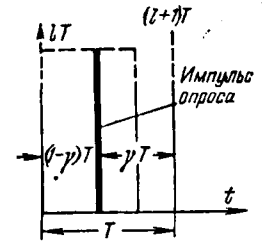


Рис. 3. Обозначение положения «импульса опроса».

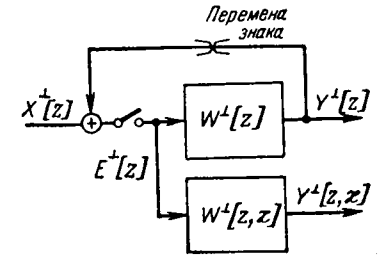


Рис. 4. Структура замкнутой системы.

Модифицированное z -изображение сигнала для рассматриваемого типа ключа имеет вид:

$$V^\perp[z, \kappa] = E^\perp[z] 2 \frac{[x - \beta] - 2 \left[x - \beta - \frac{\gamma}{2}\right]}{\gamma}. \quad (11)$$

Трапецидальная формирующая часть. Для формы сигнала в l -м такте, показанной на рис. 2, в,

$$V_l = \varepsilon(lT) \left\{ \frac{[t-lT]}{\gamma' T} - \frac{[t - (l+\gamma')T]}{\gamma' T} - \frac{[t - (l+\gamma-\gamma'')T]}{\gamma'' T} + \frac{[t - (l+\gamma)T]}{\gamma'' T} \right\} \quad (12)$$

нетрудно получить изображение по Лапласу всей последовательности таких импульсов:

$$V^\perp(p) = E^\perp(p) \times \frac{\frac{1}{\gamma'} - \frac{1}{\gamma'} e^{-\gamma' T p} - \frac{1}{\gamma''} e^{-(\gamma-\gamma'') T p} + \frac{1}{\gamma''} e^{-\gamma T p}}{T p^2}. \quad (13)$$

Далее переходим к z -изображению

$$V^\perp[z] = E^\perp[z] \times \lambda_p^z \left(\frac{\gamma'' - \gamma' e^{-\gamma' T p} - \gamma' e^{-(\gamma-\gamma'') T p} + \gamma' e^{-\gamma T p}}{\gamma' \gamma'' T p^2} \right) \quad (14)$$

и к модифицированному z -изображению

$$V^\perp[z, \kappa] = E^\perp[z] \times \frac{[x - \beta] \gamma' - [x - (\beta + \gamma'')] \gamma' - [x - (\beta + \gamma - \gamma'')] \gamma''}{\gamma' \gamma''}. \quad (15)$$

Сигнал на выходе электрического контура. Разложение объединенной операторной функции передачи контура на парциальные функции. Обозначим

проходную проводимость контура $\Pi(p)$, понимая ее согласно рис. 1 как отношение

$$\Pi(p) = \frac{I_2(p)}{V(p)}. \quad (16)$$

Тогда отношение напряжений на нагрузке и на входе контура в операторной форме

$$\frac{U(p)}{V(p)} = \Pi(p) Z_n(p) \quad (16a)$$

будет определять операторную функцию передачи нагруженного контура по напряжениям.

Далее следует учесть, что согласно формулам (46), (10), (14) формирующая часть ключа вносит в передаточную функцию дополнительно одно или два интегрирующих звена. Принимая в общем случае r дополнительных интегрирующих звеньев $\left(\frac{1}{p^r}\right)$, получаем объединенную операторную функцию передачи (ОФП) контура в виде

$$W(p) = \frac{\Pi(p) Z_n(p)}{p^r} = \frac{b(p)}{a(p)}, \quad (16b)$$

где $b(p)$ — произведение полиномов числителей дробей $\Pi(p)$ и $Z_n(p)$;

$a(p)$ — произведение полиномов в знаменателе этих же дробей с учетом добавочного множителя p^r .

Полагая полюсы объединенной ОФП как вещественными (в том числе и нулевыми) η_i -кратностью r_i+1 , так и комплексными $\eta_k \pm j\Omega_k$ -кратностью ρ_k+1 , можно получить [Л. 2] формулу разложения ОФП на парциальные функции в виде

$$W(p) = \frac{b(p)}{a(p)} = \sum_{(i)} \frac{\partial^{r_i}}{r_i! \partial \eta_i^{r_i}} \left[\frac{b(\eta_i)}{d_i(\eta_i)(p - \eta_i)} \right] + \\ + \sum_{(k)} \frac{1}{2^{\rho_k} \rho_k! \Omega_k^{\rho_k+1}} \times \\ \times \frac{\partial^{\rho_k}}{\partial \eta_k^{\rho_k}} \left\{ \operatorname{Im} \left[\frac{b(\eta_k + j\Omega_k)}{(j)^{\rho_k} d_k(\eta_k + j\Omega_k)(p - \eta_k - j\Omega_k)} \right] \right\}, \quad (17)$$

где $d_i(\eta_i)$, $d_k(\eta_k + j\Omega_k)$ получаются из полинома $a(p)$ при сокращении сомножителей в виде кратных корней $(p - \eta_i)^{r_i}$, $[(p - \eta_k)^2 + \Omega_k^2]^{\rho_k}$ и последующей подстановке $p = p_i$, что может быть записано в форме предельных переходов

$$d_i(\eta_i) = \lim_{p \rightarrow \eta_i} \frac{a(p)}{(p - \eta_i)^{r_i}}; \quad (17a)$$

$$d_k(\eta_k + j\Omega_k) = \lim_{p \rightarrow \eta_k + j\Omega_k} \frac{a(p)}{[(p - \eta_k)^2 + \Omega_k^2]^{\rho_k}}. \quad (17b)$$

Модифицированные z -изображения для типовой парциальной функции передачи. В формуле (17) под знаком ряда преобразований находятся операторные ядра $\frac{1}{p - \eta_i}$ или $\frac{1}{p - \eta_k - j\Omega_k}$ со своими коэффициентами. Достаточно проанализировать работу ключа на эти типовые звенья, чтобы потом все преобразования, содержащиеся в формуле (17), применить к полученным парциальным реакциям.

Для ключа с прямоугольной формирующей частью реакция Y на выходе звена с парциальной ОФП $1/(p - \eta_i)$ согласно (46) будет:

$$Y_i[z] = E^\perp[z] \lambda_p^z \left\{ \frac{1 - e^{-\gamma T p}}{p - \eta_i} \right\}. \quad (18)$$

Второй сомножитель в этой формуле служит z -изображением парциальной весовой функции

$$W_i^\perp[z] = \lambda_p^z \left\{ \frac{1 - e^{-\gamma T p}}{p - \eta_i} \right\}. \quad (19)$$

Для того чтобы записать ее в модифицированной форме, надо отдельно установить условия получения выборки значений функции

$$e^{\eta_i t} \leftarrow \frac{1}{p - \eta_i} \quad (19a)$$

и функции

$$e^{\eta_i (t - \gamma T)} \leftarrow \frac{e^{-\gamma T p}}{p - \eta_i} \quad (19b)$$

в точках, соответствующих местоположению импульса опроса. Возвращаясь снова к рис. 3, видим, что для функции (19a) первый импульс опроса выделит ординату

$$e^{\eta_i (1-x)T},$$

а импульсы опроса в последующих тактах выявят ординаты экспоненциальной функции (19a) с этим масштабом. Эту решетку импульсов можно записать в форме модифицированного z -изображения в виде

$$\lambda_p^{zx} \left\{ \frac{1}{p - \eta_i} \right\} = \frac{e^{\eta_i (1-x)T}}{z - e^{\eta_i T}}. \quad (20)$$

Для функции (19b) первый импульс опроса выделит ординату

$$e^{\eta_i (\beta-x)T},$$

а вся решетка импульсов получит новое z -изображение

$$\lambda_p^{zx} \left\{ \frac{e^{-\gamma T p}}{p - \eta_i} \right\} = \frac{e^{\eta_i (\beta-x)T}}{z - e^{\eta_i T}}. \quad (20a)$$

Таким образом, в целом для парциальной весовой функции (19) ее модифицированная z -форма будет:

$$W_i^\perp[z, \kappa] = \lambda_p^{zx} \left\{ \frac{1 - e^{-\gamma T p}}{p - \eta_i} \right\} = \\ = \frac{e^{\eta_i (1-x)T} - e^{\eta_i (\beta-x)T}}{z - e^{\eta_i T}}. \quad (20b)$$

Точно так же для комплексного показателя экспоненциальной функции получаем модифицированное z -изображение в виде

$$W_k^\perp[z, \kappa] = \lambda_p^{zx} \left\{ \frac{1 - e^{-\gamma T p}}{p - \eta_k - j\Omega_k} \right\} = \\ = \frac{e^{(\eta_k + j\Omega_k)(1-x)T} - e^{(\eta_k + j\Omega_k)(\beta-x)T}}{z - e^{\eta_k T}}. \quad (20b)$$

Для ключа с трапецеидальной формирующей частью, как видно из формулы (14), имеются четыре типа смещения возбуждающих импульсов в каждом такте 0 , γT , $(\gamma - \gamma')T$, γT . Учитывая новые интервалы между этими импульсами и импульсом опроса, получаем модифицированные z -изображения для парциальных ОФП:

$$W_i^\perp[z, \kappa] = \lambda_p^{z\kappa} \left\{ \frac{\gamma'' - \gamma'' e^{-\gamma' T p} - \gamma' e^{-(\gamma - \gamma'') T p} + \gamma' e^{-\gamma T p}}{\gamma' \gamma'' T (p - \eta_i)} \right\} =$$

$$= \frac{\gamma'' \exp \{[1 - \kappa] \eta_i T\} - \gamma'' \exp \{[1 - \gamma' - \kappa] \eta_i T\} - \gamma' \exp \{[\beta + \gamma'' - \kappa] \eta_i T\} + \gamma' \exp \{[\beta - \kappa] \eta_i T\}}{\gamma' \gamma'' T [z - \exp(\eta_i T)]}; \quad (21)$$

$$W_k^\perp[z, \kappa] = \lambda_p^{z\kappa} \left\{ \frac{\gamma'' - \gamma'' e^{-\gamma' T p} - \gamma' e^{-(\gamma - \gamma'') T p} + \gamma' e^{-\gamma T p}}{\gamma' \gamma'' T (p - \eta_k - j\Omega_k)} \right\} =$$

$$= \frac{\gamma'' \exp \{[1 - \kappa] (\eta_k + j\Omega_k) T\} - \gamma'' \exp \{[1 - \gamma' - \kappa] (\eta_k + j\Omega_k) T\} - \gamma' \exp \{[\beta + \gamma'' - \kappa] (\eta_k + j\Omega_k) T\} + \gamma' \exp \{[\beta - \kappa] (\eta_k + j\Omega_k) T\}}{\gamma' \gamma'' T [z - \exp(\eta_k + j\Omega_k) T]}. \quad (21a)$$

Напомним, что все смещенные функции $\exp[\xi - \kappa] \eta T$ при $\kappa > \xi$ становятся равными нулю.

Для ключа с треугольной формирующей частью в формулах (21) следует положить $\gamma' = \gamma'' = \frac{\gamma}{2}$.

Модифицированные z -изображения общей ОФП и выходного сигнала. Получив условия перехода к модифицированным z -формам, для парциальных ОФП следует ввести их z -изображения в формулу (17) и проделать все преобразования над операторными ядрами, предусмотренные этой формулой. Так, для ключа с прямоугольной формирующей частью получим:

$$W^\perp[z, \kappa] = \sum_{i=1}^s \frac{\partial^{r_i}}{r_i! \partial \eta_i^{r_i}} \left\{ \frac{b(\eta_i)}{d_i(\eta_i)} \times \right.$$

$$\times \frac{\exp \{[1 - \kappa] \eta_i T\} - \exp \{[\beta - \kappa] \eta_i T\}}{z - \exp(\eta_i T)} \Big\} +$$

$$+ \sum_{k=s+1}^m \frac{1}{2^{p_k} \rho_k! \Omega_k^{p_k+1}} \frac{\partial^{p_k}}{\partial \eta_k^{p_k}} I_m \left\{ \frac{b(\eta_k + j\Omega_k)}{d_k(\eta_k + j\Omega_k)} \times \right.$$

$$\times \frac{\exp \{[1 - \kappa] (\eta_k + j\Omega_k) T\} - \exp \{[\beta - \kappa] (\eta_k + j\Omega_k) T\}}{z - \exp[(\eta_k + j\Omega_k) T]} \Big\}. \quad (22)$$

После выполнения всех операций, предусмотренных формулами, и приведения слагаемых к общему знаменателю будет получена сложная дробь вида

$$W^\perp[z, \kappa] = \frac{u_m(z) z^m + u_{m-1}(z) z^{m-1} + \dots + u_0(z)}{v_n z^n + v_{n-1} z^{n-1} + \dots + v_0}. \quad (23)$$

При заданном входном процессе

$$E^\perp[z] = \frac{q_k z^k + q_{k-1} z^{k-1} + \dots + q_0}{h_l z^l + h_{l-1} z^{l-1} + \dots + h_0} \quad (24)$$

получаем модифицированное z -изображение реакции

$$U^\perp[z, \kappa] = W^\perp[z, \kappa] E^\perp[z]. \quad (25)$$

Далее, задаваясь конкретным значением κ , можно получить все коэффициенты полиномов числителя (25) и осуществить непрерывное деление, которое дает выборку значений реакции на выходе в точках приложения импульсов опроса. Меняя κ от 0 до 1, можно получить детальное представление о выходном процессе. Следует напомнить, что для значений $0 < \kappa < \beta$ в модифицированном изображении (22) участвуют все функции. Для интервала $\beta < \kappa < 1$ функции, содержащие сомножителями $\exp\{[\beta - \kappa] \eta_i T\}$ и $\exp\{[\beta - \kappa] (\eta_k + j\Omega_k) T\}$, равны нулю, поэтому при преобразованиях коэффициентов необходимо предостеречь от ошибочного объединения функций с различным смещением.

Для ключа с трапецеидальной формирующей частью из парциальных функций (21), (21a) формируем сумму, аналогичную (22), т. е.

$$W^\perp[z, \kappa] = \sum_{i=1}^s \frac{\partial^{r_i}}{r_i! \partial \eta_i^{r_i}} \left\{ \frac{b(\eta_i)}{d_i(\eta_i)} \frac{\gamma'' \exp \{[1 - \kappa] \eta_i T\} - \gamma'' \exp \{[1 - \gamma' - \kappa] \eta_i T\} - \gamma' \exp \{[\beta + \gamma'' - \kappa] \eta_i T\} + \gamma' \exp \{[\beta - \kappa] \eta_i T\}}{\gamma' \gamma'' T [z - \exp(\eta_i T)]} + \right.$$

$$+ \sum_{k=s+1}^m \frac{1}{2^{p_k} \rho_k! \Omega_k^{p_k+1}} \frac{\partial^{p_k}}{\partial \eta_k^{p_k}} I_m \left\{ \frac{b(\eta_k + j\Omega_k)}{d_k(\eta_k + j\Omega_k)} \times \right.$$

$$\times \frac{\gamma'' \exp \{[1 - \kappa] (\eta_k + j\Omega_k) T\} - \gamma'' \exp \{[1 - \gamma' - \kappa] (\eta_k + j\Omega_k) T\} - \gamma' \exp \{[\beta + \gamma'' - \kappa] \eta_i T\} + \gamma' \exp \{[\beta - \kappa] \eta_i T\}}{\gamma' \gamma'' T [z - \exp(\eta_k + j\Omega_k) T]} \Big\}. \quad (26)$$

Далее, при заданном входном процессе $E^\perp(z)$ после получения модифицированного z -изображения реакции (25) снова применяем операцию непрерывного деления числителя на знаменатель. При этом для различных смещений импульса опроса следует: в интервале $0 < \kappa < \beta$ учитывать все четыре функции в числителях суммы (26), в интервале $\beta < \kappa < \beta + \gamma''$ становятся равными нулю $\exp\{(\beta - \kappa)\eta_i T\}$ и $\exp\{(\beta - \kappa)(\eta_k + j\Omega_k T)\}$; в интервале $\beta + \gamma'' < \kappa < 1 - \gamma'$ становятся равными нулю также $\exp\{(\beta + \gamma'' - \kappa)\eta_i T\}$ и $\exp\{(\beta + \gamma'' - \kappa)(\eta_k + j\Omega_k T)\}$ и, наконец, в интервале $1 - \gamma' < \kappa < 1$ остаются только функции $\exp\{(1 - \kappa)\eta_i T\}$ и $\exp\{(1 - \kappa)(\eta_k + j\Omega_k T)\}$.

Процесс на выходе замкнутой однонаправленной системы. Для однонаправленных систем наложение обратной связи согласно рис. 4 не меняет передаточной функции разомкнутой цепи, поэтому переход к ОФП замкнутой системы осуществляется путем простых алгебраических преобразований. Как видно из формул (6а), (11), (15) и (25), о входном сигнале требуется информация только в виде выборки значений в моменты начала каждого такта.

После замыкания обратной связью сигнал на входе прямой цепи E будет:

$$E = X - Y. \quad (27)$$

Следовательно, о процессах X и Y требуется информация только о их значениях в начале каждого такта, т. е. в форме обычного z -изображения.

Тогда

$$E^\perp[z] = X^\perp[z] - E^\perp[z]W^\perp[z] \quad (27a)$$

или

$$E^\perp[z] = \frac{1}{1 + W^\perp[z]} X^\perp[z]. \quad (27б)$$

Когда сигнал известен в одной из точек замкнутой однонаправленной схемы, дальнейший его пересчет осуществляется простым умножением изображения сигнала на ОФП звеньев прямого тракта. При необходимости получения информации о значениях процесса в промежуточных точках умножение z -изображения (27б) производится на модифицированную функцию передачи (22) или (26) в зависимости от вида ключа. Это дает:

$$Y^\perp[z, \kappa] = \frac{W^\perp[z, \kappa]}{1 + W^\perp[z]} X^\perp[z]. \quad (28)$$

После приведения (28) к виду общей дроби осуществляется непрерывное деление полинома от z в числителе на полином от z в знаменателе и в частном определяется выборка значений процесса Y в точках приложения импульсов опроса. Изменяя κ для получения новых точек, следует учитывать только те смещенные функции в числителе дробей, входящих в суммы (22) и (26), которые не равны нулю.

Выводы. Изучение реакции линейных систем на последовательность импульсов с учетом их формы и изменения масштаба (интенсивности) во временной области является сложной и трудоемкой задачей.

Переход к z -изображениям дает запись реакции в замкнутой форме и на основе принципа непрерывного деления позволяет развернуть z -изображение в ряд, коэффициенты которого являются выборкой значений реакции в начале каждого такта.

Реакция в промежуточных точках определяется по аналогичной процедуре на основе модифицированного z изображения.

При сложной формирующей части ключа предлагается метод определения парциальных модифицированных z -функций передачи для операторного ядра с одним вещественным (19а) или комплексным (19б) полюсом с последующим переходом на основе операций дифференцирования по параметру для кратных полюсов, выделения мнимой части для комплексных полюсов с приравниванием η нулю для нулевых полюсов и суммирования с необходимыми масштабами.

Вся эта операция перехода от парциальной функции в виде вещественной или комплексной экспоненты \bar{e} к полной весовой функции W может быть записана одним символом лямбда-преобразования λ_e^w , развиваемым нами в работе [Л. 2].

Предлагаемая методика позволяет изучить работу схем с фиксаторами произвольной сложности.

Литература

1. Цыпкин Я. З., Теория линейных импульсных систем, Физматгиз, 1963.
2. Шаталов А. С., Структурные методы в теории управления и электроавтоматике, Госэнергоиздат, 1962.

[11.3.1965]



Основные направления развития автоматизированного электропривода в химической промышленности¹

Кандидат техн. наук Г. Б. ОНИЩЕНКО и инж. М. Л. САМОВЕР

Москва

Одной из важнейших задач экономики нашей страны является ускоренное развитие химической промышленности с целью полного удовлетворения возрастающих потребителей промышленности и сельского хозяйства в химической продукции. В связи с этим большие задачи стоят в области электрификации предприятий химической индустрии.

Вопросы электрификации имеют особенно важное значение в связи с большой энергоемкостью химического производства. В США на нужды химической промышленности расходуется столько же электроэнергии, сколько и на нужды металлургии; в ФРГ, Италии, Англии и Франции уже в 1961 г. химическая промышленность была наиболее энергоемкой. В нашей стране химические предприятия потребляют свыше 7% вырабатываемой электроэнергии.

Учитывая опережающие темпы роста, можно утверждать, что в ближайшее время химическая промышленность нашей страны также станет одной из наиболее энергоемких отраслей народного хозяйства. Установленная мощность многих новых и реконструируемых комбинатов будет составлять 250—500 Мвт. Большая часть потребляемой мощности ложится на электроприводную нагрузку. Ясно, что вопросам применения рациональных электроприводов в химической промышленности должно уделяться самое серьезное внимание, однако эти проблемы до последних лет не были предметом внимания наших ведущих электротехнических организаций.

Не следует полагать, что есть специальный химический электропривод. Особенности электропривода определяются в первую очередь теми требованиями, которые предъявляются к нему рабочими механизмами. Поэтому следует прежде всего определять приводы по классам рабочих механизмов и, говоря об особенностях электропривода той или иной отрасли народного хозяйства, следует говорить о преимущественном распространении в этой области механизмов того или иного класса. Имеются и другие особенности, определяющие специфичность требований для данной отрасли. К ним относятся: условия работы, окружающая среда, квалификация обслуживания и др.

Химическая промышленность имеет многоотраслевой характер. Такие производства, как азотно-туковые, синтетического спирта и каучука, по своему оборудованию и характеру технологических процессов существенно отличаются от производства искусственного волокна или резинотехнических заводов. Однако для отдельных отраслей и для всей химической промышленности в целом можно установить характерные классы механизмов и технологических процессов.

Анализ состава машин и механизмов, применяемых в большинстве отраслей химической промышленности,

показывает, что наибольший вес как по установленной мощности, так и по количеству единиц оборудования приходится на долю насосов, вентиляторов и компрессоров. До 7% мощности приходится на долю сантехнической вентиляции. К характерным для химической промышленности относятся также такие механизмы, как мешалки, питатели, транспортеры, фильтры.

Для привода этих механизмов в настоящее время применяются почти исключительно нерегулируемые приводы переменного тока. Только в шинной промышленности и для некоторых механизмов переработки пластмасс и полимеров применяются регулируемые электроприводы постоянного тока.

Для регулирования многих технологических процессов применяются механические устройства (вариаторы) либо гидравлические (задвижки, дроссели и др.). Многие процессы вообще не регулируются.

Опыт развития других, более старых отраслей промышленности показывает, что применение регулируемого электропривода ведет во многих случаях к улучшению качества продукции и повышению производительности труда. Регулируемый привод является основой комплексной автоматизации. При применении экономических систем регулируемого электропривода всегда сокращается расход электроэнергии. Некоторые зарубежные специалисты указывают, что необходимость применения в химической промышленности регулируемых электроприводов вызвана появлением процессов, требующих точного и автоматического регулирования. Следует отметить, что нашими организациями, занимающимися вопросами химической технологии, вообще не учитываются возможности регулируемых электроприводов для совершенствования и автоматизации технологических процессов, что, безусловно, тормозит прогресс в этой области.

Нужно, конечно, иметь в виду, что всегда регулируемый электропривод существенно дороже нерегулируемого и сложнее в эксплуатации. Поэтому вопрос о замене нерегулируемого привода регулируемым является предметом технико-экономического анализа, в котором должны учитываться все преимущества, которые дает регулируемый привод (повышение качества, производительности, снижение себестоимости продукции и др.). Если дополнительные затраты окупятся за достаточно короткий срок, следует ориентироваться на применение регулируемых электроприводов.

Ниже перечислены основные группы электроприводов, характерные для химической промышленности, и намечены направления работ по их развитию.

а) *Электропривод турбокомпрессоров.* Это наиболее мощные электроприводы; их мощность достигает в настоящее время 12 000 квт. Приводные двигатели высокоскоростные (3 000 или 1 500 об/мин). Как правило, для привода турбокомпрессоров применяются синхронные двигатели. Пути развития

¹ Статья печатается в порядке обсуждения.

электроприводов этих машин представляются следующими:

1. Увеличение единичной мощности до 18 000—25 000 *квт*, что позволит повысить производительность турбокомпрессоров и заменить паротурбинный привод, применяемый сейчас для сверхмощных машин, электрическим.

2. Разработка более совершенных по конструкции синхронных электродвигателей и схем их включения, обеспечивающих ресинхронизацию и повторное включение при кратковременных исчезновениях питающего напряжения, разработка систем автоматического регулирования реактивной мощности синхронных двигателей, обеспечивающих оптимальное использование последних.

Синхронные машины в химической промышленности являются основным (по установленной мощности) видом электродвигателей. Поэтому вопросы, связанные с совершенствованием синхронного электропривода, имеют практически важное значение не только для привода турбокомпрессоров, но и для других механизмов всех отраслей химического производства.

Большое значение имеет совершенствование систем возбуждения синхронных машин. Применение машинных возбудителей постоянного тока затрудняет взрывозащищенное или химостойкое исполнение приводов, снижает их надежность. Весьма перспективным представляется создание мощных синхронных двигателей со встроенными бесщеточными возбудителями и вращающимися выпрямителями. Другое перспективное направление — переход к полупроводниковым системам возбуждения, выполняемым в виде отдельного агрегата комплектно со станцией управления.

3. Большое народнохозяйственное значение имеет разработка регулируемых электроприводов мощных турбомеханизмов. Регулирование связано с необходимостью изменения производительности компрессоров в зависимости от требуемого количества перерабатываемого воздуха или газа. Единственным экономичным способом изменения производительности турбокомпрессоров является регулирование скорости вращения рабочего колеса. Требуемый диапазон регулирования невелик — примерно от 100 до 75% номинальной скорости. Поскольку мощность приводов велика, большое значение имеют энергетические показатели привода. Основное направление работ в этой области — создание каскадных схем асинхронного привода с высокими энергетическими показателями. Здесь перспективны два направления: либо привод с асинхронным двигателем в схемах двойного питания, либо асинхронные вентильные каскады с улучшенным коэффициентом мощности (например, с компенсированным инвертором).

Трудность создания таких приводов заключается в сложности выполнения асинхронных двигателей с контактными кольцами, обладающих высокой номинальной скоростью вращения (3 000 *об/мин*). Максимальная мощность двухполюсных асинхронных машин с контактными кольцами, выпускаемых в настоящее время, составляет 2 500 *квт*. Для создания более мощных электроприводов необходима

разработка новых конструктивных решений для асинхронных высокоскоростных машин.

б) *Привод поршневых компрессоров*. Эта группа приводов является основным потребителем электроэнергии на химических заводах. Применяются поршневые компрессоры как небольшой мощности (40—200 *квт*), так средней и большой мощности (до 5 000 *квт*). Крупные компрессоры оборудуются тихоходными синхронными электродвигателями специального исполнения. Привод малых компрессоров, как правило, осуществляется от асинхронных двигателей.

Основные направления совершенствования синхронного привода указывались выше при рассмотрении привода турбокомпрессоров. Ввиду большого распространения поршневых компрессоров в химической промышленности указанные направления имеют для этого класса приводов еще более важное значение.

В последнее время наметились тенденции к переходу на регулируемый электропривод и для поршневых компрессоров. Поршневые машины обычно имеют механические устройства для регулирования производительности (чаще всего воздействием на клапаны), однако этот способ регулирования имеет ряд недостатков, главные из которых: снижение надежности компрессоров вследствие ухудшения условий работы наиболее уязвимого узла машины — клапанов, ухудшение к. п. д. компрессоров при снижении производительности, недостаточная точность регулирования. Регулирование производительности путем изменения скорости вращения приводного электродвигателя свободно от этих недостатков.

Важным преимуществом регулируемого электропривода является возможность автоматического регулирования производительности с целью поддерживать постоянными заданные технические параметры. Например, автоматическое поддержание постоянства температуры холодильных установок, обслуживаемых поршневыми компрессорами, повышает качество продукции при производстве искусственного волокна. Экономический эффект от повышения качества продукции значительно превосходит те дополнительные затраты, которые необходимы для осуществления регулируемого электропривода. Требуемый диапазон регулирования скорости для поршневых машин составляет примерно 1:2. Наиболее перспективными видами регулируемого электропривода поршневых компрессоров представляются системы асинхронного вентильного и машинно-вентильного каскадов.

в) *Электропривод насосов*. Насосы различной мощности являются самым распространенным механизмом химической промышленности. Для их привода в настоящее время используются в большинстве случаев асинхронные двигатели с короткозамкнутым или фазным ротором.

Можно указать ряд направлений развития электропривода этих механизмов:

1. Создание моноблочных конструкций электронасосов, предназначенных для перекачки взрывоопасных жидкостей. Ряд таких конструкций создан нашими заводами; это прогрессивное конструктив-

ное направление следует распространить на большую группу насосных агрегатов.

2. Применение синхронных электродвигателей для приводов мощных насосов, что позволит повысить энергетические показатели приводов.

3. Применение регулируемого электропривода в тех случаях, когда нужно регулировать количество жидкости, перекачиваемой насосом.

Использование при этом регулируемого электропривода обеспечит дистанционное или автоматическое регулирование подачи жидких материалов в реакционные емкости либо циркуляцию жидкости с нужной скоростью. Регулирование производительности насосов может явиться основой для комплексной автоматизации некоторых технологических процессов в химическом производстве. Для насосов требуется весьма небольшой диапазон регулирования скорости (100—75%), поэтому для приводов небольшой мощности возможно применение неэкономичных систем регулирования, таких, как дроссельное управление. Для насосов большой мощности применимы те же рекомендации, что и для мощных турбокомпрессоров.

г) *Электропривод вентиляторов.* На предприятиях химической промышленности устанавливается большое количество относительно маломощных вентиляторов сантехнических установок с приводом от асинхронных короткозамкнутых двигателей. Мощные вентиляторы используются в химической промышленности главным образом для охлаждения воды в градирнях вентиляторного типа. Здесь применяются вентиляторы мощностью до 1000 кВт с регулируемым электроприводом. Регулирование в диапазоне 1:2 необходимо для поддержания постоянной температуры воды на выходе из градирни. Большинство зарубежных вентиляторов градирен оборудуется нерегулируемым электроприводом в сочетании с регулируемой гидромuftой. Нам представляется целесообразным с учетом большой мощности этих установок применение экономичных систем регулируемого электропривода, в частности, асинхронного вентильного каскада.

д) *Приводы питателей, мешалок, фильтров и других механизмов.* В технологических линиях химической промышленности имеется большое число механизмов относительно небольшой мощности (обычно до 50 кВт), выполняющих различные функции. К ним в первую очередь относятся питатели и мешалки. Питатели, т. е. механизмы, подающие сырье или другие материалы в реакционные емкости, дозаторы, смесители, печи и т. д., по своему назначению должны иметь средства для регулирования производительности. Применяемые сейчас питатели либо не регулируются, либо снабжаются механическими устройствами для регулирования. Наиболее рациональным решением, повышающим производительность установок и дающим основу для их комплексной автоматизации, является применение питателей с регулируемым электроприводом. Так, при автоматизации цеха кальцинированной соды на Славянском химкомбинате потребовалась замена нерегулируемого электропривода на регулируемый на 50 механизмах типа питателей, выгрузателей, фильтров и т. п.

В настоящее время на многих химических заводах дозировка и смешивание производятся циклически, т. е. исходные продукты взвешиваются в определенных дозах, затем загружаются в смесительные барабаны и в течение нескольких часов смешиваются. Этот сложный и малопроизводительный процесс может быть заменен непрерывной дозировкой с помощью питателей, равномерно подающих исходные продукты в общий бункер.

Дозирование в нужной пропорции осуществляется изменением производительности питателей. Для этого требуется, чтобы питатели имели регулируемый привод с системой автоматического регулирования. Переход к непрерывному дозированию, не говоря уже о существенном увеличении производительности агрегатов, позволит сэкономить только на кемеровском заводе «Карболит» 2 млн. кВт·ч электроэнергии в год. Этот пример показывает, что в некоторых случаях применение регулируемого электропривода ведет к прогрессивному изменению технологии производства.

Большое значение имеет применение регулируемого электропривода для мешалок реакционных емкостей; это одно из действенных средств управления химическими процессами. Регулируемые приводы необходимы для мешалок, применяемых в производстве различных полимеров эмульсионным способом. Применение регулирования позволяет существенно улучшить качество продукции.

Регулируемый электропривод необходим для различного рода фильтров, сепараторов и других подобных механизмов, применение которых в химической промышленности носит массовый характер. Для удовлетворения потребностей в таких приводах необходима разработка регулируемых электроприводов с питанием от сети переменного тока мощностью до 125 кВт с дистанционным регулированием в диапазоне 1:5 в общепромышленном, химостойком и взрывозащищенном исполнении. Представляется целесообразным применение здесь таких систем привода, как асинхронный вентильный каскад с управляемыми кремниевыми выпрямителями, однокорпусный машинно-вентильный каскад, привод с двигателем постоянного тока с питанием от управляемых кремниевых выпрямителей, приводы с электромагнитными муфтами скольжения. Для приводов малой мощности в химостойком и взрывозащищенном исполнении перспективен дроссельный привод с асинхронным двигателем с индукционным сопротивлением.

Своеобразные требования предъявляются к электроприводу центрифуг. Здесь нужны высокоскоростные двигатели, обеспечивающие несколько рабочих скоростей вращения и одну низкую загрузочную скорость. Обычно для центрифуг применяют многоскоростные асинхронные двигатели. Для суперцентрифуг необходима разработка высококачественных двигателей с максимальной скоростью до 50 000 об/мин.

е) *Электропривод механизмов для производства искусственного волокна.* Отличительной особенностью этого производства с точки зрения требований к электроприводу является применение электроверетен, требующих источников питания повы-

шенной частоты. Основной задачей в создании совершенных систем электропривода станков для скручивания, прядения и обработки нитей является разработка простых, надежных преобразователей частоты с выходной частотой 133 гц и допускающих регулирование частоты в широком диапазоне. Мощность преобразователей, питающих группы станков, доходит до 600 ква. Наиболее прогрессивные технические решения связаны с применением статических преобразователей инверторного типа с использованием ионных или полупроводниковых приборов.

ж) *Электропривод механизмов для производства пластмасс.* Электроприводы для производства и переработки пластмасс и полимерных материалов отличаются большим разнообразием и в некоторых случаях предъявляют сложные требования. Например, механизмы для производства полимерных пленок или полиуретана требуют согласованного вращения ряда приводных двигателей с высокой точностью поддержания заданной скорости. Как правило, такие приводы выполняются на постоянном токе или на переменном с групповым частотным регулированием.

Характерными механизмами для производства пластмасс являются шнек-прессы и грануляторы. Привод этих механизмов мощностью до 200 кВт требует регулирования скорости в диапазоне 1:10 и выполняется в настоящее время на постоянном токе по системам МУ—Д или Г—Д. Перспективным направлением в этой области является переход на питание двигателей постоянного тока от преобразователей на управляемых кремниевых выпрямителях.

з) *Электропривод механизмов и технологических линий шинных и резинотехнических заводов.* Наряду с большим количеством механизмов, имеющих нерегулируемый привод от асинхронных короткозамкнутых двигателей (форматоры-вулканизаторы, шприцмашины, транспортные установки, насосы, мешалки и др.) и от высоковольтных синхронных двигателей (вальцы, резиносмесители, грануляторы и др.), на шинных и резинотехнических заводах устанавливается оборудование, требующее плавного регулирования скорости в диапазоне до 1:10 с высокой точностью поддержания заданных величин. К такому оборудованию относятся кордные, протекторные, камерные и другие линии шинных заводов, а также линии для производства транспортерных лент, прорезиненных тканей и другой продукции.

Следует указать, что требования к электроприводу механизмов резинотехнической промышленности наиболее изучены, и в этой области замечен определенный прогресс. Регулируемые электроприводы выполняются на постоянном токе по системам УРВ—Д (каландры, шприцмашины), магнитный

усилитель—двигатель постоянного тока (МУ—Д), а также по системам Г—Д.

Для дальнейшего перспективного развития электропривода этих механизмов необходимо использование преобразователей на управляемых кремниевых выпрямителях, а также совершенствование систем автоматического регулирования электроприводов технологических линий.

и) *Сервоприводы трубопроводной арматуры* Большое место в химической промышленности занимают электрифицированные задвижки, клапаны и другая трубопроводная арматура. От надежности работы этих устройств, количество которых на химических комбинатах исчисляется тысячами, зависит успешная работа всего производства. Поэтому к сервоприводам трубопроводной арматуры предъявляют весьма жесткие требования в отношении надежности, простоты обслуживания, пригодности к автоматизации. В направлении повышения надежности этих электромеханических устройств должны быть проведены в ближайшие годы серьезные работы. Основной задачей является создание специальных двигателей, удовлетворяющих специфическим требованиям исполнительных устройств, а также надежной аппаратуры для управления этими двигателями.

Перечисленные классы механизмов и характерных для них типов электроприводов далеко не исчерпывают всего многообразия оборудования, используемого в химическом производстве, тем более, что появление новых видов химических продуктов ведет к созданию нового технологического оборудования и к появлению новых требований к электроприводам.

Обобщая сказанное, можно сформулировать следующие основные направления работ по развитию автоматизированного электропривода в химической промышленности.

1. Постоянное изучение потребностей химической промышленности в системах и средствах электропривода, определение требований к электроприводам различных механизмов, определение рациональных областей применения отдельных видов электроприводов.

2. Совершенствование синхронного электропривода и расширение области его применения, повышение надежности синхронных машин и схем их управления.

3. Расширение области применения регулируемых электроприводов в химической промышленности, переход в экономически оправдываемых случаях на регулируемый привод компрессоров, вентиляторов, насосов, питателей, мешалок и других механизмов; разработка с этой целью регулируемых экономичных приводов переменного тока.

[12.4.1965]



Диэлектрическая проницаемость неупорядоченных неоднородных сред

Инж. Б. В. ВАНИН

ВНИИЭ

Неоднородные системы играют большую роль в самых различных областях науки и техники. Это в особенности относится к таким отделам науки, как физика диэлектриков, геофизика, биофизика, физическая химия и реология. В технике с неоднородными веществами приходится встречаться несравненно чаще, чем с однородными. В частности, такие распространенные материалы, как сплавы, пластмассы, керамика, многие электроизолирующие и теплоизолирующие материалы, являются неоднородными веществами.

Важное теоретическое и практическое значение имеет задача об определении физических свойств неоднородного вещества на основании данных о его составе и физических свойствах его компонент. Для решения этой задачи предлагались различные формулы, связывающие свойства неоднородной системы со свойствами ее компонент, но до сих пор нет полной ясности относительно того, какие из многочисленных попыток решения данной задачи перспективны и в какой мере.

В статье приводятся основные результаты исследования известных методов расчета средних характеристик неупорядоченных неоднородных систем.

Методы вычисления средней диэлектрической проницаемости. Неупорядоченные неоднородные системы принято [Л. 1] делить на ячеистые системы (рис. 1), которые в свою очередь могут быть подразделены на 1) матричные системы, 2) суспензии и 3) порошки (укладки), и на смеси, в которых важную роль играют статистические смеси.

Не представляет труда записать в общем виде формулу для ε — средней диэлектрической проницаемости n -компонентной неоднородной системы [Л. 2]:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{k=1}^n \theta_k f_k \varepsilon_k}{\sum_{k=1}^n \theta_k f_k}, \quad (1)$$

где θ_k , ε_k — объемная концентрация и диэлектрическая проницаемость k -й компоненты;

f_k — отношение средней по объему, занятому k -й компонентой, напряженности поля к средней по всему объему образца напряженности макроскопически однородного поля.

Однако воспользоваться формулой (1) для вычисления ε непосредственно нельзя, так как коэффициенты f_k еще требуют определения. Известен ряд приближенных методов вычисления ε , в которых эта трудность тем или иным способом обходится:

- 1) метод эквивалентного эллипсоида;
- 2) метод интегрирования;
- 3) метод сечений;

4) метод пробных функций;

5) метод противопоставления.

Анализ показывает, что первый метод, строго говоря, относится к матричным системам, допускающим разбиение на двухслойные включения, ограниченные поверхностями одинаково ориентированных софокусных эллипсоидов и имеющие одно и то же значение эквивалентной диэлектрической проницаемости, которое в этом случае оказывается равным искомой средней диэлектрической проницаемости системы.

Формула для диэлектрической проницаемости n -й компонентной системы при этом имеет вид [Л. 3]:

$$\varepsilon = \varepsilon_n \frac{1 + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\theta_k (\varepsilon_k - \varepsilon_n) (1 - F'_k)}{\varepsilon_n + (\varepsilon_k - \varepsilon_n) F_k}}{1 - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\theta_k (\varepsilon_k - \varepsilon_n) F'_k}{\varepsilon_n + (\varepsilon_k - \varepsilon_n) F_k}}, \quad (2)$$

где ε_n — диэлектрическая проницаемость связанной компоненты;

θ_k , ε_k — объемная концентрация и диэлектрическая проницаемость k -й дисперсной компоненты;

F_k — коэффициент деполяризации внутреннего эллипсоида;

F'_k — коэффициент деполяризации внешнего эллипсоида.

Формула (2) включает в себя как частные случаи ряд формул, известных из литературы, в том числе формулы Силларса [Л. 4], Максвелла [Л. 5] и Корнеевко [Л. 6], выведенных путем, отличным

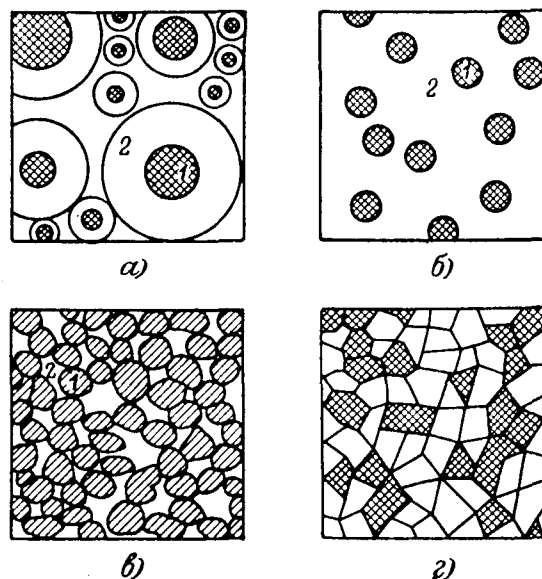


Рис. 1. Неупорядоченные неоднородные системы.
а — матричная система; б — суспензия; в — порошок; г — статистическая смесь. 1 — дисперсная компонента; 2 — связанная компонента.

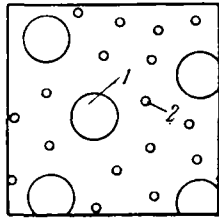


Рис. 2. Система, образуемая последовательным введением порций частиц уменьшающегося размера.
1 — частица, принадлежащая к первой порции; 2 — частица, принадлежащая ко второй порции.

от указанного здесь. Привлечение представления об эквивалентном эллипсоиде позволяет выяснить точный физический смысл этих формул и метода вычисления в целом.

Метод интегрирования [Л. 7] был предложен для вычисления средней диэлектрической проницаемости систем типа суспензий при не очень малых концентрациях диспергированного вещества. В действительности этот метод расчета дает диэлектрическую проницаемость не суспензии, а некоторой системы, образованной последовательным вложением одна в другую матричных систем с небольшими порциями включений в каждой из них, причем размеры включений быстро убывают от порции к порции (рис. 2).

Метод сечений опирается на вывод из общих теорем электростатики [Л. 8], заключающийся в том, что рассечение системы на слои проводящими поверхностями не уменьшает диэлектрическую проницаемость, в то время как подразделение системы на трубки с абсолютно изолирующими стенками не увеличивает ее. При помощи такого приема нетрудно показать, например, что диэлектрическая проницаемость ϵ любой неоднородной системы заключена в пределах

$$\epsilon_{sn} \leq \epsilon \leq \epsilon_{pn}, \quad (3a)$$

где

$$\frac{1}{\epsilon_{sn}} = \sum_{k=1}^n \frac{\theta_k}{\epsilon_k}, \quad (3б)$$

$$\epsilon_{pn} = \sum_{k=1}^n \theta_k \epsilon_k. \quad (3в)$$

Метод пробных функций основывается на вариационном подходе к рассматриваемой задаче и дает возможность определить границы для диэлектрической проницаемости неоднородной системы более точно, чем это позволяет предыдущий метод. В частности, этим методом для изотропной неоднородной системы найдены [Л. 9] более точные предельные формы, чем (3а). Оказывается, что они совпадают с формулой (2), если положить $F_k = F'_k = \frac{1}{3}$, а в качестве ϵ_n выбрать наименьшую из ϵ_k (что дает нижнюю границу) или наибольшую из ϵ_k (что дает верхнюю границу).

Более детальный учет геометрии системы дает возможность дальнейшего уточнения границ ее диэлектрической проницаемости по методу пробных функций [Л. 10 и 11]. Этот учет основывается на знании корреляционных функций для исследуемой системы. Корреляционные функции выражают вероятность попадания системы произвольно вы-

бранных точек в пространство, занятое одной из компонент. Вычисление этих функций является сложной задачей из области теории вероятностей.

Для системы хаотически распределенных в пространстве непроницаемых для потока сферических частиц (в процессе вычислений эта система аппроксимируется системой хаотически распределенных точечных центров) получено [Л. 11] значение верхней границы в виде

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_2} = \frac{\theta_2}{1 - \frac{1}{2} \ln \theta_2}, \quad (4)$$

где θ_2 — объемная концентрация пор;

ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость вещества в порах.

Двухмерным (система параллельных цилиндров) аналогом формулы (4) является формула

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_2} = \frac{\theta_2}{1 - \ln \theta_2}. \quad (5)$$

Рассмотрим метод противопоставления. Если в формуле (1) коэффициенты f_k определены на основании точного решения уравнения Лапласа с учетом граничных условий, то ее можно подразделить на два уравнения:

$$\sum_{k=1}^n \theta_k f_k \epsilon_k = \epsilon \quad (6a)$$

и

$$\sum_{k=1}^n \theta_k f_k = 1, \quad (6б)$$

причем

$$\sum_{k=1}^n \theta_k = 1. \quad (6в)$$

В этом случае уравнения (6а) и (6б) не противоречат друг другу, а также уравнению (1).

Метод противопоставления основывается на постулируемом допущении, что коэффициенты f_k для частиц дисперсных компонент можно вычислить, предполагая, что каждая из них находится в однородной среде с искомой диэлектрической проницаемостью ϵ , причем в среде действует однородное поле с напряженностью, равной напряженности макроскопически однородного поля, действующего в исследуемой неоднородной системе. Вычисленные, таким образом, коэффициенты f_k (являющиеся функциями ϵ) подставляются в одно из уравнений

$$\sum_{k=1}^n \theta_k f_k (\epsilon_k - \epsilon) = 0; \quad (7a)$$

$$\sum_{k=1}^n \theta_k f_k (\epsilon_k - \epsilon_n) = \epsilon - \epsilon_n, \quad (7б)$$

из которого определяется ϵ .

Уравнения (7а), (7б) получаются вычитанием из левой и правой частей (6а) соответственно левой и правой частей (6б), умноженных на ϵ либо на

ϵ_n . Уравнение (7а) применяется для систем типа смесей, а (7б) для ячеистых систем, причем ϵ_n — диэлектрическая проницаемость связной компоненты [Л. 12]. Для упрощения вычислений, как правило, принимают, что частицы имеют эллипсоидальную форму. Тогда при одинаковой ориентации осей частиц коэффициенты f_k выражаются формулой

$$f_k = \frac{1}{1 + \left(\frac{\epsilon_k}{\epsilon} - 1\right) F_k}, \quad (8)$$

а при хаотической ориентации — формулой

$$f_k = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \frac{1}{1 + \left(\frac{\epsilon_{kj}}{\epsilon} - 1\right) F_{kj}}, \quad (9)$$

где F_{kj} — коэффициент деполяризации частицы относительно j -й оси;

ϵ_{kj} — составляющая диэлектрической проницаемости относительно j -й оси.

Отметим, что так как коэффициенты f_k определены приближенно, формулы (6а) и (6б), вообще говоря, несовместны, и комбинировать из них новые уравнения (7а) и (7б) с точки зрения математики неправильно. Говоря точнее, в этом случае неправильно подразделять уравнение (1) на (6а) и (6б). В отношении (7а) это обстоятельство несущественно, так как здесь после объединения (6а) и (6б) получается первоначальное уравнение (1), но в отношении (7б) приведенное выше замечание сохраняет силу. Отсюда следует, что уже одно только формальное рассмотрение метода противопоставления показывает его принципиальную несостоятельность в применении к ячеистым системам.

Рассмотрим физическую сторону метода противопоставления применительно к системе, представляющей собой n -компонентную смесь эллипсоидальных частиц.

Нетрудно убедиться в том, что уравнения (1) и (7а) выражают диэлектрическую проницаемость такой промежуточной однородной среды, в которой, будучи размещены на большом расстоянии одна от другой с сохранением первоначальной ориентации, частицы, содержащиеся в единице объема исходной неоднородной системы, при воздействии однородного поля с напряженностью E_x дают суммарный электрический момент, равный нулю. Принимая диэлектрическую проницаемость промежуточной среды за искомую диэлектрическую проницаемость, т. е. распространяя соотношение (7а) на область нулевой концентрации промежуточной среды, мы допускаем погрешность, но эта погрешность минимальна, так как при равенстве нулю среднего момента становится минимальным электростатическое взаимодействие между частицами.

Величина E_x , вообще говоря, не равна средней напряженности поля E в заданной неоднородной системе, а связана с ней соотношением

$$E = E_x \sum_{k=1}^n \theta_k f_k, \quad (10)$$

где f_k определяются при помощи формул (8) или (9) через ϵ , определяемую из (7а).

Равенство $E = E_x$ имеет место в том случае, если (6а) и (6б) совместны, для чего при $n > 2$ достаточно, а при $n = 2$ необходимо и достаточно, чтобы f_k выражались в виде (8), где F_k были бы одинаковы для всех компонент. Величина E_x имеет ясный физический смысл: это напряженность местного поля, действующего на отдельную частицу, вычисленная в пренебрежении искажением поля каждой частицы системы, обусловленным ее ближайшими соседями.

Из сказанного следует, что данный метод вычисления средней диэлектрической проницаемости правильнее было бы назвать методом промежуточной среды, так как это название вернее отражает его физическую сущность. Произведенный анализ показывает, что этот метод расчета принципиально применим к системам типа смесей, точнее — статистических смесей, но является приближенным: здесь не принимаются во внимание все мультипольные взаимодействия, начиная с квадрупольных, а дипольные взаимодействия учтены лишь частично. Будучи приближенным, метод промежуточной среды все же весьма полезен для качественного, а в ряде случаев и количественного анализа физических свойств неоднородных систем, так как его применение не связано со сложными вычислениями.

Уравнение (7а) допускает и другое физическое толкование. Рассмотрим по аналогии с тем, что мы делали, анализируя метод интегрирования, систему, составленную из бесконечно большого числа малых порций частиц, размеры которых быстро убывают от порции к порции, рассеянных в сплошной среде, диэлектрическая проницаемость которой выбрана в соответствии с (7а) так, чтобы средний электрический момент каждой порции был равен нулю. Для такой системы, названной нами псевдосмесью, уравнение (7а) строго справедливо так же, как и (6а) и (6б). В то же время в отношении статистических смесей, которые ближе по структуре к реальным смесям, чем описанная псевдосмесь, уравнение (7а), как было показано, справедливо в первом приближении.

Псевдосмесь представляет собой систему весьма специального вида, которая вряд ли встречается на практике, однако с принципиальной точки зрения она имеет большое значение. Например, учитывая, что (7а) дает точное выражение для диэлектрической проницаемости ϵ некоторой изотропной неупорядоченной системы (псевдосмеси), можно утверждать, что это значение ϵ заключается между верхней и нижней границами по Хашину и Штрикману. Поскольку это значение ϵ формально совпадает с приближенным выражением для ϵ статистической смеси, то и в отношении последней можно утверждать, что она удовлетворяет условию Хашина и Штрикмана. В то же время в отношении ϵ , получаемой из (7б), этого не только нельзя показать, но можно даже привести примеры, когда получающееся значение ϵ превышает верхнюю границу по Хашину и Штрикману. Это лишний раз доказывает принципиальную несостоятельность формулы (7б). Действительно, если, например,

рассмотреть систему, содержащую связную компоненту с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 и дисперсные компоненты с диэлектрическими проницаемостями ϵ_2 и ϵ_3 , причем $\epsilon_1 \ll \epsilon_2 \ll \epsilon_3$, то ϵ , определенная из (76), оказывается больше, чем верхняя граница по Хашину и Штрикману.

Формула для диэлектрической проницаемости суспензии. В методе промежуточной среды большое значение имеет возможность рассмотрения каждой частицы системы, уединенной от остальных. Надо учитывать, что не всякую неоднородную систему можно очевидным образом подразделить на уединенные частицы. Даже в простой смеси иногда необходимо в качестве уединенной рассматривать не отдельную частицу исходной системы, а некоторую их совокупность. Путем такого объединения частиц в группы, как показано в [Л. 3], можно добиться того, что влияние геометрической формы и размеров частиц на вероятность их соседства перестает сказываться непосредственно, и тогда вероятность соседства частиц в неупорядоченной смеси определяется ее статистическими свойствами — хаотичностью распределения частиц компоненты и их удельными поверхностями. Системы, удовлетворяющие этому условию, назовем статистическими смесями, что является более общим определением по сравнению с приведенным в [Л. 13]. Метод промежуточной среды приложим именно к статистическим смесям.

Например, как показано в [Л. 3], суспензию, в которой частицы дисперсной компоненты имеют приблизительно одинаковую форму и размеры, можно рассматривать как статистическую смесь, если физически бесконечно малые частицы, составляющие связную компоненту системы, представить объединенными в подобие тонких пластинок, имеющих хаотическую ориентацию в пространстве. Для такой системы, в которой частицы дисперсных компонент ориентированы хаотически, можно воспользоваться уравнением (7а), что вместе с (9) дает:

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^3 \theta_{kj} f_{kj} (\epsilon_{kj} - \epsilon) = 0, \quad (11)$$

где

$$f_{kj} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\epsilon_{kj}}{\epsilon} - 1 \right) F_{kj}};$$

$$f_{n1} = \frac{\epsilon}{\epsilon_n};$$

$$f_{n2,3} = 1;$$

$$\epsilon_{n1} = \epsilon_n,$$

а индексы 2, 3 относятся соответственно к двумерным и трехмерным системам.

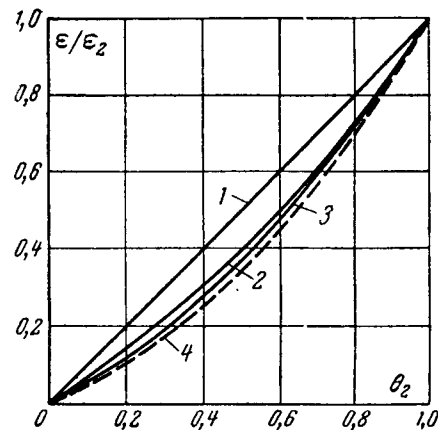
Уравнения (7а) и (11) можно использовать и в том случае, если частицы компонент неоднородны и представляют собой многослойные эллипсоидальные включения, в которых границами между слоями являются поверхности софокусных эллипсоидов. Тогда в качестве ϵ_{kj} надо принимать эквивалентную диэлектрическую проницаемость многослойного эллипсоида вдоль соответствующей оси.

Представляет интерес сравнить значения ϵ/ϵ_2 , вычисленные по формуле (11) при $n=2$, $F_{1j}=1/3$

Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ трехмерной суспензии от пористости θ_2 .

ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость вещества в порах.

1 — верхнее значение ϵ/ϵ_2 по формуле (36); 2 — то же по формуле (2); 3 — то же по формуле (4); 4 — величина ϵ/ϵ_2 по формуле (11).



и $\epsilon_1=0$, с верхними граничными значениями, даваемыми при тех же условиях формулами (36), (2) и (4) — рис. 3. Как нетрудно видеть, кривая, соответствующая (13), располагается ниже остальных, что находится в согласии со свойствами последних как верхних границ для ϵ/ϵ_2 .

Для этого случая отсутствуют экспериментальные данные ввиду трудности постановки соответствующих опытов (извлеченные из [Л. 14] опытные данные, ошибочно приводимые в [Л. 11], к данному случаю не подходят, так как относятся к укладкам частиц, т. е. к системам типа порошка, а не к суспензиям). Однако очень легко получить надежные опытные данные на двумерной модели такой системы, изготовленной из проводящей бумаги (рис. 4). Кривая 2 на этом рисунке построена по формуле

$$\epsilon = \epsilon_n \frac{1 + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\epsilon_k - \epsilon_n}{\epsilon_k + \epsilon_n}}{1 - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\epsilon_k - \epsilon_n}{\epsilon_k + \epsilon_n}}, \quad (12)$$

являющейся двумерным аналогом формулы (2). Сравнение данных теории и опыта говорит об их удовлетворительном согласии.

Аналогичные опыты с моделью из проводящей бумаги, в которой делались хаотически ориентированные щелевидные вырезы, и опыты с моделью из относительно плохо проводящей бумаги, на

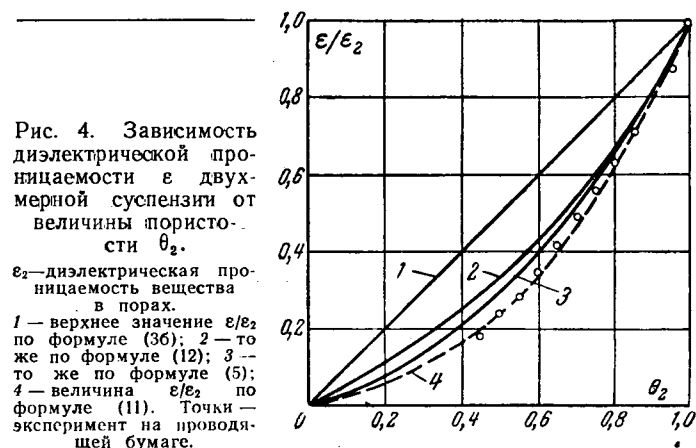


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ двумерной суспензии от величины пористости θ_2 .

ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость вещества в порах.

1 — верхнее значение ϵ/ϵ_2 по формуле (36); 2 — то же по формуле (12); 3 — то же по формуле (5); 4 — величина ϵ/ϵ_2 по формуле (11). Точки — эксперимент на проводящей бумаге.

которую при помощи графитовой суспензии наносились проводящие круглые пятна, также подтверждают правильность формулы (11).

Заключение. Критически рассмотрены известные из литературы методы расчета средней диэлектрической проницаемости неупорядоченных неоднородных систем. Выяснено, что метод эквивалентного эллипсоида и метод интегрирования относятся к системам со специфической структурой и с точки зрения практических приложений представляют интерес лишь при малых концентрациях дисперсных компонент, однако первый из них имеет большое принципиальное значение с точки зрения исследования предельных значений диэлектрической проницаемости смесей. Метод сечений удобен для оценки предельных значений, но оценка получается грубой. Метод пробных функций перспективен и требует дальнейшего развития. В настоящее время получение с его помощью достаточно точных результатов связано с трудными вычислениями корреляционных функций. Наибольшее внимание уделено методу противопоставления. Выяснен физический смысл положенных в его основу допущений, обуславливающих приближенный характер этого метода вычисления. Показано, что данный метод распространяется на статистические смеси и неприменим непосредственно к ячеистым системам.

Обобщено понятие о статистических смесях. При этом оказалось возможным рассматривать системы типа суспензий как особый случай статистической смеси. На этой основе, а также на основе обобщения и уточнения метода противопоставления оказалось возможным вывести приближенную формулу для диэлектрической проницаемости суспензии.

Уточненную форму метода противопоставления, используемую в настоящей работе, целесообразно назвать методом промежуточной среды, так как это название наилучшим образом выражает ее физический смысл.

Литература

1. Чудновский А. Ф., Теплофизические характеристики дисперсных материалов, Физматгиз, 1962.
2. Ландау Л. Д. и Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред, Физматгиз, 1959.
3. Ванин Б. В., Диэлектрическая проницаемость неупорядоченных неоднородных систем, Труды ВНИИЭ, вып. 20, 1965.
4. Sillars R. W., The properties of a dielectric containing semiconducting particles of various shape, J. Inst. El. Engrs, 1937, vol. 80, p. 378.
5. Maxwell G. C., Treatise on electricity and magnetism, Oxford, 1904.
6. Корнеев И. А., О средних значениях параметров неоднородных сред, ЖТФ, вып. 1, 1960, т. 30.
7. Bruggeman D. A. G., Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen, Ann. Phys. 1935, Bd 24, S. 636.
8. Смайт В., Электростатика и электродинамика, Изд-во иностранной литературы, 1954.
9. Hashin Z., Shtrikman S., A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials, J. Appl. Phys., 1962, vol. 33, p. 3125.
10. Prager S., Diffusion and viscous flow in concentrated suspensions, Physica, 1963, vol. 29, p. 129.
11. Weissberg H. L., Effective diffusion coefficient in porous media, J. Appl. Phys., 1963, vol. 34, p. 2636.
12. Reynolds J. A., Hough J. M., Formulae for the dielectric constant of mixtures, Proc. Phys. Soc., 1957, vol. B. 70, p. 769.
13. Оделевский В. И., Обобщенная проводимость гетерогенных систем (1), ЖТФ, вып. 6, 1951, т. 21.
14. Carman P. C., Flow of gases through porous media, New York, 1956.

[25.11.1964]



УДК 621.375.9

О спиновом генераторе

Н. М. ИЕВСКАЯ и Р. М. УМАРХОДЖАЕВ

Московский государственный университет им. Ломоносова

В последнее время в результате развития работ в области радиоспектроскопии созданы приборы, позволяющие получить когерентное излучение электромагнитной энергии в широком диапазоне частот: от тысяч мегагерц (мазеры) до частот светового диапазона (лазеры). К этому же типу приборов квантовой радиоэлектроники можно отнести и спиновые генераторы с рабочим диапазоном частот от нескольких тысяч герц при работе с ядрами в слабых магнитных полях до тысяч мегагерц при работе с электронами в сильных магнитных полях.

Под спиновым генератором будем понимать такой генератор, в котором роль избирательного элемента выполняет вещество с линией поглощения, определяющей свойства автоколебательной системы.

Сущность магнитного резонанса. Известно [Л. 1—4], что электроны и некоторые атомные ядра обладают собственным магнитным моментом μ и механическим моментом — спином P . Эти моменты всегда коллинеарны, а отношение между ними $\gamma = \frac{\mu}{P}$, называемое гиромагнитным отношением, являются константой для электрона и для каждого ядра.

Для упрощения картины рассмотрим вещество, магнитные свойства которого обусловлены лишь магнитными моментами или электронов, или атомных ядер. При помещении такого вещества в постоянное магнитное поле с напряженностью H_0 , электроны или ядра приобретают добавочную энергию $W = -(\mu H_0)$, а вследствие пространственного квантования происходит расщепление энергетиче-

ского уровня на ряд подуровней. В системе с дискретными уровнями энергии возможны переходы из одного состояния в другое под действием высокочастотного поля, кванты энергии которого равны расстоянию между уровнями. При этом в зависимости от направления перехода происходит вынужденное излучение или вынужденное поглощение энергии на определенной частоте.

Для ряда задач можно не учитывать квантовую картину происходящих процессов, а ограничиться классическим рассмотрением. С классической точки зрения каждая частица, обладающая магнитным и механическим моментами, ведет себя в постоянном магнитном поле как элементарный гироскоп, закрепленный в одной точке, т. е. прецессирует вокруг направления постоянного поля H_0 с частотой ларморовой прецессии $\omega_0 = \gamma H_0$.

Если в веществе имеется взаимодействие системы спинов с окружающей средой так называемой «решеткой», т. е. между ними происходит обмен энергией, то число магнитных моментов, ориентированных по полю (ось z), отлично от числа магнитных моментов, ориентированных против поля; избыток магнитных моментов единицы объема вещества, совпадающих с направлением поля, есть намагниченность вещества M_z . Характеристическое время, за которое появляется намагниченность M_z в направлении поля, называется временем продольной релаксации T_1 .

В постоянном магнитном поле магнитные моменты прецессируют вокруг направления напряженности поля с одинаковой частотой прецессии Лармора, но с произвольными фазами. Если на образец вещества в плоскости xu наложить высокочастотное магнитное поле, вращающееся в направлении прецессии магнитных моментов, то при совпадении частоты высокочастотного поля с ларморовой частотой поле фазирует прецессирующие магнитные моменты, что приводит к появлению намагниченностей M_x и M_y в поперечной плоскости, т. е. суммарный вектор намагниченности M отходит от направления оси z и начинает прецессировать вокруг направления напряженности поля H_0 с ларморовой частотой прецессии. Это явление в зависимости от того, какие магнитные моменты присутствуют в исследуемом веществе, соответственно называется электронным парамагнитным резонансом или ядерным магнитным резонансом. В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением только ядерного магнитного резонанса.

Вследствие того, что на ядра вещества, помимо постоянного внешнего поля, действуют еще внутренние локальные поля, появляется некоторый разброс ларморовых частот прецессии, а резонансная линия приобретает некоторую ширину $\Delta\omega$. Уширение линии возникает также из-за неоднородности постоянного магнитного поля в пределах образца, поэтому требования к однородности поля оказываются очень высокими. В результате влияния локальных полей и неоднородности внешнего поля созданная в плоскости xu поперечная намагниченность после снятия высокочастотного поля исчезает за время $T_2 = \frac{1}{\Delta\omega}$ — время поперечной релаксации.

Уравнения Блоха. Система ядерных спинов, находящихся во внешних постоянном и высокочастотном магнитных полях и имеющая намагниченность M , с учетом релаксационных процессов описывается уравнениями Блоха [Л. 2—5]:

$$\frac{dM}{dt} = \gamma [MH] - \frac{1}{T_2} (iM_x + jM_y) + \frac{1}{T_1} k(M_0 - M_z) \quad (1)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_x &= \gamma (M_y H_z - M_z H_y) - \frac{1}{T_2} M_x; \\ \dot{M}_y &= -\gamma (M_x H_z - M_z H_x) - \frac{1}{T_2} M_y; \\ \dot{M}_z &= \gamma (M_x H_y - M_y H_x) + \frac{1}{T_1} (M_0 - M_z), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где M_0 — равновесное значение намагниченности.

Рассмотрим систему спинов, находящуюся под действием двух полей: постоянного $H_z = H_0$ и переменного $H_x = H_1 \cos \omega t$.

Уравнения (2) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_x &= \omega_0 M_y - \frac{1}{T_2} M_x; \\ \dot{M}_y &= -\omega_0 M_x + \gamma H_1 M_z \cos \omega t - \frac{1}{T_2} M_y; \\ \dot{M}_z &= -\gamma H_1 M_y \cos \omega t + \frac{1}{T_1} (M_0 - M_z), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\omega_0 = \gamma H_0$.

При $\gamma > 0$, сделав замену

$$\left. \begin{aligned} M_x &= u \cos \omega t - v \sin \omega t; \\ M_y &= -(u \sin \omega t + v \cos \omega t), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

получим систему укороченных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{u} + \frac{1}{T_2} u + \Delta\omega_0 v &= 0; \\ \dot{v} + \frac{1}{T_2} v - \Delta\omega_0 u &= -\frac{1}{2} \gamma H_1 M_z; \\ \dot{M}_z + \frac{1}{T_1} M_z - \frac{1}{2} \gamma H_1 v &= \frac{1}{T_1} M_0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\Delta\omega_0 = \omega_0 - \omega$.

При $\dot{H}_1 = \dot{H}_0 = \dot{\omega} = 0$ имеем $\dot{v} = \dot{u} = \dot{M}_z = 0$ и стационарные решения уравнений (5) при этих условиях принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{-\frac{1}{2} \gamma H_1 M_0 T_2}{1 + (\Delta\omega_0 T_2)^2 + \frac{\gamma^2 H_1^2 T_1 T_2}{4}}; \\ u &= -v \Delta\omega_0 T_2 = \frac{\frac{1}{2} \gamma H_1 M_0 \Delta\omega_0 T_2^2}{1 + (\Delta\omega_0 T_2)^2 + \frac{\gamma^2 H_1^2 T_1 T_2}{4}}; \\ M_z &= M_0 \frac{1 + (\Delta\omega_0 T_2)^2}{1 + (\Delta\omega_0 T_2)^2 + \frac{\gamma^2 H_1^2 T_1 T_2}{4}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Из выражений (6), следует, что возникающая при ядерном магнитном резонансе намагниченность по осям x и y сдвинута по фазе относительно высокочастотного поля H_x , т. е. имеет две компоненты. Сигнал u , находящийся в фазе с высокочастотным полем H_x , называется дисперсией, а сигнал v , сдвинутый на $\pi/2$ по отношению к полю H_x , — поглощением.

Выражения (6) показывают, что сигналы u , v и M_z зависят как от значений времен релаксации T_1 и T_2 , так и от H_1 . В дальнейшем для нас будет представлять интерес сигнал поглощения v . Его величина зависит от значения параметра $\frac{\gamma^2 H_1^2 T_1 T_2}{4}$. Как

следует из (6), с ростом H_1 при $\frac{\gamma^2 H_1^2 T_1 T_2}{4} \ll 1$ (когда нет заметного «насыщения») поглощение в системе растет, затем при $\frac{\gamma^2 H_1^2 T_1 T_2}{4} = 1$ достигается максимум сигнала $v_{\text{макс}} = \frac{1}{2} M_0 \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$. При условии $\frac{\gamma^2 H_1^2 T_1 T_2}{4} \gg 1$ «насыщение» растет и сигнал снова уменьшается.

Система спинов как колебательная система. Можно провести аналогию между сигналами ядерного магнитного резонанса и характеристиками колебательного контура. Сравним сигналы v и u при $\frac{\gamma^2 H_1^2 T_1 T_2}{4} \ll 1$ с активной и реактивной частями полного сопротивления z_0 параллельного контура [Л. 6 и 7]:

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= \frac{\frac{1}{\delta_K}}{2C \left[1 + \left(\frac{\Delta\omega_0}{\delta_K} \right)^2 \right]}; \\ x_0 &= -r_0 \frac{\Delta\omega_0}{\delta_K} = \frac{-\frac{\Delta\omega_0}{\delta_K^2}}{2C \left[1 + \left(\frac{\Delta\omega_0}{\delta_K} \right)^2 \right]}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где

$$\delta_K = \frac{r}{2L}.$$

Как следует из (6) и (7), v и r_0 достигают максимума при $\Delta\omega_0 = 0$, u и x_0 проходят через нуль и изменяют знак при $\Delta\omega_0 = 0$. Легко показать, что u и x_0 достигают максимума соответственно при $\Delta\omega_{0\text{макс}} = \frac{1}{T_2}$ и $\Delta\omega_{0\text{макс}} = \delta_K$, т. е. при $\varphi = 45^\circ$, где

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{u}{v} = \frac{x_0}{r_0}. \quad (8)$$

Сопротивление x_0 достигает максимума при относительной расстройке

$$\frac{\Delta\omega_{0\text{макс}}}{\omega_0} = \frac{\delta_K}{\omega_0} = \frac{r}{2\omega_0 L} = \frac{1}{2Q}, \quad (9)$$

где Q — добротность параллельного контура.

Тогда по аналогии можно ввести добротность линии при ядерном магнитном резонансе

$$\frac{\Delta\omega_{0\text{макс}}}{\omega_0} = \frac{1}{\omega_0 T_2} = \frac{1}{2Q_n},$$

т. е.

$$Q_n = \frac{1}{2} \omega_0 T_2. \quad (10)$$

Таким образом, систему ядерных спинов можно рассматривать как колебательный контур, настроенный на частоту $\omega_0 = \gamma H_0$ с полосой пропускания $2\Delta\omega = \frac{2}{T_2}$ и с добротностью $Q_n = \frac{1}{2} \omega_0 T_2$.

Учитывая колебательные свойства системы спинов, можно преобразовать уравнения Блоха. Запишем первые два уравнения системы (3) как одно уравнение второго порядка для составляющих x и y при условии $\omega_0 = \text{const}$.

Уравнения с y -компонентой:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{M}_y + \frac{2}{T_2} \dot{M}_y + \left(\omega_0^2 + \frac{1}{T_2^2} \right) M_y &= \\ &= \gamma \dot{H}_x M_z + \gamma H_x \left(\dot{M}_z + \frac{1}{T_2} M_z \right); \\ \dot{M}_z &= -\gamma H_x M_y + \frac{1}{T_1} (M_0 - M_z). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Уравнения с x -компонентой:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{M}_x + \frac{2}{T_2} \dot{M}_x + \left(\omega_0^2 + \frac{1}{T_2^2} \right) M_x &= \omega_0 \gamma H_x M_z; \\ \dot{M}_z &= -\gamma H_x e^{-\frac{t}{T_2}} \int (\gamma H_x M_z - \omega_0 M_x) e^{\frac{t}{T_2}} dt + \\ &+ \frac{1}{T_1} (M_0 - M_z). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Вид систем уравнений (11) и (12) показывает, что поведение поперечных компонент намагниченности системы спинов описывается колебательным уравнением второго порядка, причем решение для поперечных компонент определяется поведением продольной компоненты намагниченности M_z . При малых H_x уравнения для M_z можно опустить, считая $M_z \approx M_0 = \text{const}$. Тогда система уравнений упрощается.

Вызванное в системе ядерных магнитных моментов движение (прецессия вектора намагниченности вокруг направления постоянного магнитного поля) затухает, как и в любой диссипативной системе, однако, применяя устройство, способное подводить энергию в систему ядерных спинов, можно получить автоколебательную систему, поддерживающую прецессию. Такую автоколебательную систему, в которой частота колебаний определяется системой ядерных спинов, прецессирующих в постоянном магнитном поле с частотой ларморовой прецессии $\omega_0 = \gamma H_0$ и добротностью $Q_n = \frac{1}{2} \omega_0 T_2$, будем называть спиновым генератором.

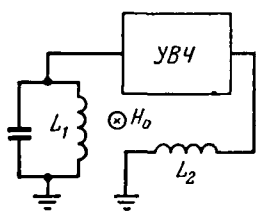


Рис. 1. Блок-схема генератора Шмельцера.

генератора с оптической накачкой [Л. 15], генератора типа «мазер» [Л. 16 и 17].

Одним из наиболее простых спиновых генераторов является генератор Шмельцера (рис. 1). Он состоит из усилителя высокой частоты (УВЧ) и датчика сигналов ядерного магнитного резонанса. В качестве датчика используются скрещенные катушки. Катушки L_1 (приемная) и L_2 (передающая) имеют взаимно перпендикулярные оси, что необходимо для устранения связи между ними. В катушке L_1 находится образец, а вся система катушек L_1 и L_2 расположена в плоскости xu и помещена в постоянное магнитное поле H_0 , направленное по оси z .

До включения генератора имеем следующее: в постоянном поле ядерные магнитные моменты прецессируют с частотой $\omega_0 = \gamma H_0$ со статистическим распределением фаз прецессии, так что имеется только продольная намагниченность M_z , а поперечной намагниченности (т. е. сигнала ядерного магнитного резонанса) нет.

После включения генератора в передающей катушке L_2 появится шумовой ток, в спектре которого содержится, в частности, и компонента с частотой ω_0 . Таким образом, на ядерную систему начинает действовать фазирующее поле резонансной частоты, что приведет к появлению высокочастотной поперечной компоненты ядерной намагниченности. При этом в приемной катушке L_1 будет наводиться э. д. с., которая после усиления и подачи на катушку L_2 при надлежащем выборе фазы окажет дальнейшее влияние на фазировку прецессирующих ядерных моментов. Таким образом, замыкается цепь обратной связи, и в схеме возникают автоколебания.

Мы не будем останавливаться на других типах спиновых генераторов, описание которых можно найти в указанных выше работах.

Теория спинового генератора. Общим для всех спиновых генераторов является использование в качестве колебательной системы совокупности магнитных моментов, прецессирующих в постоянном магнитном поле. Поведение спинового генератора как автоколебательной системы может быть описано системой уравнений, включающей уравнения Блоха и уравнение колебаний, вид которого зависит от схемы спинового генератора. Решение такой системы нелинейных уравнений в общем виде является практически невыполнимой задачей.

Работы, ранее опубликованные по теории спиновых генераторов, выполнены при условии либо идеального усилителя в цепи обратной связи [Л. 18], либо при условии, что постоянная времени входной цепи

равна временам релаксации $T_1 = T_2 = T$ используемого образца [Л. 19]. В этих работах выражение для M_z либо не учитывается, т. е. принимается $M_z = M_0 = \text{const}$, либо M_z берется из решения для стационарных сигналов ядерного магнитного резонанса, определяемого выражениями (6). Однако в реально выполненном спиновом генераторе схема также обладает определенными резонансными свойствами, что может повлиять на его работу.

Рассмотрим основные характеристики спинового генератора с учетом резонансных свойств схемы и с учетом поведения продольной компоненты намагниченности M_z [Л. 20].

Ограничение амплитуды спинового генератора. Механизм ограничения амплитуды колебаний в спиновом генераторе может определяться или схемой, или «насыщением» в системе ядерных спинов. Первый механизм в принципе не отличается от ограничения амплитуды в обычных ламповых генераторах. Для выяснения причины ограничения амплитуды во втором случае рассмотрим спиновый генератор Шмельцера с идеальным усилителем в цепи обратной связи. Примем, что приемная катушка ориентирована по оси y , а передающая — по оси x .

Если $H_x = kM_y$, то, используя (11), получим систему уравнений, описывающую работу спинового генератора:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{M}_y + \dot{M}_y \left(\frac{2}{T_2} - k\gamma M_z \right) + M_y \left\{ \omega_0^2 + \frac{1}{T_2^2} - \right. \\ \left. - k\gamma \left[\dot{M}_z + \frac{1}{T_2} M_z \right] \right\} = 0; \\ \dot{M}_z = -k\gamma M_y^2 + \frac{1}{T_1} (M_0 - M_z). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Если существует стационарный режим, то $M_y = M_{\perp} \cos \omega t$ и тогда

$$\begin{aligned} M_z = M_0 - k\gamma \frac{M_{\perp}^2 T_1}{2} - \\ - k\gamma \frac{M_{\perp}^2}{2} \frac{\frac{1}{T_1} \cos 2\omega t + 2\omega \sin 2\omega t}{\frac{1}{T_1^2} + 4\omega^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

При больших ω и $\omega \gg \frac{1}{T_1}$ (что всегда справедливо)

M_z определяется только амплитудой, а не мгновенным значением величины M_y , т. е. z -компонента вектора M является инерционным элементом [Л. 21 и 22].

Решая систему уравнений (13), получим стационарную частоту

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \frac{1}{T_2^2} - k\gamma \frac{1}{T_2} M_z. \quad (15)$$

Стационарную амплитуду найдем из уравнений

$$\begin{aligned} \frac{2}{T_2} - k\gamma M_z &= 0; \\ -\frac{k\gamma}{2} M_{\perp}^2 + \frac{1}{T_1} (M_0 - M_z) &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Из (13) и (16) видно, что если вначале M_{\perp} мало, то $M_z \approx M_0$, т. е. член при первой производной M_y в (13) меньше нуля: в системе происходит нарастающие колебания. С ростом M_{\perp} значение M_z падает, и поэтому член $\frac{2}{T_2} - k\gamma M_z$ стремится к нулю.

При $\frac{2}{T_2} - k\gamma M_z = 0$ имеем стационарный режим. В этом случае из (16) получаем стационарное значение M_{\perp} :

$$M_{\perp \text{ст}}^2 = \frac{2k\gamma M_0 \frac{1}{T_1} - \frac{4}{T_1 T_2}}{k^2 \gamma^2}. \quad (17)$$

Легко показать, что при наличии широкополосного усилителя в цепи обратной связи колебательный режим спинового генератора при ограничении колебаний за счет «насыщения» будет устойчивым.

Найдем значение k , при котором намагниченность $M_{\perp \text{ст}}$ максимальна. Из условия $\frac{dM_{\perp}}{dk} = 0$ имеет:

$$k_{\text{опт}} = \frac{4}{\gamma T_2 M_0}. \quad (18)$$

Отсюда следует, что при данном k существует время релаксации T_2 , при котором M_{\perp} имеет максимум:

$$M_{\perp \text{макс}} = \frac{1}{2} M_0 \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}. \quad (19)$$

Напомним, что и амплитуда поглощения v , как было показано выше, также имеет максимальное значение

$$v_{\text{макс}} = \frac{1}{2} M_0 \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}.$$

Таким образом, максимальные значения как стационарной амплитуды поглощения, так и амплитуды колебаний спинового генератора равны $\frac{1}{2} M_0 \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$, и оба максимума, как следует из (18) и (19), достигаются при условии $\frac{\gamma^2 H_1^2 T_1 T_2}{4} = 1$.

Влияние параметров радиосхемы на частоту и амплитуду спинового генератора. Как уже отмечалось выше, в реальных схемах спиновых генераторов применяются резонансные приемные контуры. Рассмотрим схему спинового генератора с идеальным линейным усилителем в цепи обратной связи, но с настроенной входной цепью.

Используя уравнения (11), получим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \ddot{M}_y + \frac{2}{T_2} \dot{M}_y + \left(\omega_0^2 + \frac{1}{T_2^2} \right) M_y &= \\ &= \gamma \dot{H}_x M_z + \gamma H_x \left(\dot{M}_z + \frac{1}{T_2} M_z \right); \\ \dot{M}_z &= -\gamma H_x M_y + \frac{1}{T_1} (M_0 - M_z); \\ \ddot{H}_x + 2\delta_K \dot{H}_x + \omega_K^2 H_x &= b \dot{M}_y. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Третье уравнение из этой системы уравнений описывает резонансные свойства приемного контура.

Здесь $\delta_K = \frac{\omega_K}{2Q}$ — полуширина резонансного контура;

ω_K — резонансная частота контура;

Q — добротность контура;

b — коэффициент, зависящий от параметров контура и коэффициента усиления.

Стационарное решение ищется в виде

$$H_x = H_1 \cos \omega t;$$

$$M_y = -u \sin \omega t - v \cos \omega t.$$

Решение дает стационарную частоту

$$\omega^2 = \frac{\omega_0^2 + \frac{1}{T_2^2} + \frac{1}{\delta_K T_2} \left(\omega_K^2 - \frac{\gamma b}{2\delta_K T_2} M_z \right)}{1 + \frac{1}{\delta_K T_2}}. \quad (21)$$

Как правило, $\frac{1}{T_2} \ll \omega_0$ и $\frac{\gamma b}{2\delta_K T_2} M_z \ll \omega_K^2$. Тогда

$$\omega^2 = \frac{\omega_0^2 + \frac{1}{\delta_K T_2} \omega_K^2}{1 + \frac{1}{\delta_K T_2}} = \frac{\omega_0^2 + \frac{Q}{Q_{\pi}} \omega_K^2}{1 + \frac{Q}{Q_{\pi}}}. \quad (22)$$

Из (21) и (22) видно, что частота генерации только при $\omega_0 = \omega_K$ равна частоте ларморовой прецессии, а при $\omega_0 \neq \omega_K$ частота генерации отлична от ω_0 . Величина затягивания частоты зависит от параметра $\frac{1}{\delta_K T_2} = \frac{Q}{Q_{\pi}}$. При условии $\frac{Q}{Q_{\pi}} \ll 1$ из (22) имеем:

$$\omega = \omega_0 + \frac{Q}{Q_{\pi}} (\omega_K - \omega_0). \quad (23)$$

Из системы (20) с учетом (21) при $\omega_0 \approx \omega_K$ и $\frac{1}{\delta_K T_2} \ll 1$ найдем выражение для амплитуды H_1 как функцию от $\omega_0 - \omega_K$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\delta_K T_2} (\omega_0^2 - \omega_K^2)^2 + \gamma^2 H_1^2 T_1 \delta_K \omega_0^2 &= \\ &= b \omega_0^2 \gamma M_0 - \frac{4\delta_K}{T_2} \omega_0^2. \end{aligned} \quad (24)$$

Это уравнение эллипса. Таким образом, при наличии настроенного контура имеется конечная область частот, в которой работает спиновый генератор, причем его частота в этой области, за исключением одной точки $\omega_0 = \omega_K$, не равна частоте ларморовой прецессии.

Съем информации со спинового генератора. Если спиновый генератор применяется для слежения за напряженностью постоянного магнитного поля, то одним из способов контроля магнитного поля является измерение разности между частотой спинового генератора и соответствующим стандартом частоты. Однако можно применять и другой способ, основанный на использовании явления затягивания частоты спинового генератора. Как следует из (21) — (23), частота спинового генератора ω отличается от частоты ларморовой прецессии ω_0 , если частота настроенного входного контура ω_K не равна ω_0 . Это позволяет, введя дополнительную низкочастотную модуляцию магнитного поля на частоте q (как в стабилизаторе Паккарда [Л. 23]),

получить сигнал ошибки, пропорциональный отклонению ω_0 от ω_K .

Найдем зависимость между амплитудой сигнала на частоте q и величиной $\omega_0 - \omega_K$. Для этого рассмотрим систему ядер, находящуюся под действием переменных полей $H_1 \cos \omega t$ и $H_m \sin qt$. Уравнения Блоха (5) в полярной системе координат имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\rho} + \frac{1}{T_2} \rho &= -\frac{1}{2} \gamma H_1 M_z \cos \varphi; \\ \rho \dot{\varphi} + \Delta \omega \rho &= \frac{1}{2} \gamma H_1 M_z \sin \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где

$$\rho = \sqrt{u^2 + v^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{u}{v};$$

$$\Delta \omega = \Delta \omega_0 + \gamma H_m \sin qt.$$

Здесь $M_z = \text{const}$, что реализуется при малом H_1 . Из (25) получим:

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{\Delta \omega + \dot{\varphi}}{\frac{1}{T_2} - \frac{\Delta \dot{\omega} + \ddot{\varphi}}{\Delta \omega + \dot{\varphi}}}. \quad (26)$$

При малом γH_m и $q \ll \frac{1}{T_2}$ из (26) и (25) имеем:

$$v_{\sim} = \gamma^2 H_1 H_m M_z T_2^2 \frac{\Delta \omega_0 T_2}{[1 + (\Delta \omega_0 T_2)^2]} \sin qt. \quad (27)$$

Из (23) $\Delta \omega_0$ равно:

$$\Delta \omega_0 = \omega_0 - \omega = \frac{Q}{Q_n} (\omega_0 - \omega_K). \quad (28)$$

С учетом (28) выражение (27) приобретает вид:

$$v_{\sim} = \gamma^2 H_1 H_m M_z T_2^2 \frac{\frac{\omega_0 - \omega_K}{\delta_K}}{\left[1 + \left(\frac{\omega_0 - \omega_K}{\delta_K}\right)^2\right]} \sin qt. \quad (29)$$

Из (29) видно, что амплитуда v_{\sim} отлична от нуля при $\omega_0 - \omega_K \neq 0$ и равна нулю при $\omega_0 - \omega_K = 0$. Фаза сигнала v_{\sim} изменяется на π при изменении $\omega_0 - \omega_K$. Следовательно, контроль за частотой спинового генератора можно проводить по величине амплитуды v_{\sim} при условии, что ω_K обеспечивает необходимую стабильность.

Стабильность частоты спинового генератора. Исследование этого вопроса можно провести в рамках линейной теории стабилизации частоты [Л. 24—26]. В стационарном состоянии условие баланса фаз записывается в виде

$$\Sigma \varphi_i = f(\omega; \alpha) = 2\pi n.$$

Если в результате изменения какого-то параметра α изменилась частота автоколебаний ω , то в новом устойчивом состоянии снова должно выполняться условие баланса фаз:

$$\Sigma \varphi_i = f(\omega + \Delta \omega; \alpha + \Delta \alpha) = 2\pi n. \quad (30)$$

Это означает, что полное приращение фазы должно быть равно нулю:

$$\Delta \Sigma \varphi_i = \frac{\partial \Sigma \varphi_i}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial \Sigma \varphi_i}{\partial \alpha} \Delta \alpha = 0.$$

Отсюда имеем формулу Шембеля:

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = -\frac{\sum \frac{\partial \varphi_i}{\partial \alpha} \Delta \alpha}{\omega \sum \frac{\partial \varphi_i}{\partial \omega}}. \quad (31)$$

Из (31) следует, что нестабильность генератора $\frac{\Delta \omega}{\omega}$ тем меньше, чем больше знаменатель, т. е. величина $\omega \sum \frac{\partial \varphi_i}{\partial \omega} = \sigma$, называемая фиксирующей способностью системы. Известно, что фиксирующая способность колебательного контура пропорциональна его добротности: $\sigma = -2Q$ [Л. 25].

По аналогии с колебательным контуром найдем σ_n ядерной линии. Из (9) и (6) при $\omega_0 \approx \omega$ имеем $\operatorname{tg} \varphi = -(\omega_0 - \omega) T_2 \approx \varphi$, откуда

$$\sigma_n \approx \omega_0 T_2 = 2Q_n.$$

Для оценки стабильности необходимо знать величину числителя в (31). Для обычных ламповых генераторов $\frac{\Delta \omega}{\omega} \approx 10^{-4} \div 10^{-5}$, а $Q \approx 10^2$. Таким образом, из (31) имеем:

$$\sum \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \Delta \alpha = 10^{-2} \div 10^{-3}.$$

Используя эту оценку, получим нестабильность спинового генератора

$$\left(\frac{\Delta \omega}{\omega}\right)_{\text{с.г.}} = \frac{10^{-2} \div 10^{-3}}{2Q_n}. \quad (32)$$

Величина $Q_n = \frac{1}{2} \omega_0 T_2$ может быть порядка $10^8 \div 10^9$, поэтому ожидаемая величина нестабильности спинового генератора составит:

$$\left(\frac{\Delta \omega}{\omega}\right)_{\text{с.г.}} = 10^{-10} \div 10^{-12}.$$

Принимая меры по уменьшению величины $\sum \frac{\partial \varphi_i}{\partial \alpha} \Delta \alpha$, можно получить еще более высокую стабильность.

Спиновый генератор с дополнительной модуляцией (СГ-1). Практически осуществленный генератор Шмельцера описан в работе [Л. 9]. Для нормальной работы спинового генератора Шмельцера скрещенные катушки должны быть выполнены так, чтобы напряжение на катушке L_1 , наводимое с катушки L_2 , было на 100—120 дБ меньше напряжения на передающей катушке L_2 . Это условие должно удовлетворяться в полосе частот, большей, чем полоса пропускания усилителя. В работе [Л. 9] это условие достигалось применением кварцевого фильтра в усилителе. В работе [Л. 27] компенсация напряжения на входе усилителя осуществлялась с помощью мостиковой схемы. Сужение полосы пропускания было достигнуто за счет двойного преобразования частоты и усиления с помощью узкополосного усилителя промежуточной частоты.

Можно отказаться от компенсирующего устройства на входе приемного усилителя в случае, если сигнал имеет глубину модуляции 100%, что может быть достигнуто при дополнительной низкочастотной модуляции постоянного магнитного поля. Если

постоянное магнитное поле модулируется низкочастотным магнитным полем с частотой $p \gg \frac{1}{T_2}$, то возникает спектр комбинационных частот $\omega \pm np$ [Л. 28]. На основе использования одного из боковых сигналов предложен спиновый генератор СГ-1 [Л. 13 и 14], блок-схема которого дана на рис. 2. Принцип работы генератора сводится к тому, что на образец, помимо постоянного магнитного поля H_0 , действует переменное магнитное поле H_m с частотой p , параллельное H_0 , которое создается независимым звуковым генератором, и поле H_1 высокой частоты $\omega \approx \omega_0 = \gamma H_0$, перпендикулярное H_0 . Под действием этих полей на несущей частоте $\omega + p$ появляется сигнал с глубиной модуляции 100% при резонансных условиях

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 = 0. \quad (33)$$

Принятый на частоте $\omega + p$ сигнал усиливается и поступает на вход смесителя. Вторым напряжением, поступающим на смеситель, является напряжение с частотой p , задаваемое независимым генератором. Усиленный после преобразования сигнал на частоте ω подается на ядра, и тем самым замыкается цепь обратной связи.

Как и в генераторе Шмельцера, в данном генераторе генерируется частота, близкая к ларморовой частоте прецессии ω_0 , но в отличие от первого в нем нет компенсирующего устройства, что обеспечивает надежную работу схемы. Вместо компенсирующего устройства использовано двойное преобразование частоты: один раз в схеме ядерных спинов, другой — в электрической схеме. Частоты на входе и выходе электрической схемы различаются на p , и если p существенно больше полосы ее пропускания, то паразитная генерация исключена.

Для этого генератора методом, аналогичным описанному выше, можно найти стационарную частоту [Л. 20]

$$\omega = \frac{\omega_0 + \frac{1}{\delta_k T_2} (\omega_k - p)}{1 + \frac{1}{\delta_k T_2}} = \frac{\omega_0 + \frac{Q}{Q_n} (\omega_k - p)}{1 + \frac{Q}{Q_n}}. \quad (34)$$

Как и в ранее рассмотренном генераторе Шмельцера, в СГ-1 имеется затягивание частоты. На частоту генерации ω влияет и частота p опорного ге-

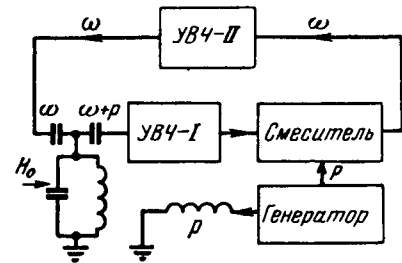


Рис. 2. Блок-схема генератора СГ-1.

нератора, но, так как $p \ll \omega_k$, ее влиянием в первом приближении можно пренебречь.

Экспериментальное исследование СГ-1. Спиновый генератор типа СГ-1 (рис. 2) был создан для работы в магнитном поле при индукции около 500 гс. Генератор работает на частоте 2,005 Мгц. В качестве образца используется жидкое протонсодержащее вещество. Магнит обеспечивает однородность поля приблизительно $2 \cdot 10^{-6}$ в объеме порядка 1 см³. Низкочастотная модуляция (100 кГц) создается кварцевым генератором. Общий коэффициент усиления равен 10^5 . Наименьшая полоса пропускания обеспечивается полосовым фильтром УВЧ-II и равна около 4 кГц. Спиновый генератор работает в режиме ограничения колебаний за счет насыщения ядерных спинов и лишь при наличии образца в контуре. Принципиальная схема УВЧ-I, смесителя и УВЧ-II дана на рис. 3.

Экспериментально исследовалась зависимость амплитуды колебаний спинового генератора при изменении постоянного магнитного поля — область генерации. Область генерации зависит от коэффициента усиления и от полосы пропускания усилителя в цепи обратной связи, возрастающая с их увеличением. Максимальная область слежения за напряженностью поля около 4 кГц. Минимальное время релаксации T_2 , при котором возможна генерация, порядка 10^{-4} сек. Максимальная неоднородность поля $\frac{\Delta H}{H_0}$, допустимая при работе спинового генератора, равна 10^{-3} .

На рис. 4 дана осциллограмма области генерации, показывающая, что огибающая амплитуды колебаний спинового генератора в зависимости от

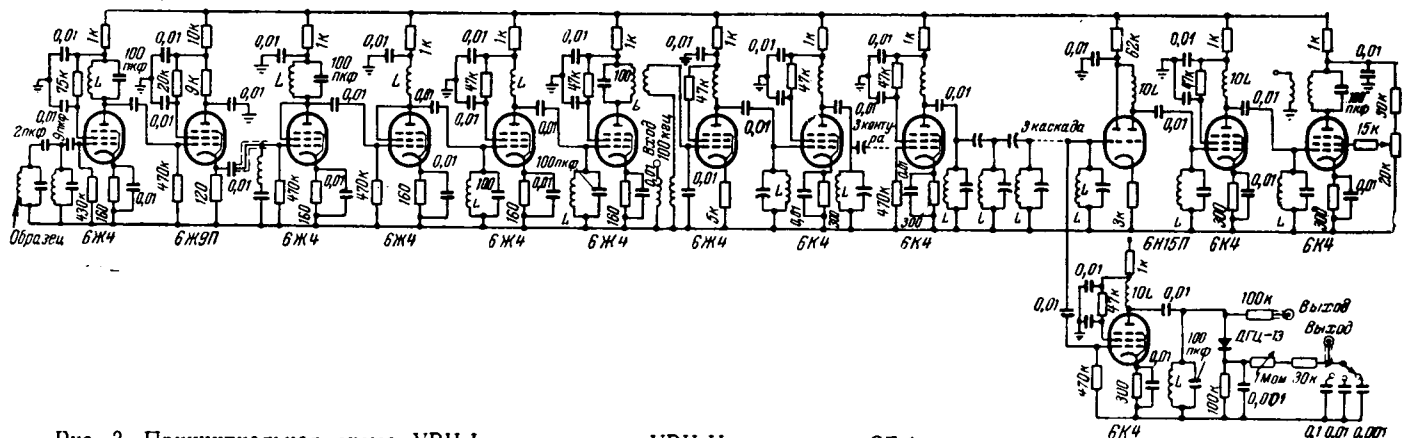


Рис. 3. Принципиальная схема УВЧ-I, смесителя и УВЧ-II генератора СГ-1.

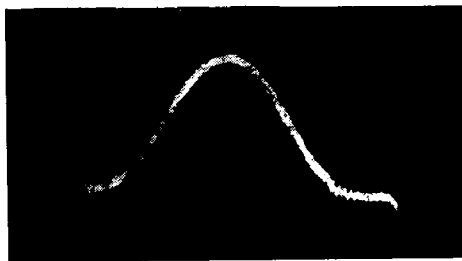


Рис. 4. Осциллограмма области генерации.

расстройки $\omega_0 - \omega_K$ является плавной колоколообразной кривой, близкой к эллиптической. Осциллограмма соответствует случаю, когда ширина линии ядерного магнитного резонанса определяется истинным временем релаксации T_2 , а не неоднородностью поля. При этом линия ядерного магнитного резонанса является однородно уширенной и огибающая колебаний спинового генератора дается формулой (24).

Сравним ширину области генерации, вычисленной по формуле (24), с определенной экспериментально при условии однородно уширенной линии. При $\omega_0 = \omega_K$ из (24) имеем:

$$\gamma^2 H_{1\text{ макс}}^2 T_1 \delta_K \omega_0^2 = b \omega_0^2 \gamma M_0 - \frac{4\delta_K}{T_2} \omega_0^2. \quad (35)$$

С учетом $H_{1\text{ макс}}$, получаемого из (35), при условии $\omega_0 \approx \omega_K$ из (24) имеем:

$$(\omega_0 - \omega_K)^2 = \delta_K^2 \left(\frac{\gamma^2 H_{1\text{ макс}}^2 T_1 T_2}{4} - \frac{\gamma^2 H_1^2 T_1 T_2}{4} \right). \quad (36)$$

Выше было показано, что максимум генерации достигается при условии

$$\frac{\gamma^2 H_{1\text{ макс}}^2 T_1 T_2}{4} = 1.$$

Если определить область генерации как полосу частот, на краю которой амплитуда $H_1 = 0,5 H_{1\text{ макс}}$, то из (36) получим:

$$(\omega_0 - \omega_K)^2 = \frac{3}{4} \delta_K^2.$$

При работе со спиновым генератором с указанными выше параметрами имеем $Q \approx 500$, $\delta_K = 12 \cdot 10^3$, откуда

$$2\Delta f = 2(f_0 - f) = 3,4 \text{ кгц},$$

что близко к определенной экспериментально частоте 4 кгц.

Работа генератора исследовалась в интервале времен релаксации $10^{-3} \div 1 \text{ сек}$. При $T_2 > 0,05 \text{ сек}$ линия ядерного магнитного резонанса при имевшейся неоднородности поля становится неоднородно уширенной, при этом изменяется работа спинового генератора, однако рассмотрение этих вопросов выходит за рамки настоящей статьи.

На спиновом генераторе был проведен эксперимент по съему информации. На постоянное магнитное поле с индукцией 500 гс в том же направлении накладывалось дополнительное переменное магнитное поле с частотой 2 гц. Если на вертикальные пластины осциллографа подать напряжение с ча-

стотой 2 гц, снятое после детектирования амплитуды спинового генератора, а на горизонтальные пластины — напряжение с той же частотой, но от генератора, модулирующего поле, то на экране осциллографа наблюдаются фигуры Лиссажу. При $\omega_0 = \omega_K$ луч выписывает почти горизонтальную линию (в спектре присутствует малая гармоника с частотой 4 гц). При $\omega_0 \neq \omega_K$ луч движется по эллипсу, причем направление движения луча зависит от знака разности $\omega_0 - \omega_K$. При работе с фазовым детектором выходное напряжение проходит через нуль при изменении $\omega_0 - \omega_K$ от значения, большего нуля, к значению, меньшему нуля.

Таким образом, наличие явления затягивания частоты и принципиальная возможность амплитудного съема информации со спинового генератора подтверждаются экспериментально.

Стабильность спинового генератора можно оценить по формуле (32). Экспериментальная оценка стабильности производилась при работе с веществом, имеющим $T_2 = 0,01 \text{ сек}$. В этом случае фиксирующая способность линии $\sigma_\pi = 2Q_\pi \approx 10^5$. Экспериментально нестабильность оценена не хуже чем 10^{-7} . Таким образом, при генерации спектральная ширина линии спинового генератора не менее чем на два порядка уже ширины пассивной линии ядерного магнитного резонанса.

Заключение. Теоретические и экспериментальные исследования спинового генератора показывают, что этот тип приборов может найти и находит применение в различных областях науки и техники, где необходимо производить точное слежение за напряженностью постоянного магнитного поля: в магнетометрах, в стабилизаторах постоянного магнитного поля, а также в спектрометрах ядерного магнитного резонанса.

Использование спинового генератора в магнетометрии позволяет осуществлять непрерывный контроль за изменением напряженности поля, что имеет безусловное преимущество по сравнению с методом свободной прецессии.

Применение спинового генератора для измерения и стабилизации напряженности постоянного магнитного поля по сравнению с использованием пассивной линии ядерного магнитного резонанса повышает достижимую точность, поскольку стабильность спинового генератора значительно выше $\frac{1}{Q_\pi}$, где Q_π — добротность пассивной линии ядерного магнитного резонанса.

Литература

1. Блохинцев Д. И., Основы квантовой механики, ГИИШ, 1961.
2. Эндрю Э., Ядерный магнитный резонанс, ИИЛ, 1957.
3. Лёше А., Ядерная индукция, ИИЛ, 1963.
4. Альтшулер С. А. и Козырев Б. М., Электронный парамагнитный резонанс, ГИФМЛ, 1961.
5. Bloch F., Phys. Rev., 1946, 70, 460.
6. Гоноровский И. С., Основы радиотехники, ГИЛСР, 1957.
7. Калинин В. И. и Герштейн Г. М., Введение в радиофизику, ГИИТЛ, 1957.
8. Schmelzer Ch., Lectures on theory and design of an alternating-gradient proton-synchrotron, Geneva, 1953.

Питание трехфазных нагрузок от грозозащитных тросов линий 220—750 кВ

Канд. техн. наук В. Д. ЮРЕНКОВ

ВНИИЭ

Введение. Идея использования грозозащитных тросов линий электропередачи для электроснабжения мелких потребителей известна давно; в Советском Союзе она реализована в нескольких десятках установок, успешно эксплуатирующихся в энергосистемах в течение многих лет.

Особо следует отметить положительный опыт 5—8-летней эксплуатации подстанций с делителями напряжения тросового типа (ПДНТ) на Волжских линиях 500 кВ. На этих подстанциях мощностью 12—24 кВА впервые применены специальные компенсирующие реакторы, освоенные отечественной промышленностью.

Практика работы указанных подстанций, так же как и теоретический анализ [Л. 1], позволяет со всей определенностью установить допустимость одновременного использования изолированных грозозащитных тросов без какого бы то ни было ухудшения их защитных свойств также в качестве делителей напряжения (ПДНТ).

К основным недостаткам существующих установок относятся их малая мощность и, главное, однофазность, препятствующая широкому применению силовой нагрузки (асинхронных электродвигателей). Эти недостатки обусловлены неприемлемым угловым сдвигом векторов напряжения разных тросов линии, который на одноцепных двухтросовых линиях лежит в пределах 150—180°, а на двухцепных с согласованным циклом транспозиции в пределах 10—30°. Симметрирование этих векторов к углу 120° затруднено необходимостью подвески на большой длине дополнительных тросов или сооружения специальных линий 10—35 кВ, приближенных к среднему проводу.

Значительно более плодотворна предложенная в [Л. 1] идея использования углового сдвига в 120° за счет перехода тросов через транспозиционные опоры или разрывы на них тросов. Выбирая надлежащим образом длины участков таких тросов, удается получать как на одностросовых, так и на

двухтросовых линиях делители напряжения (ТДН) с угловым сдвигом между полюсами 120° и с заданным напряжением относительно земли. При этом применением соответствующих схем ТДН обеспечивается в широких пределах независимость положения потребителей относительно транспозиционных опор. Присоединяя к ним реакторы и трансформаторы по схеме, изображенной на рис. 1,а, можно получить на стороне низшего напряжения трансформатора равноугольную трехфазную систему напряжений.

Рассмотрим возможности электроснабжения потребителей трехфазным током в такой схеме.

Так как линии 35 и 110 кВ имеют незначительную длину и сооружаются в большинстве без тросов, будем в дальнейшем рассматривать только линии электропередачи 220—750 кВ, в которых цикл транспозиции имеет протяженность 200—300 км, а мощности, получаемые от их ТДН, составляют несколько сотен киловатт, т. е. достаточны для электрификации современных сельских потребителей.

Потенциал протяженных делителей напряжения тросового типа. Значительная длина тросов делителей напряжения (ТДН) на линиях 330—750 кВ заставляет считаться с распределенностью параметров, а также учитывать их магнитные связи с проводами линии.

Приняв обозначения, показанные на рис. 1,б, можно записать уравнения линии электропередачи с двумя тросами, учитывающие поставленные условия:

$$-\frac{dU_i}{dx} = \sum_{k=1}^5 z_{ik} I_k; \quad (1)$$

$$-\frac{dI_i}{dx} = \sum_{m=1}^5 y_{im} U_m,$$

9. Fechner E., Storek W., Hochfrequenzspectroskopie, 1961.

10. Проспект спектрометра А-60 фирмы Varian, США, 1960.

11. Владимирский К. В. и Лабзов Б. А., ПТЭ, 1961, № 4.

12. Скрипов Ф. И., ДАН СССР, 1958, 121, 998.

13. Умарходжаев Р. М., Вестник МГУ, 1963, № 5.

14. Умарходжаев Р. М., Авторское свидетельство № 826987/26-25, декабрь 1963 г.

15. Demelt H. G., Phys. Rev. 105, 1487, 1957.

16. Abragam A., Combrisson J., Solomon J., Compt. Rend. 1956, 245, 157.

17. Владимирский К. В., ЖЭТФ, 1957, 33, 532.

18. Курочкин С. С., Радиотехника и электроника, 1958, 2, 198.

19. Сборник «Магнитный резонанс и его применения», изд. Уральского политехнического института, 1961.

20. Умарходжаев Р. М., Известия вузов, Радиофизика, 1964, № 6.

21. Теодорчик К. Ф., Автоколебательные системы, ГИТТЛ, 1952.

22. Харкевич А. А., Нелинейные и параметрические явления в радиотехнике, ГИТТЛ, 1956.

23. Paskard M. E., Rev. Sci. Instr. 1948, 19, 435.

24. Шембель Б. К., К вопросу о расчете частоты автоколебаний и ее стабильности, ИЭСТ, 1937, № 2.

25. Бонч-Бруевич А. М., Применение электронных ламп в экспериментальной физике, ГИТТЛ, 1954.

26. Грошковский Я., Генерирование высокочастотных колебаний и стабилизация частоты, ИИЛ, 1954.

27. Веселаго В. Г., Радиотехника и электроника, 1961, 5, 849.

28. Андерсон В., Сборник ЯМР и ЭПР спектроскопия, изд-во «Мир», 1964.

[1.3.1965]



где $z_{ik} = r_i + j\omega L_{ik}$ — погонное активное сопротивление троса i и сопротивление взаимной индукции (и самоиндукции) между этим тросом и остальными проводами ($k=5$), Ом/км;

$y_{ik} = \omega C_{ik}$ — погонная проводимость между тросом i и остальными ($k=5$) проводами линии, Ом/км;

I_i, U_i, I_k, U_m — токи и потенциалы тросов ($i=4, 5$, см. рис. 1, б), токи (I_k) и потенциалы (U_m) проводов ($k=5, m=5$).

Эти системы уравнений путем разложения в ряд Маклорена позволяют получить с учетом двух первых членов разложения следующие расчетные соотношения для определения напряжений тросов:

$$\begin{aligned} U_4 = \frac{1}{y_{44}^2 - y_{45}^2} \left[I_\Phi \frac{l}{2} (y_{44} q_{413} - y_{45} q_{431}) e^{j\varphi} - \right. \\ \left. - U_\Phi (y_{44} p_{413} - y_{45} p_{431}) \right]; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} U_5 = \frac{1}{y_{44}^2 - y_{45}^2} \left[I_\Phi \frac{l}{2} (y_{55} q_{531} - y_{45} q_{513}) e^{j\varphi} - \right. \\ \left. - U_\Phi (y_{55} p_{531} - y_{45} p_{513}) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

I_Φ, U_Φ, φ — ток, напряжение и фазовый угол тока линии;

l — длина разземленного троса;

q и p — операторы влияния трехфазной линии на соответствующий трос.

а) Оператор влияния, обусловленного электрическими связями троса с проводами линии. Например,

$$p_{413} = y_{41} - 0,5(y_{42} + y_{43}) - j \frac{\sqrt{3}}{2}(y_{42} - y_{43}). \quad (4)$$

Первая цифра числового индекса оператора указывает номер соответствующего троса (см. рис. 1, б). Вторая определяет взаимную проводимость первого члена правой части предыдущего уравнения, третья — взаимную проводимость вто-

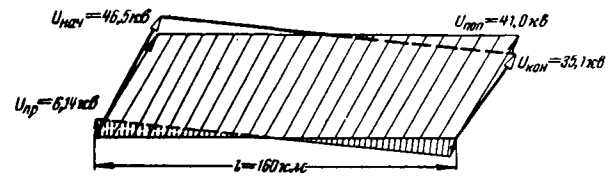


Рис. 2. Эпюра поперечной и продольной составляющих напряжения тросового делителя напряжения линии 500 кВ. ($I_{раб} = 750$ а).

рого члена скобок. Таким образом, в совокупности цифры индекса устанавливают величину и взаимное положение всех членов оператора.

б) Оператор влияния, обусловленного магнитными связями трехфазной линии с соответствующим тросом. Например,

$$q_{531} = q_{53} - 0,5(q_{52} + q_{51}) - j \frac{\sqrt{3}}{2}(q_{52} - q_{51}). \quad (5)$$

При этом члены правой части уравнения представляют собой суммы:

$$q_{ik} = \sum_{m=1}^5 y_{im} z_{mk}. \quad (6)$$

Первый член в уравнениях (2) и (3) характеризует величину и фазу продольной составляющей напряжения троса и зависит от тока линии и протяженности ТДН. Средняя удельная величина этой составляющей на линиях 220—500 кВ при полной нагрузке равна 50—80 в/км. При питании ПДНТ по схеме, изображенной на рис. 1, а, продольная составляющая непосредственного влияния на параметры режима подстанции не оказывает.

Второй член указанных уравнений определяет поперечную составляющую напряжения ТДН. Так как она зависит только от фазового напряжения линии, которое на протяжении ТДН можно считать постоянным, то практически поперечная составляющая напряжения остается неизменной по длине троса. При расчете токораспределения в схеме ПДНТ эта составляющая принимается за э. д. с. схемы. На рис. 2 показана эпюра общего потенциала и его отдельных составляющих для троса протяженностью 160 км на линии 500 кВ, иллюстрирующая высказанные положения.

При разработке схем делителей тросового типа в ряде случаев необходимо объединять участки троса, векторы напряжения которых сдвинуты на угол α . В этом случае напряжение объединенного троса может быть найдено из следующего уравнения:

$$\dot{U}_{1-2} = \dot{U}_1 \frac{C_{01} l_1 + C_{02} l_2 e^{j\alpha}}{C_{01} l_1 + C_{02} l_2 + C}, \quad (7)$$

где \dot{U}_1 — напряжение троса на первом участке; l_1, l_2 — длины объединяемых участков троса; C_{01}, C_{02}, C — удельные емкости объединяемых участков троса, которые в общем случае могут быть не равны, и дополнительная емкость, вводимая в схему ТДН (соединительная линия к потребителю, конденсаторная батарея).

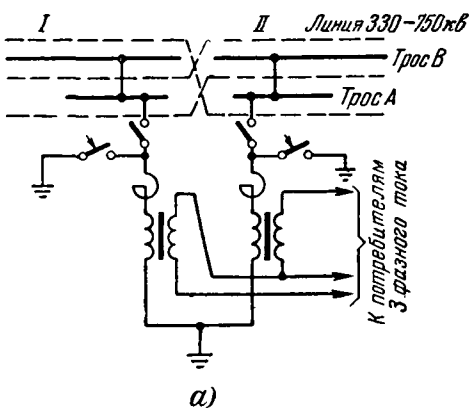
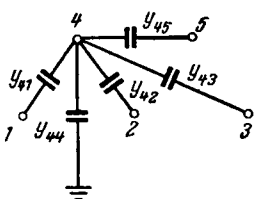


Рис. 1.

а — схема двухполюсного тросового делителя напряжения с заданным потенциалом и углом сдвига в 120° с компенсирующим реактором и понизительным трансформатором; б — схема расположения проводов, тросов линии и их проводимостей.



В частном случае при объединении одинаковых тросов, лежащих по разные стороны от транспозиционной опоры, α равна в зависимости от схемы транспозиции 120 или 240° и тогда

$$U_{I-II} = U_I \frac{l_I + l_{II} e^{j120^\circ(240^\circ)}}{l_I + l_{II} + \frac{C}{C_{011}}}, \quad (8)$$

где l_I, l_{II} — длины объединяемых тросов первого и второго шагов транспозиции.

Схема делителя и мощность ПДНТ. Напряжения полюсов ТДН в трехфазной схеме, помимо указанного ранее сдвига в 120°, должны быть равны между собой по величине и соответствовать напряжению стандартного понизительного трансформатора.

Их емкостные сопротивления, включая емкость проводов соединительной линии между трассой электропередачи и понизительной подстанцией, также должны быть равны и соответствовать мощности ПДНТ.

Наконец, расположение лучей делителя должно позволять транспортировку электроэнергии к подстанции из одной точки присоединения по двухпроводной линии.

Удовлетворить совокупности всех перечисленных требований путем применения однотипной схемы ТДН не представляется возможным. На рис. 3 приведены некоторые наиболее характерные схемы тросовых делителей на линиях сверхвысокого напряжения. Схемы А, Б, В, Г предназначены к применению на одной из электропередач 500 кВ Советского Союза¹. На них указаны длины соединительных линий и мощности ПДНТ. Характерно, что соответствующим выбором схемы удается получить трехфазную систему электроснабжения практически в любой точке расположения потребителей относительно транспозиционных опор (кроме участков, прилегающих к концам линий).

По своим техническим и экономическим показателям эти схемы не равнозначны.

Серьезным недостатком схемы Б является необходимость разземления троса на полном шаге транспозиции независимо от мощности подстанции. От этого недостатка в значительной мере свободна схема В, в которой изменение положения потребителей в пределах полушага транспозиции позволяет варьировать в некоторых пределах длину ТДН в зависимости от требуемой мощности ПДНТ. В схеме А мощность отбора может изменяться от нуля до предельной величины, однако перемещение потребителей при этом ограничено допустимой протяженностью соединительной линии.

Схема Г идентична схеме А, но в ней функции участка троса снижающего напряжения ТДН выполняют сосредоточенные емкости-конденсаторы. Схемы Д и Е на линиях 330 и 750 кВ разработаны, исходя из задачи получения от тросов этих линий максимально возможных мощностей. В них общая длина тросов в каждом полюсе ТДН достигает

¹ Расчеты по схемам ПДНТ выполнены инж. И. Симовским.

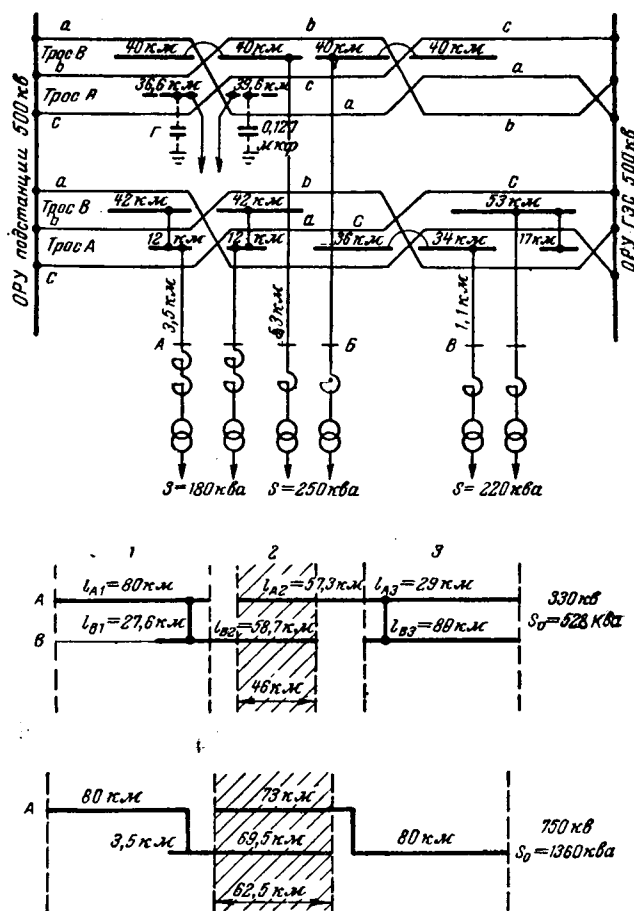


Рис. 3. Типовые схемы тросового делителя напряжения.
Примечание. Штриховкой показана возможная область присоединения ПДНТ к тросам ЛЭП.

двух и более шагов транспозиции. Однако зона возможного присоединения подстанции, отмеченная штриховкой, оказывается при этом ограниченной 46—63 км.

На том же рис. 3 на линии 500 кВ показаны схемы включения ПДНТ в их реакторно-трансформаторной части. Реакторы применены типовые, собираемые при необходимости в каскадные (или смешанные, параллельно-последовательные) схемы, как это, например, имеет место для подстанции А. Трансформаторы однофазные стандартные. На стороне высшего напряжения они включаются двумя фазами с заземленной нулевой точкой; на стороне низшего — в открытый треугольник. При применении трехфазных трансформаторов с группой соединения «звезда — треугольник» номинальная мощность ПДНТ недоиспользуется на 42%. На рис. 4 приведена векторная диаграмма зарядов и напряжений тросового делителя напряжения, собранного по схеме А (рис. 3) для питания подстанции мощностью 180 кВА. Векторы напряжения тросов, например U_{A1} и U_{B1} , сдвинуты на угол, близкий к 180° (177°). Угловой сдвиг в 120° получен за счет составления ТДН из участков троса В, расположенных на разных сторонах транспозиционной опоры. Необходимый коэффициент деления ($K=500/35$) достигнут путем присоединения к основному тросу В отрезка троса А, выбранного с таким расчетом, чтобы общий заряд полученной

композиции тросов создавал необходимый потенциал ТДН, равный стандартному напряжению

$$U_0 = \frac{35 \text{ кВ}}{3}. \text{ При этом}$$

$$\left| \frac{\dot{Q}_{BI} + \dot{Q}_{AI}}{C_{BI} + C_{AI} + C} \right| = \left| \frac{\dot{Q}_{BII} + \dot{Q}_{AII}}{C_{BII} + C_{AII} + C} \right| = U_0, \quad (9)$$

где C_{BI} , C_{AI} , C_{BII} , C_{AII} , C — емкости соответствующих отрезков троса и соединительной линии.

Изложенный метод построения векторной диаграммы является одновременно графоаналитическим методом расчета схем ТДН. При этом следует иметь в виду, что

$$\begin{aligned} C_{BI} + C_{AI} + C &= C_{BII} + C_{AII} + C = \\ &= C_\Sigma = \frac{S_{0\phi}}{\omega U_0 U_k}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $S_{0\phi}$ — мощность одного полюса ПДНТ;

U_k — напряжение на зажимах реактора при полной нагрузке;

C_Σ — общая емкость троса делителя, соединительной линии и добавочных конденсаторов (при их наличии в схеме).

Из уравнения (10) следует, что общая мощность ПДНТ для схем, изображенных на рис. 3, и им подобных равна:

$$S_0 = 2U_0 U_k \omega C_\Sigma. \quad (11)$$

На рис. 4 для полюса U_{01} приведена также векторная диаграмма напряжений на элементах рассматриваемой ПДНТ при токе полной нагрузки и фазовом угле ϕ . Из нее видно, что напряжение троса (U_T) в этом режиме по отношению к режиму

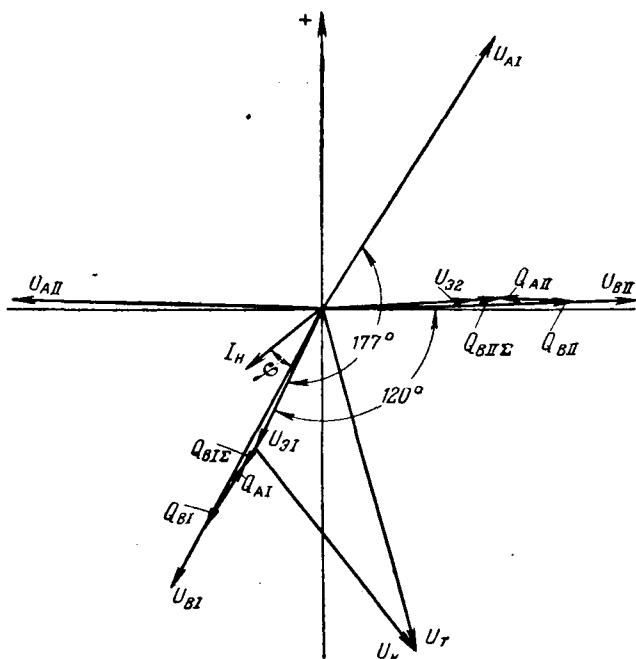


Рис. 4. Векторная диаграмма зарядов и напряжений тросового делителя линии напряжения 500 кВ и трехфазной ПДНТ 500/35 кВ, мощностью 180 кВА.

холостого хода возрастает в 2,3 раза, достигая 47 кВ.

Одним из основных факторов, ограничивающих мощность рассматриваемых подстанций, является требование сохранения достаточно малого защитного угла тросов. Оно заставляет при стандартных опорах ограничить длины подвесных гирлянд тросов тремя-четырьмя изоляторами.

На рис. 5 показаны кривые, характеризующие предельные мощности ПДНТ на линиях 220—750 кВ при $U_{0\phi} = 10,5$ —20,2 кВ; $U_k = 35$ кВ и длине соединительной линии 5 км.

Пунктирная кривая на рис. 5 характеризует удельную мощность подстанции, т. е. мощность, приходящуюся на 1 пог. км троса.

Несколько меньшая мощность, получаемая от тросов линии 500 кВ по сравнению с линией 330 кВ, обусловлена менее благоприятным расположением троса на первой из них.

Электропередачи сверхвысоких напряжений, как правило, состоят из двух линий, проходящих на значительной части трассы в непосредственной близости одна от другой, поэтому общая возможная мощность ПДНТ на таких участках составляет двойную величину от вышеприведенной и достаточна для питания даже наиболее крупных сельскохозяйственных и иных нагрузок.

Выбор изоляции, гашение дуги сопровождающего тока троса. Как следует из уравнений (2) и (3) и рис. 2, напряжение одного конца троса за счет продольной составляющей этого напряжения (в зависимости от фазового угла тока линии) даже в элементарном ТДН — при одиночном тросе — будет больше напряжения другого конца. В схеме более сложного делителя с учетом присоединения нагрузки определение потенциалов ТДН значительной протяженности требует нахождения токораспределения в многоконтурной схеме. Расчет показывает, что, например, в схеме А (рис. 3) напря-

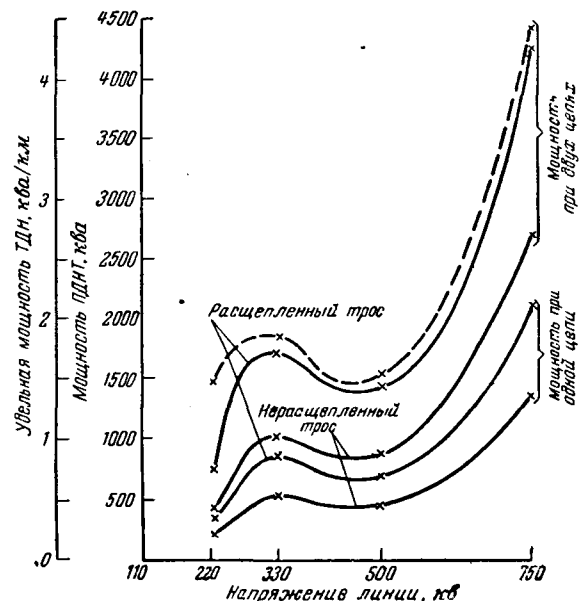


Рис. 5. Предельные мощности трехфазных ПДНТ на линиях высокого напряжения.

— общая мощность подстанций с делителями напряжения (ПДНТ); — — — удельная мощность тросового делителя напряжения (ТДН).

жения концов троса B равны 43 и 47 кв, т. е. различаются почти на 10%, что следует учитывать при выборе изоляции троса. Должен быть учтен и рост напряжения троса, вызываемый ростом нагрузки, в частности током короткого замыкания.

Далее, изоляция троса должна выдерживать воздействие внутренних перенапряжений, обусловленных коммутацией питающей линии и самой ПДНТ и, наконец, воздействие волн напряжения, распространяющихся по тросу при грозовых разрядах. Естественно, что расчет изоляции троса на столь высокие напряжения привел бы к ее чрезмерному завышению. Поэтому целесообразно гирлянды изоляторов троса шунтировать защитными промежутками.

Разрядное напряжение промежутков необходимо отстроить от электрической прочности гирлянд изоляторов троса, испытательного напряжения оборудования ПДНТ и коммутационных перенапряжений, связанных с эксплуатацией линии электропередачи и подстанции.

За разрядное напряжение изоляции троса целесообразно принять мокроразрядное напряжение его подвесных гирлянд [Л. 2]. Электрическая прочность защитного промежутка должна быть ниже этого напряжения не менее чем на 10—15%.

Учитывая, что срабатывание защитных промежутков не представляет опасности для оборудования линии, ПДНТ и режима их работы, кратность допустимых внутренних перенапряжений можно существенно снизить по сравнению с кратностью обычных электроустановок и принимать при расчетах равной 1,5—2 по отношению к напряжению троса при полной нагрузке (3,5—4 по отношению к напряжению троса при холостом ходе). По этим же соображениям допустимо в 2—2,5 раза повысить предельное рабочее напряжение ТДН (до 45—50 кв).

В табл. 1 приведены данные расчета изоляционных характеристик ПДНТ 500/35 кв мощностью 180 кв (схема А, рис. 3), иллюстрирующие соотношения между разрядными и испытательными напряжениями отдельных элементов схемы.

Восстановление электрической прочности защитных промежутков гирлянд троса связано с успешностью гашения ими сопровождающего тока короткого замыкания ТДН промышленной частоты при пробое промежутков.

Эксперименты, проведенные на действующих ПДНТ*, показывают, что в области токов короткого замыкания троса 0,5—1,0 а при восстанавливаемом напряжении $U_0 = 24—30$ кв градиенты гашения дуги составляют 500—520 в/см. Так как в этом случае общая длина дуги равна 50—65 см, то искровые промежутки, помимо стержневой части, должны иметь растягивающие «рога», предотвращающие петлеобразование по ее длине [Л. 1].

При подключении к тросовому делителю реакторно-трансформаторной части схемы, т. е. в нормальных условиях работы ПДН, градиенты гашения возрастают в 2—2,5 раза, несмотря на рост восстанавливаемого напряжения троса по отно-

Таблица 1

Электрическая прочность элемента ПДНТ 500/35, 180 кв	Испытательное (пробивное) напряжение промышленной частоты, кв действ	Испытательное напряжение при полной волне (минимальное), кв макс	Испытательное напряжение при срезанной волне, кв макс
Гирлянда изоляторов из трех элементов	$U_{разр} = 92$	$U_{разр} = 316$	—
Внешняя изоляция реактора и трансформатора 35 кв	$U_{исп} = 105$	$U_{исп} = 185$	—
Внутренняя изоляция реактора и трансформатора 35 кв	$U_{исп} = 85$	$U_{исп} = 200$	$U_{исп} = 225$
Электрическая прочность защитного промежутка, равного 150 мм	$U_{разр} = 73$	$U_{разр} = 127$	—

Примечание. Допускаемая защитным промежутком кратность внутренних перенапряжений при этих условиях составит: в режиме полной нагрузки — 1,55, в режиме холостого хода — 3,7.

шению к земле с 24 до 47 кв при нагруженной ПДНТ. Такое облегчение условий гашения обусловлено включением параллельно дуге активного сопротивления обмоток реактора и трансформатора.

Несмотря на указанные обстоятельства, при предельных длинах ТДН на линиях 220—750 кв расчетные градиенты могут существенно превышать градиенты гашения.

Для облегчения гашения дуги в таких схемах целесообразно использовать искусственный прием: после зажигания дуги на искровом промежутке через некоторое время, необходимое для ее растягивания (например, 2—3 сек), следует автоматически от действия защиты минимального напряжения включить короткозамыкатель, установленный на вводе подстанции, и шунтировать дугу тока троса. Тем самым из восстанавливающегося напряжения исключается его поперечная составляющая, напряжение троса снижается, а ток во вновь образованной петле короткозамыкатель — пробитый промежуток возрастает. Вследствие предварительного растянутой дуги, как показывают расчеты, создаются условия, благоприятные для ее гашения.

Схема, конструкция, экономические показатели. Типовая схема включения ПДНТ показана на рис. 1,а. (На примере ПДНТ 500/35 кв мощностью 180 кв). От схем обычных подстанций и подстанций с делителями напряжения емкостного и индуктивного типов ее отличает отсутствие отделителя. Ненормальные режимы в этой подстанции прекращаются путем воздействия защитных устройств на короткозамыкатель и путем последующего заземления троса.

Суждение об экономической эффективности рассматриваемых подстанций можно составить на основании экономических показателей указанной выше ПДНТ 500/35 кв мощностью 180 кв. В качестве ее обобщенного экономического показателя приняты расчетные затраты. Для сопоставления с другими способами электрификации были опре-

* С участием Л. В. Протодьяковой и Т. П. Царегородцевой.

делены расчетные затраты также для подстанций с делителями напряжения конденсаторного (ПДНЕ) и индуктивного (ПДИИ) типов равной мощности. Вариант электрификации этой нагрузки от трансформаторной подстанции не рассматривался как заведомо менее экономичный. Данные расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип подстанции с делителями напряжения 500/35 кв, 180 кв	Стоимость основного оборудования, руб.	Стоимость годовых потерь энергии, руб.	Расчетные затраты, руб.	Примечание
ПДНТ	4 240	210	740	Соединительная линия в стоимости оборудования не учитывалась
ПДНЕ	10 300	503	1 793	
ПДИИ	10 750	1 585	2 935	

Из табл. 2 видно, что расчетные затраты для ПДНТ существенно меньше, чем для подстанций с делителями напряжения сосредоточенного типа, поэтому такие подстанции являются наиболее выгодны для электрификации нагрузок, расположенных в зоне прохождения линий сверхвысокого напряжения.

Выводы. 1. Подстанции с делителями напряжения протяженного типа, в качестве которых использованы изолированные от земли грозозащитные тросы, позволяют получать от линий электропередачи электроэнергию трехфазного тока с вполне симметричной звездой напряжения.

При этом полностью сохраняются грозозащитные свойства тросов в отношении проводов линии.

2. Предельные мощности подстанций, питаемых через тросовые делители напряжения при электропередачах из двух линий, в среднем составляют: на линиях 220 кв, 400 кв, 330—500 кв 1 Мва; на линиях 750 кв — 2,7 Мва. При расщеплении тросов (подвеске двух дополнительных тросов на каждой линии) эти мощности возрастают на 60%.

3. Возможности получения столь значительных мощностей при решении вопросов электрификации в районе прохождения электропередач 220—750 кв должны быть широко использованы проектными организациями.

Литература

1. Булашевич Д. Н. и Юренков В. Д., Емкостный отбор мощности от линий электропередачи, Госэнергоиздат, 1959.
2. Справочник по электрическим сетям высокого напряжения под ред. М. В. Хомякова, Госэнергоиздат, 1962.

[16.11.1964]



УДК 621.382

Рациональное построение системы параметров мощных полупроводниковых вентиляй

И. Л. КАГАНОВ и Ю. М. КАЛНИБОЛОТСКИЙ

Полупроводниковые вентиляы получают все более широкое применение во всех областях техники. Преимущества наиболее новых типов полупроводниковых вентиляй — германиевых и кремниевых — общеизвестны. Однако применяющиеся в настоящее время грубо ориентировочные расчеты режимов работы этих вентиляй не позволяют в максимальной степени использовать их преимущества. Обычно в паспорте вентиля приводятся величины, соответствующие предельному режиму работы вентиля в одной схеме выпрямителя (в схеме испытания), при одной или нескольких температурах окружающей среды и при активной нагрузке. Однако практически вентиляы весьма редко используются в той же схеме, по которой они испытываются. Поэтому паспортные данные служат лишь грубым ориентиром для выбора режима работы вентиля.

Как известно, основным фактором, ограничивающим эксплуатационные возможности полупроводниковых вентиляй, является температура $p-n$ перехода прибора. Для этих типов вентиляй характерно выделение значительной мощности в не-большом объеме полупроводника, что затрудняет

теплоотвод. Поэтому германиевые и кремниевые вентиляы крайне чувствительны к тепловым перегрузкам. Превышение температуры сверх допустимой на 5—10°С часто приводит к увеличению в 2 раза выхода вентиляй из строя. С повышением температуры ухудшаются выпрямительные свойства диодов, увеличивается обратный ток и, следовательно, возникает опасность потери термической устойчивости.

Нагрев $p-n$ перехода определяется как прямыми, так и обратными потерями мощности. При этом анализ паспортных данных германиевых и кремниевых вентиляй показывает, что обратные потери мощности не превосходят 10% прямых потерь. Поэтому будем считать, что температура $p-n$ перехода в нормальном режиме определяется температурой окружающей среды и величиной прямых потерь мощности, а обратные потери будем учитывать при определении максимально допустимой величины перегрева $p-n$ перехода.

Температура $p-n$ перехода определяется формулой [Л. 1]

$$T = T_0 + K_1 P_{\text{п}}, \quad (1)$$

где T_0 — температура окружающей среды, °C;
 K_1 — термическое сопротивление от p - n перехода к окружающей среде, °C/вт;
 P_{π} — прямые потери мощности, вт.

Для вентиляй заданной конструкции величина K_1 может быть рассчитана аналитически или определена экспериментально. Прямые потери мощности могут быть измерены либо рассчитаны по известной прямой вольт-амперной характеристике.

При токах, составляющих 10—30% номинального (по паспорту), зависимость температуры p - n перехода от величины тока через вентиль близка к линейной. Это объясняется следующим. Общее падение напряжения на германиевом или кремниевом диоде состоит из двух основных величин: U_1 — падения напряжения на p - n переходе плюс э. д. с. Дембера и U_2 — падения напряжения на базе диода, являющегося омическим. При увеличении тока через вентиль U_1 перестает, а U_2 продолжает возрастать. Прекращение роста U_1 объясняется тем, что p - n переход полностью заливается носителями. Общие потери мощности на диоде можно найти также как сумму потерь на p - n переходе (с учетом э. д. с. Дембера) и на омическом сопротивлении базы диода. Решение системы уравнений, описывающих протекание тока через диод [Л. 1], для случая больших уровней инжекции приводит к выражению:

$$P_{\pi} = [U_1 + C] I + \text{const}, \quad (2)$$

где C — постоянная величина, равная усредненному падению напряжения на базе диода, при котором прямые потери мощности оказываются связанными линейно с величиной тока, протекающего через вентиль.

Для того чтобы связать выражение (2) с величинами, легко определяемыми по вольт-амперной характеристике, применим кусочно-линейную аппроксимацию этой характеристики, положив $U_1 = U_{\pi}$, где U_{π} — приведенное напряжение, определяемое по характеристике, снятой на постоянном токе (порог выпрямления). Тогда, как показано в [Л. 1],

$$P_{\pi} = \left(U_{\pi} \sqrt{\frac{\beta_a}{2\pi}} + R_i I_{\pi} \right) I_d, \quad (3)$$

где β_a — угол протекания анодного тока;
 $R_i I_{\pi}$ — постоянная величина, определяющая усредненное падение напряжения на базе диода [эквивалентна C в (2)];
 I_{π} — приведенный ток, который может быть найден по известной величине $R_i I_{\pi}$ и вольт-амперной характеристике вентиля;
 I_d — действующее значение тока через вентиль.

С учетом (3) и (1) имеем:

$$T_j = T_0 + K_1 \left(U_{\pi} \sqrt{\frac{\beta_a}{2\pi}} + R_i I_{\pi} \right) I_d \quad (4)$$

или

$$\Delta T_{j\pi} = K_2 I_d, \quad (5)$$

где

$$K_2 = K_1 \left(U_{\pi} \sqrt{\frac{\beta_a}{2\pi}} + R_i I_{\pi} \right). \quad (6)$$

Погрешность в определении температуры p - n перехода по (4) или (5) при $I_d \leq I_{\pi}$ не превышает [Л. 1] величины

$$\delta T = 0,25 K_1 R_i I_{\pi}^2, \quad (7)$$

а при $I_d > I_{\pi}$ — величины

$$\delta T_{\text{макс}} = \Delta T_{\text{макс}} \left(\sqrt{\frac{K_1 R_i}{\Delta T}} I_{\pi} - 1 \right), \quad (8)$$

где $\Delta T_{\text{макс}}$ — максимально допустимый перегрев p - n перехода.

Эксперимент и расчеты показывают, что $\frac{\delta T}{T}$ не превышает 5—7% для вентиляй на токи от сотен миллиампер до сотен ампер.

Таким образом, зная величины K_1 , U_{π} и K_{20} ($K_2 = K_{20}$ при $\beta_a = \pi$), можно с достаточной для практики степенью точности определить величину перегрева p - n перехода в статическом термическом режиме при заданных значениях β_a и I_d . Поэтому K_1 , K_{20} и U_{π} можно выбрать в качестве параметров германиевых и кремниевых вентиляй.

В рабочем режиме необходимо, чтобы $\Delta T_{j\pi} \leq \Delta T_{j\pi, \text{макс}}$. Максимально допустимый перегрев ограничивается двумя факторами: максимально допустимой температурой p - n перехода для данного типа вентиляй и возможностью потери тепловой устойчивости за счет экспоненциальной зависимости обратного тока от температуры. Максимально допустимая температура p - n перехода задается заводом-изготовителем. Вопрос о тепловой устойчивости рассмотрен в [Л. 1], где показано, что

$$\Delta T_{j\pi, \text{макс}} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{1}{2,7\chi K_1 P_0}; \quad (9)$$

здесь χ — температурный коэффициент для обратных потерь мощности, 1/°C;

$P_0 = U_{\text{об.д}} I_{\text{об.д}}$ — обратные потери мощности при температуре T_0 ($U_{\text{об.д}}$ и $I_{\text{об.д}}$ — действующие значения обратного напряжения и тока).

Уравнение (9) определяет верхнюю границу перегрева за счет обратного тока. При больших температурах обратные потери мощности вызывают возрастающий от периода к периоду перегрев, приводящий в конечном счете к тепловому пробую и выходу вентиля из строя. Действующее значение обратного напряжения определяется схемой, в которой работает вентиль, и может быть вычислено обычными методами. Для определения действующего значения обратного тока обратную вольт-амперную характеристику для германиевых вентиляй можно аппроксимировать прямой, параллельной оси напряжений; для кремниевых вентиляй обратное сопротивление может быть принято постоянным. Тогда обратный ток у германиевых вентиляй будет иметь форму прямоугольного импульса, а у кремниевых — будет повторять форму обратного напряжения. Эксперимент показывает, что такая аппроксимация приемлема с достаточной для практики степенью точности.

В любом режиме необходимо, чтобы $T_0 + \Delta T_{j\pi, \text{макс}} \leq T_{j\pi, \text{макс}}$, где $T_{j\pi, \text{макс}}$ — максимально допу-

стимая температура p - n перехода, которая является параметром вентиля. К параметрам вентиля следует отнести также величину χ . Значение P_0 определяется при испытании вентиля на обратное напряжение перед включением его в схему.

Германиевые и кремниевые вентили часто работают при повторно-кратковременных нагрузках, в аварийных режимах и при других видах импульсных нагрузок. И в этих условиях необходимо правильно определить максимальное значение температуры p - n перехода, которое не должно превышать допустимого. Рациональнее всего расчеты проводить по графически заданной зависимости $K_{20}(t)$, которую следует прилагать к паспорту вентиля. Используя принцип суперпозиции и формулу для пересчета K_{20} при заданном значении β_a

$$K_2(t) = K_{20}(t) \frac{U_n \sqrt{\frac{\beta_a}{2\pi}} + R_i I_n}{0,707 U_n + R_i I_n}, \quad (10)$$

можно найти температуру в конце импульса тока любой формы. Эта величина опять-таки не должна превышать максимально допустимого значения $\Delta T_{j\max}$.

Если в момент спада тока перегрузки обратное напряжение отключается, то $\Delta T_{j\max}$ определится максимально допустимой температурой перехода, при которой не возникает еще возможность нарушения механической прочности внутренней конструкции вентиля. Если после сброса тока нагрузки обратное напряжение на вентиле сохраняется, то $\Delta T_{j\max}$ определяется по формуле, аналогичной (9):

$$\Delta T_{j\max} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{1}{\chi K_1(0) P_0}, \quad (11)$$

где $K_1(0)$ — значение K_1 в момент времени $t=0$, определяемое по графически заданной зависимости $K_{20}(t)$ с использованием (6);

P_0 — обратные потери в момент возникновения тока перегрузки.

Итак, приняв в качестве параметров вентилях величины U_n , K_1 , $K_{20}(t)$ и χ , можно достаточно точно проанализировать тепловой режим вентиля.

Параметры вентиля могут быть известны с некоторыми погрешностями. Обозначим через ΔT_0 суммарную погрешность в определении температуры p - n перехода описанным методом. Допустимое действующее значение прямого тока через вентиль при точном задании всех параметров определится по формуле:

$$I_d = I_n = \frac{\Delta T_{j\max}}{K_2} = \frac{\Delta T_{j\max}}{K_2}, \quad (12)$$

где $\Delta T_{j\max}$ определяется в соответствии с (9).

При $\Delta T_0 \neq 0$

$$I_d = \frac{\frac{1}{\chi} \ln \frac{1}{\chi K_1 P_0 e^{\chi \Delta T_0}}}{K_2}. \quad (13)$$

Разделив (13) на (12), получим:

$$\frac{I_d}{I_n} = 1 - \frac{\chi \Delta T_0}{\ln \frac{1}{\chi K_1 P_0}}. \quad (14)$$

Очевидно, что при $\Delta T_0 \neq 0$ необходимо выбирать $I_d < I_n$, иначе возможна потеря тепловой устойчивости вентиля.

Формула (14) позволяет правильно выбрать точность задания тех или иных параметров. Например, вентиль типа Д-305 имеет следующие параметры: $K_1 = 5^\circ \text{C/вт}$, $K_{20} = 2^\circ \text{C/а}$, $\chi = 0,055 \text{ 1/}^\circ \text{C}$, $P_0 = 0,4 \text{ вт}$, $\delta T_{\max} = 2^\circ \text{C}$. При 30%-ном разбросе в величинах всех параметров будет: $\chi \Delta T_0 = (0,055 + 0,015)(2 + 0,6) = 0,18$; $\chi K_1 P_0 = (0,055 + 0,015)(5 + 1,5)(0,4 + 0,12) = 0,24$ и в соответствии с (14) $\frac{I_d}{I_n} = 0,55$. Исследование выражения (14)

показывает, что наиболее точно необходимо задавать величины χ и K_2 . В этом случае можно достичь наиболее полного использования вентиля по прямому току без возникновения опасности потери термической устойчивости.

Каждый период изменения напряжения сети происходит переключение вентиля с проводящего направления в непроводящее. После окончания импульса прямого тока p - n переход в течение некоторого времени, которое назовем временем восстановления, остается залитым инжектированными носителями. В этот период обратный ток диода в основном определяется параметрами внешней цепи обратного тока. После восстановления запирающих свойств p - n переход принимает на себя обратное напряжение, а еще имеющиеся в области базы заряды быстро рассасываются благодаря диффузии.

Процесс восстановления униполярных свойств диода может оказать существенное влияние на работу схемы выпрямителя, особенно если в цепи обратного тока имеется индуктивность. В период восстановления в этой индуктивности происходит накопление энергии. После восстановления запирающих свойств обратный ток диода резко падает и на индуктивности возникает перенапряжение, которое прикладывается к вентилу в обратном направлении, что может привести к его пробое. Наличие разброса времени восстановления ограничивает количество вентилях, которые можно соединять последовательно [Л. 2].

При расчете времени восстановления [Л. 2] для линейно спадающего прямого тока и линейно нарастающего обратного тока получена формула:

$$0,4 \frac{\text{tg } \beta}{\text{tg } \alpha} = e^{\frac{\pi^2}{4} T_b} \left[\frac{8}{\pi^2} T_b - \frac{\pi^2}{24} + \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\exp \left[-\pi^2 \left(k + \frac{1}{2} \right)^2 T_b \right]}{(2k+1)^4} \right]; \quad (15)$$

здесь $\frac{\text{tg } \beta}{\text{tg } \alpha}$ — отношение скорости спада прямого тока к скорости нарастания обратного тока;

$T_b = \frac{t D_p}{\omega_n^2}$ (D_p — коэффициент диффузии дырок в n -типе материала, ω_n — ширина области базы).

Для определения отношения $\frac{\lg \beta}{\lg \alpha}$ в схемах выпрямителей ввиду малости величины $\frac{\omega_n^2}{D_p}$ кривую переходных токов вблизи нуля всегда можно линеаризовать и затем пользоваться зависимостью (15), заданной графически. Таким образом, переходный электрический процесс характеризуется постоянной времени $\frac{\omega_n^2}{D_p}$, которая также должна быть включена в число параметров вентилялей.

К параметрам полупроводниковых вентилялей следует отнести также амплитудное значение обратного пробивного напряжения. Для кремниевых вентилялей эта величина в первом приближении может быть принята независимой от температуры. Для германиевых вентилялей пробивное напряжение уменьшается с увеличением температуры:

$$U_{пр} = U_K e^{-\chi_1 (T_j - T_K)}, \quad (16)$$

где U_K — обратное пробивное напряжение при температуре испытания T_K ;

χ_1 — температурный коэффициент для обратного тока, который может быть определен по зависимости обратного тока от температуры.

Подытожив сказанное, получим следующую систему параметров германиевых и кремниевых вентилялей:

$K_1, ^\circ\text{C}/\text{cm}$ — тепловое сопротивление при заданной системе охлаждения от p - n перехода к окружающей среде;

$K_{20}(t), ^\circ\text{C}/a$ — графически задаваемая зависимость от времени коэффициента пропорциональности между температурой p - n перехода и действующим значением тока через вентиль;

U_{Γ} — приведенное напряжение, определяемое по вольт-амперной характеристике на постоянном токе (порог выпрямления);

χ (или χ_1), $1/^\circ\text{C}$ — температурный коэффициент для обратных потерь мощности (или для обратного тока);

$\frac{\omega_n^2}{D_p \text{ сек}}$ — постоянная времени переходного электрического процесса переключения вентиля с прямого направления на обратное;

$U_K, \text{ в}$ — обратное пробивное напряжение при температуре испытания T_K ;

$T_{j \text{ макс}}, ^\circ\text{C}$ — максимально допустимая температура p - n перехода в вентиле данной конструкции.

В настоящее время для вентилялей общаются параметры $T_{j \text{ макс}}$ и U_K , а для

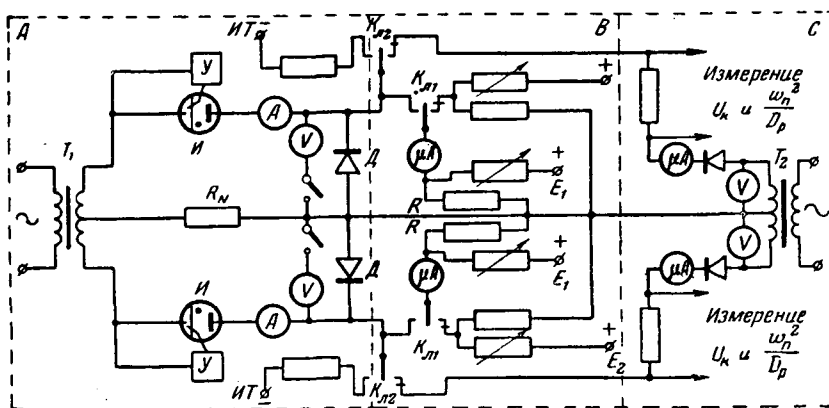
некоторых вентилялей задается прямая вольт-амперная характеристика, по которой можно найти U_{Γ} .

Для измерения предлагаемой системы параметров применялась схема, показанная на рисунке. Схема испытания разделяется на три основные части: А, В и С.

Часть А схемы обеспечивает питание диодов D прямым током, величина которого регулируется сопротивлением нагрузки R_H . Трансформатор T_1 , игнитроны $И$ и блоки управления игнитронами $У$ позволяют питать диоды D током выбранной формы и величины. При заводских испытаниях целесообразно подобрать $\beta_a = \pi$, тогда при измерениях сразу же получится значение K_{20} . В этой части схемы амперметры и вольтметры позволяют определить действующее значение прямого падения напряжения, прямого тока и, следовательно, соответствующие потери мощности.

Часть В схемы служит для измерения температуры p - n перехода, для чего в данном случае используется зависимость прямого падения напряжения от температуры. Эта зависимость, снятая в термостате и построенная в относительной системе координат, получается одной и той же по крайней мере для данного типа вентилялей. Пользуясь этим градуировочным графиком и измеряя падение напряжения для разных значений тока, задаваемого частью А схемы, можно получить зависимости T_j от P и I_d , а по ним определить K_1 и K_{20} .

При измерении зависимости падения напряжения от температуры источник тока ИТ задает постоянное значение прямого тока через испытуемые диоды — такое же, как при градуировке. В те промежутки времени, когда прямой ток не протекает через диод D (когда к диоду должно прикладываться нормальное обратное напряжение), поляризованное реле $K_{\Gamma 1}$ подключает этот диод к микроамперметру и сопротивлению R , которые служат для измерения падения напряжения на диоде. Перед измерениями прибор устанавливается на нуль с помощью источника напряжения E_1 . Для установки микроамперметра на нуль имитируется падение напряжения на диоде D путем включения источника E_2 через делитель напряжения. С увеличением прямого тока диод разогревается и падение напряжения на нем уменьшается, что регистрируется микроамперметром.



Применяя вместо микроамперметра осциллограф или самопишущий прибор, можно получить зависимости K_1 и K_2 от времени.

Часть С схемы используется для определения значений ω_n^2/D_p , U_k и χ . Чтобы измерить постоянную времени ω_n^2/D_p , подбирают величину обратного напряжения так, чтобы $\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \alpha$. Тогда $T_b = 0,35$ и по величине времени восстановления t_b легко найти ω_n^2/D_p :

$$\frac{\omega_n^2}{D_p} = \frac{t_b}{0,35}. \quad (17)$$

Обратное пробивное напряжение измеряется обычным способом, например путем наблюдения на экране осциллографа обратной вольт-амперной характеристики. Наблюдение этой же характеристики позволяет найти величину χ , если измерить напряжение $U_{об.д}$ и ток $I_{об.д}$ во вторичной обмотке трансформатора T_2 . В большей степени у германиевых и в меньшей у кремниевых вентилях до потери тепловой устойчивости в обратной вольт-амперной характеристике наблюдается гистерезис: прямой луч идет ниже обратного, так как в период приложения обратного напряжения вентиль несколько охлаждается и его обратный ток уменьшается. При потере тепловой устойчивости обратные потери мощности будут разогревать вентиль таким образом, что к началу каждого следующего периода температура будет больше, чем в конце предыдущего. С увеличением температуры растут обратные потери, что приводит к дальнейшему росту температуры. Таким образом, при исчезновении в обратной ветви вольт-амперной характе-

ристики петли гистерезиса наступает потеря тепловой устойчивости. Далее гистерезис появится снова, но обратный луч будет ниже прямого.

Определение χ производится по измеренной величине потерь $P_{об} = U_{об.д} I_{об.д}$ и уже известному значению K_1 :

$$\chi = \frac{1}{P_{об} K_1}. \quad (18)$$

При измерении χ вентиль должен находиться в статическом тепловом режиме, т. е. перегрев за счет прямых потерь мощности должен достигнуть своего установившегося значения.

Таким образом, испытательная установка позволяет производить измерение всей системы параметров вентиля.

Получив в заводских условиях статистические данные о разбросе параметров вентилях данного типа, можно с помощью формулы (14) выбрать необходимую точность задания основных параметров. Это позволит правильно вести массовые испытания. Использование рассматриваемой системы параметров позволит получить максимальные технико-экономические показатели устройств с германиевыми и кремниевыми вентилями при обеспечении высокой надежности их эксплуатации.

Литература

1. Калниболотский Ю. М., К расчету полупроводникового выпрямителя, работающего на емкость. Труды Киевского политехнического института, сб. статей электротехнического факультета, Киев, 1962.
2. Калниболотский Ю. М. и Свечников С. В., Перенапряжения при коммутации германиевых вентилях, Известия вузов, Радиотехника, 1962, № 1.

[7.10.1963]



УДК 62-503.53

О расчете комбинированной системы с двухдвигательным приводом

Инж. В. П. ГЭРБУНОВ, кандидат техн. наук С. В. КОРОТКОВ и инж. Б. А. ШИШКОВ

Ленинград

В непрерывных системах автоматического регулирования в настоящее время существует много эффективных методов реализации высоких динамических параметров. При обычной структуре следящих систем, работающих по отклонению, эти методы сводятся к расчету и экспериментальной проверке различного вида обратных связей и введению в систему не только сигнала ошибки, но также интеграла от нее и высших производных.

С помощью этих методов иногда реализуют добротности по скорости до 100—200 1/сек, а для некоторых простых систем — даже до 500—600 1/сек. Однако требование апериодического или монотонного переходного процесса при больших добротностях не позволяет простыми средствами осуще-

ствить систему регулирования. В этих случаях прибегают к введению в процесс регулирования не только сигнала ошибки (отклонения), но и сигнала по возмущению (или управляющего сигнала). Это дает возможность осуществить условия инвариантности регулируемой величины от этого возмущения (или ошибки от управляющего сигнала).

Инвариантные системы автоматического регулирования являются новым шагом в теории автоматического регулирования. В работах Г. В. Щипанова, В. С. Кулебакина, Б. Н. Петрова, J. R. Моог, Г. М. Уланова и др. показано, что во многих случаях такие системы дают очень высокие качественные показатели при сравнительно простых средствах. Иногда эти системы оказываются

единственно возможными для достижения заданных показателей процесса регулирования.

В работах П. Ф. Клубника, В. И. Дунаева, Б. Г. Крымова и др. рассмотрен частный случай комбинированного управления системой двухдвигательного привода с дифференциалом. Такие системы позволяют реализовать большие добротности простыми средствами и при этом получить заданное качество переходных процессов.

Система с двухдвигательным приводом представляет собой сочетание двух систем, объединенных дифференциалом, и может быть выполнена в различных вариантах в зависимости от вида главных обратных связей этих систем.

На рис. 1 представлена скелетная система двухдвигательного привода с дифференциалом:

- D_c, D_k — двигатели силового и корректирующего приводов;
 Y_c, Y_k — усилители силового и корректирующего приводов;
 D — дифференциал;
 P — дифференцирующее звено;
 $\theta_c, \theta_k, \theta_n$ — углы поворота валов дифференциала со стороны силового, корректирующего приводов и нагрузки соответственно;
 θ — входное возмущение.

На рис. 1,а приведена блок-схема двухдвигательной системы типа «угол — угол», состоящая из двух позиционных следящих приводов, объединенных дифференциалом. Привод с обратной связью, взятой с вала нагрузки, называется корректирующим, а привод, обратная связь которого берется до дифференциала, — силовым. На рис. 1,б приведена блок-схема двухдвигательной системы типа «угол — скорость». Корректирующий привод этой системы аналогичен корректирующему при-

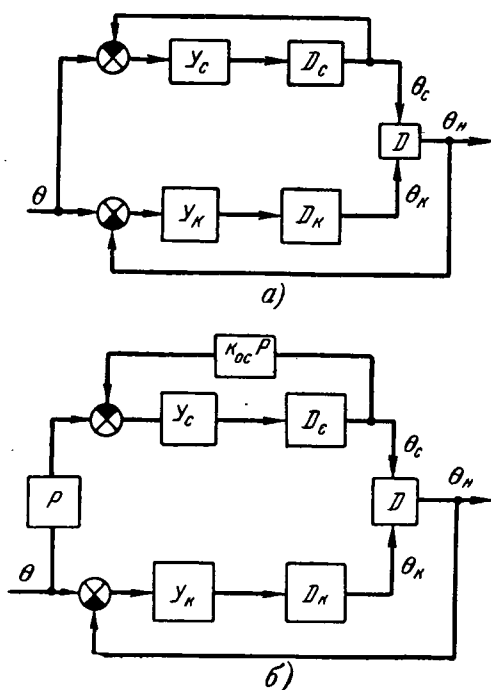


Рис. 1.

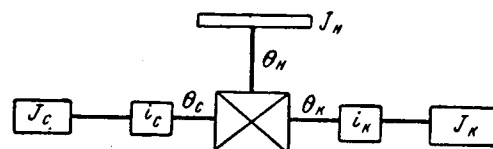


Рис. 2.

воду системы типа «угол — угол». Силовой привод обрабатывает скорость управляющего воздействия. Обратная связь силового привода является скоростной и берется с коэффициентом $k_{o.c.}$

Разберем подробнее следящий привод с механическим дифференциалом. Уравнения дифференциального механизма (рис. 2) с тремя инерционными нагрузками могут быть записаны следующим образом:

$$i_c^2 J_c p^2 \theta_c = i_c M_c - M_p; \quad (1)$$

$$i_k^2 J_k p^2 \theta_k = i_k M_k - M_p; \quad (2)$$

$$J_n p^2 \theta_n = M_p - M_n; \quad (3)$$

$$\theta_k + \theta_c = \theta_n, \quad (4)$$

где J_c, J_k, J_n — моменты инерции силового и корректирующего приводов и нагрузки соответственно;

i_c, i_k — передаточные отношения редукторов силового и корректирующего приводов соответственно (включая передаточное отношение дифференциала);

M_c, M_k — моменты, создаваемые двигателями;

M_n — момент нагрузки выходного вала;

M_p — реактивный момент на «солнечных» колесах дифференциала.

Приведем моменты инерции системы к валу силового привода, входящему в дифференциал. Для простоты положим, что $M_k = M_n = 0$ и действует только момент на валу силового привода. Тогда из уравнений (1) — (4) получаем:

$$i_c M_c = \left(i_c^2 J_c + \frac{i_k^2 J_k J_n}{i_k^2 J_k + J_n} \right) p^2 \theta_c = (i_c^2 J_c + J'_{n.k}) p^2 \theta_c. \quad (5)$$

Суммарный приведенный момент инерции системы состоит из двух составляющих;

$i_c^2 J_c$ — момент инерции силового привода, приведенный к оси θ_n ;

$J'_{n.k}$ — составляющая моментов инерции корректирующего привода и нагрузки, приведенных к оси θ_n .

Из уравнения (5) следует:

$$\frac{1}{J'_{n.k}} = \frac{1}{i_k^2 J_k} + \frac{1}{J_n}. \quad (6)$$

По аналогии составляющая моментов инерции силового привода и нагрузки, приведенных к оси θ_k , может быть получена, если положить $M_c = M_n = 0$ и

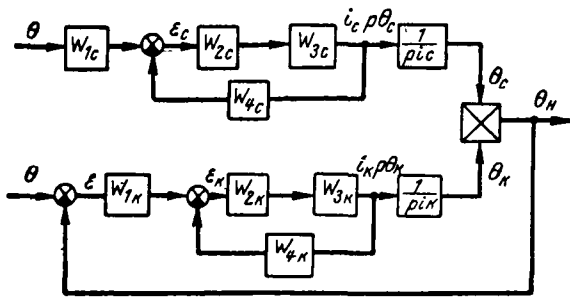


Рис. 3

считать, что на систему воздействует лишь момент корректирующего привода

$$\frac{1}{J'_{н.с}} = \frac{1}{i_c^2 J_c} + \frac{1}{J_n}. \quad (7)$$

На основании соотношений (6) и (7) можно сделать вывод, что инерционные массы, присоединяемые к валам дифференциала, образуют «параллельное соединение».

Рассмотрим структурную схему комбинированной следящей системы типа «угол—скорость», приведенную на рис. 3. Передаточные функции с индексом «с» относятся к силовому приводу, с индексом «к» — к корректирующему.

W_{1c}, W_{1k} — передаточные функции звеньев, не охваченных корректирующей обратной связью;

W_{2c}, W_{2k} — передаточные функции звеньев, охваченных корректирующей обратной связью;

i_c, i_k — передаточные отношения соответствующих редукторов;

$$W_{3c} = \frac{k_{д.с} F_c}{J_c p + F_c}; \quad W_{3k} = \frac{k_{д.к} F_k}{J_k p + F_k}; \quad (8)$$

W_{3c}, W_{3k} — передаточные функции двигателей;
 W_{4c}, W_{4k} — передаточные функции корректирующих обратных связей;

F_c, F_k — величины, характеризующие наклон механических характеристик двигателей;

$k_{д.с}, k_{д.к}$ — коэффициенты усиления двигателей;

ϵ_c, ϵ_k — ошибки приводов;

ϵ — ошибка комбинированной следящей системы.

Все передаточные функции в общем случае зависят от оператора p . Если рассматривается система «угол—угол», то передаточная функция обратной связи силового привода запишется следующим образом:

$$W'_{4c} = W_{4c} \frac{1}{pi_c}.$$

Так как пусковые моменты двигателей

$$M_{0.с} = k_{д.с} F_c W_{2c} \epsilon_c;$$

$$M_{0.к} = k_{д.к} F_k W_{2k} \epsilon_k$$

и

$$\epsilon_c = W_{1c} \theta - i_c W_{4c} p \theta_c;$$

$$\epsilon_k = W_{1k} \epsilon - i_k W_{4k} p \theta_k = W_{1k} \theta - W_{1k} \theta_n - i_k W_{4k} p \theta_k,$$

то по структурной схеме (рис. 3) определим моменты, развиваемые двигателями системы:

$$M_c = M_{0.с} - i_c F_c p \theta_c = k_{д.с} F_c W_{2c} W_{1c} \theta - k_{д.с} F_c W_{2c} W_{4c} i_c p \theta_c - i_c F_c p \theta_c; \quad (9)$$

$$M_k = M_{0.к} - i_k F_k p \theta_k = k_{д.к} F_k W_{2k} W_{1k} \theta - k_{д.к} F_k W_{2k} W_{1k} \theta_n - k_{д.к} F_k W_{2k} W_{4k} i_k p \theta_k - i_k F_k p \theta_k. \quad (10)$$

Решив совместно уравнения (1) — (4) и (9), (10) и сделав соответствующие преобразования, получим:

$$\begin{aligned} \theta_c &= \frac{W_{1c}}{pi_c} \frac{W_{2c} W_{3c}}{1 + W_{2c} W_{3c} W_{4c}} \theta - \frac{1}{pk_{д.с} F_c i_c^2} \frac{W_{3c}}{1 + W_{2c} W_{3c} W_{4c}} \times \\ &\quad \times M_n - \frac{1}{pk_{д.с} F_c i_c^2} \frac{W_{3c}}{1 + W_{2c} W_{3c} W_{4c}} J_n p^2 \theta_n; \\ \theta_k &= \frac{W_{1k}}{pi_k} \frac{W_{2k} W_{3k}}{1 + W_{2k} W_{3k} W_{4k}} \theta - \frac{1}{pk_{д.к} F_k i_k^2} \times \\ &\quad \times \frac{W_{3k}}{1 + W_{2k} W_{3k} W_{4k}} M_n - \frac{1}{pk_{д.к} F_k i_k^2} \frac{W_{3k}}{1 + W_{2k} W_{3k} W_{4k}} \times \\ &\quad \times J_n p^2 \theta_n - \frac{W_{1k}}{pi_k} \frac{W_{3k}}{1 + W_{2k} W_{3k} W_{4k}} \theta_n; \\ \theta_n &= \theta_k + \theta_c. \end{aligned} \quad (11)$$

Введем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_c &= \frac{W_{1c}}{pi_c} \frac{W_{2c} W_{3c}}{1 + W_{2c} W_{3c} W_{4c}}; \\ \Phi'_c &= \frac{1}{pk_{д.с} F_c i_c^2} \frac{W_{3c}}{1 + W_{2c} W_{3c} W_{4c}}; \\ \Phi_k &= \frac{W_{1k}}{pi_k} \frac{W_{2k} W_{3k}}{1 + W_{2k} W_{3k} W_{4k}}; \\ \Phi'_k &= \frac{1}{pk_{д.к} F_k i_k^2} \frac{W_{3k}}{1 + W_{2k} W_{3k} W_{4k}}; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где Φ_c — передаточная функция замкнутой (по выходному валу двигателя) системы силового привода;

Φ_k — передаточная функция разомкнутой по выходному валу дифференциала и замкнутой по выходному валу двигателя системы корректирующего привода;

Φ'_c, Φ'_k — передаточные функции ошибки от момента нагрузки.

Тогда система уравнений (11) будет выглядеть следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \theta_c &= \Phi_c \theta - \Phi'_c J_n p^2 \theta_n - \Phi'_c M_n; \\ \theta_n &= \Phi_k \theta - \Phi_k \theta_n - \Phi'_k J_n p \theta_n - \Phi'_k M_n; \\ \theta_n &= \theta_k + \theta_c. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Решив (13) относительно θ_n , получим:

$$\theta_k = \frac{\Phi_c + \Phi_k}{1 + \Phi_k + (\Phi'_c \Phi'_k) J_n p^2} \theta - \frac{\Phi'_c + \Phi'_k}{1 + \Phi_k + (\Phi'_c + \Phi'_k) J_n p^2} M_n. \quad (14)$$

Ошибка всей комбинированной системы равна:

$$\begin{aligned} \epsilon &= \theta - \theta_n = \frac{1 - \Phi_c + (\Phi'_c + \Phi'_k) J_n p^2}{1 + \Phi_k + (\Phi'_c + \Phi'_k) J_n p^2} \theta + \\ &\quad + \frac{\Phi'_c + \Phi'_k}{1 + \Phi_k + (\Phi'_c + \Phi'_k) J_n p^2} M_n. \end{aligned} \quad (15)$$

Обозначим

$$\lambda(p) = (\Phi'_c + \Phi'_k) J_n p^2, \quad (16)$$

тогда

$$\varepsilon = \frac{1 - \Phi_c + \lambda(p)}{1 + \Phi_k + \lambda(p)} \theta + \frac{\Phi'_c + \Phi'_k}{1 + \Phi_k + \lambda(p)} M_n. \quad (17)$$

Условия абсолютной инвариантности ошибки ε к управляющему воздействию θ будут следующими:

$$1 - \Phi_c + \lambda(p) = 0 \text{ или } \Phi_c = 1 + \lambda(p). \quad (18)$$

Это точное условие абсолютной инвариантности приводилось в работах П. Ф. Клубника, но осуществить его оказалось весьма затруднительно. Кроме того, выполнение этого условия чрезмерно усложняет систему регулирования. Поэтому в этой же статье указывалось на возможность приближенной реализации этих условий. Для этой цели рассматривались коэффициенты ошибок эквивалентной передаточной функции системы. В других статьях был приведен упрощенный вариант расчета системы с двухдвигательным приводом, но не указаны условия, при которых такой расчет можно производить. Кроме того, при расчете нигде не учитывается момент нагрузки, что для реальных систем недопустимо.

В настоящей статье показаны некоторые из этих условий, которые обычно соблюдаются для большого числа точных следящих систем, при этом учитывается влияние момента нагрузки.

Рассмотрим выражение $1 + \lambda(p)$, подставив в него значения Φ'_c и Φ'_k из (8) и (12).

После преобразований получим:

$$1 + \lambda(p) = \frac{(i_c^2 J_c i'_k J_k + J_n i_k^2 J_k + J_n i_c^2 J_c) p^2 + [F_k i_k^2 (1 + k_{o.k} W_{2k} W_{4k}) (i_c^2 J_c) + J_n + F_c i_c^2 (1 + k_{d.c} W_{2c} W_{4c}) (i_k^2 J_k J_n + J_n)] p + i_c^2 J_c i_k^2 J_k p^2 + [F_k i_k^2 (1 + k_{d.k} W_{2k} W_{4k}) i_c^2 J_c + F_c i_c^2 (1 + k_{d.c} W_{2c} W_{4c}) i_k^2 J_k] p + \frac{+ F_k F_c (1 + k_{o.c} W_{2c} W_{4c}) (1 + k_{d.c} W_{2k} W_{4k})}{+ F_k F_c (1 + k_{d.c} W_{2c} W_{4c}) (1 + k_{d.k} W_{2k} W_{4k})}. \quad (19)$$

Если принять

$$J_n \ll i_k^2 J_k \text{ и } J_n \ll i_c^2 J_c, \quad (20)$$

что справедливо для большинства точных следящих систем, получим:

$$1 + \lambda(p) \approx 1. \quad (21)$$

В этом случае

$$\varepsilon \approx \frac{1 - \Phi_c}{1 + \Phi_k} \theta + \frac{\Phi'_c + \Phi'_k}{1 + \Phi_k} M_n. \quad (22)$$

Это приближенное уравнение можно преобразовать:

$$\varepsilon \approx E_k [E_c \theta + \Phi'_c M_n + \Phi'_k M_k], \quad (23)$$

где $E_k = \frac{1}{1 + \Phi_k}$ — передаточная функция корректирующего привода по ошибке;

$E_c = 1 - \Phi_c$ — передаточная функция силового привода по $(\theta - \theta_c)$ [см. расшифровку обозначений к формуле (12)].

Уравнение (23) можно представить в виде функциональной схемы воздействий управляющего сиг-

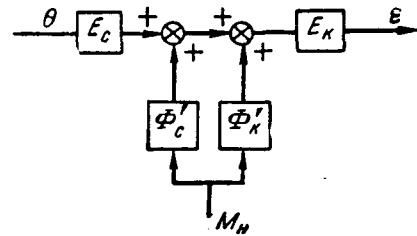


Рис. 4

нала и момента нагрузки на ошибку комбинированной системы (рис. 4).

Из этой функциональной схемы, составленной по уравнению (23), видно, что в случае малых инерционных масс нагрузки по сравнению с введенными инерционными массами двигателей приводов, расчет можно вести отдельно для каждой из составляющих систем. При этом следует учесть, что на корректирующую систему будет воздействовать момент нагрузки, а в качестве эквивалентного управляющего воздействия нужно принимать суммарную ошибку силовой системы, которая состоит из ошибки от управляющего сигнала и ошибки от момента нагрузки.

Следует отметить, что при некотором отличии в передаточных отношениях силового и корректирующего приводов (отношение $\frac{i_k}{i_c} = 10 \div 50$) составляющая ошибки $\Phi'_k M_n$ обычно бывает ничтожно мала даже при жесткости механической характеристики привода, равной естественной жесткости характеристики двигателя.

Поэтому структурная схема и расчет всей системы еще более упрощаются.

Очень часто встречается в следящих системах также и другое условие, чрезвычайно упрощающее расчет, когда $M_n \approx \text{пост.}$

Тогда при условии (20) системы силового и корректирующего приводов можно рассчитывать только по управляющему сигналу, причем добротность по скорости (в случае системы «угол—скорость») в системе корректирующего привода может быть взята по сравнению с добротностью по скорости в обычной структуре следящей системы во столько раз меньше, во сколько раз ошибка по скорости силовой системы меньше максимально заданной скорости по координате.

Действительно, добротность по скорости в обычной следящей системе

$$K_{\text{дл}} = \frac{\left(\frac{d\theta}{dt} \right)_{\text{макс}}}{\varepsilon_{\text{доп}}}. \quad (24)$$

Добротность по скорости в комбинированной следящей системе (рис. 3) при названных условиях

$$K_{\Sigma 2} = \frac{\left[\frac{d(\theta - \theta_c)}{dt} \right]_{\max}}{\varepsilon_{доп}} = \frac{\left[\frac{d(\theta - \theta_c)}{dt} \right]_{\max}}{\left(\frac{d\theta}{dt} \right)_{\max}} K_{\Sigma 1} = \frac{1}{m_c} K_{\Sigma 1}, \quad (25)$$

где

$$\frac{1}{m_c} = \frac{\left[\frac{d(\theta - \theta)}{dt} \right]_{\max}}{\left(\frac{d\theta}{dt} \right)_{\max}}.$$

Уравнение (19) показывает, что условие (21) будет соблюдаться и при весьма жестких механических характеристиках приводов, причем безразлично, достигается ли это естественными механическими характеристиками или с помощью жестких обратных связей по скорости. Важно, чтобы системы силового и корректирующего приводов были устойчивы.

Обычно всегда стараются обеспечить в точных следящих системах условие жесткости механических характеристик приводов. Таким образом, системы силового и корректирующего приводов, входящие в комбинированную следящую систему, только тогда можно считать независимыми и вести их расчет, когда соблюдается по крайней мере одно из условий:

а) момент инерции нагрузки мал по сравнению с приведенными моментами инерции двигателей и им можно пренебречь;

б) жесткость механических характеристик приводов достаточно велика и в пределах номинальных моментов двигателей влиянием моментов нагрузки и приводов друг на друга можно пренебречь.

В противном случае расчет составляющих комбинированной системы может быть проведен раздельно, но при этом следует проводить последующую проверку точности, устойчивости и качества переходных процессов по эквивалентной передаточной функции [Л. 4] всей системы, а затем вновь корректировать отдельные составляющие системы, повторяя эту операцию несколько раз.

Отметим еще одно обстоятельство, которое является важным для систем регулирования, требующих большой плавности.

Следящая система с обычной структурой, обладающая хорошей устойчивостью на больших скоростях, на малых скоростях может быть неустойчива вследствие нелинейного характера изменения момента сил трения. Из [Л. 1 и 2] известно, что кривая зависимости момента сил трения на исполнительской оси от скорости ее движения $M_{тр} = f(\Omega)$, изображенная на рис. 5, в зоне малых скоростей имеет участок с отрицательным наклоном. Этот отрицательный наклон означает, что при некоторой малой скорости условия устойчивости могут быть нарушены и в системе возникнут автоколебания. Однако существуют способы уменьшения зоны неустойчивой работы системы на малых скоростях. Это достигается введением жестких и гибких отрицательных обратных связей, которые расширяют рабочий диапазон скоростей.

В комбинированной системе расширение рабо-

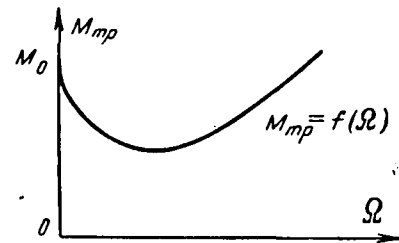


Рис. 5.

чего диапазона устойчивых скоростей и сужение зоны неустойчивой работы будет гораздо более эффективным. Действительно, соотношения (24) и (25) показывают, что силовая система будет работать устойчиво в диапазоне скоростей, по крайней мере, от $\left(\frac{d\theta}{dt} \right)_{\max}$ до $\left[\frac{d(\theta - \theta_c)}{dt} \right]_{\max}$, т. е. в диапазоне $1:m_c$. Корректирующая система будет работать от скорости $\left[\frac{d(\theta - \theta_c)}{dt} \right]_{\max}$ до минимальной скорости устойчивого регулирования. Пусть диапазон устойчивых скоростей корректирующей системы равен $1:m_k$, тогда полный диапазон комбинированной системы равен их произведению:

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_c} \frac{1}{m_k}. \quad (26)$$

Поскольку составляющие комбинированной системы имеют более низкие требования (24) и (25), то нетрудно реализовать с помощью простых жестких обратных связей большие диапазоны устойчивого регулирования по скорости в каждой из систем и тем самым общий диапазон рабочих скоростей $\frac{1}{m}$ сделать весьма большим (2000—20 000). Зона неустойчивой работы на малых скоростях также значительно сокращается.

Все отмеченные преимущества комбинированной системы с двухдвигательным приводом позволяют создать высококачественные точные следящие системы и, в частности, систему ведения астрономических инструментов на азимутальной монтировке.

Существующие телескопы имеют, как правило, экваториальную монтировку, при которой часовая ось телескопа ориентируется параллельно оси Земли. В этом случае для получения отчетливых изображений при фотографировании небесных объектов необходимо компенсировать суточное вращение Земли, что достигается равномерным поворотом трубы телескопа вокруг часовой оси со скоростью одного оборота в сутки. При этом система управления при слежении за звездами получается очень простой.

Однако при проектировании крупных телескопов в экваториальной монтировке возникают большие трудности при компенсации смещения оптических осей.

В связи с этим для телескопов с высокой разрешающей способностью большие перспективы приобретает применение азимутальной монтировки, при которой одна ось телескопа направлена в зе-

нит, а вторая располагается перпендикулярно первой. Для телескопов с диаметром главных зеркал порядка нескольких метров азимутальная монтировка имеет ряд решающих преимуществ по сравнению с экваториальной (параллактической). К этим преимуществам относятся простота механической конструкции, хорошие условия работы подшипников, меньшая сложность устройства разгрузки главного зеркала и компенсации гнута и т. д., что в конечном итоге позволяет получить устойчивое изображение небесных объектов при фотографировании и качественные спектрограммы при наличии многотонных вращающихся частей.

Однако для инструментов в азимутальной монтировке существенно усложняется система управления, особенно в части наведения и ведения, так как требуется вращать телескоп вокруг двух осей с переменными скоростями.

Подробный анализ схем монтаровок астрономических инструментов достаточно подробно освещен в [Л. 3]. Поэтому приведем только формулы связи между экваториальными и азимутальными координатами, необходимые для построения структурных схем систем управления:

$$\left. \begin{aligned} z &= \arccos(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t); \\ A &= \arctg\left(\frac{\cos \delta \sin t}{\cos \delta \sin \varphi \cos t - \sin \delta \cos \varphi}\right); \\ \dot{z} &= \sin A \cos \varphi; \\ \dot{A} &= \sin \varphi + \cos \varphi \cos A \operatorname{tg} z, \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

где z — зенитное расстояние; A — азимут; φ — широта места наблюдения; δ — склонение; t — часовой угол.

Для отработки координат A и z по заданным параметрам экваториальных координат δ и t используются компенсационные следящие системы, сравнивающие расчетные и истинные значения отрабатываемых углов.

Для систем ведения по азимуту при $z \geq 2^\circ$ максимальную скорость A_{\max} можно положить равной 20 об/сутки. При точности $1''$ добротность по скорости в обычной следящей системе согласно (24) равна:

$$K_{\text{эл}} = \frac{A_{\max}}{\epsilon_{\text{доп}}} = \frac{20 \text{ об/сутки}}{1''} \approx 300 \text{ 1/сек.}$$

Реализовать такую добротность при апериодическом переходном процессе в диапазоне регулирования по скорости от 0 до 20 об/сутки с помощью управления по ошибке практически не представляется возможным. Следящая система, отвечающая указанным требованиям в отношении точности и диапазона регулирования, может быть построена только как комбинированная. Остановимся на системе «угол—скорость». Зададимся ошибкой системы регулирования по скорости (силовой привод) $\Delta A_{\max} = 1\%$, что легко осуществить. Тогда добротность по скорости системы по углу согласно (25) равна:

$$K_{\text{эл}} = \frac{\Delta A_{\max}}{\epsilon_{\text{доп}}} = 0,01 \cdot \frac{20 \text{ об/сутки}}{1''} \approx 3 \text{ 1/сек.}$$

Такая низкая величина добротности очевидно легко реализуется. Кроме того, без труда можно получить весьма большой диапазон регулирования. Положив диапазон регулирования системы по скорости $\frac{1}{m_c} = \frac{1}{100}$ и диапазон регулирования системы по положению $\frac{1}{m_k} = \frac{1}{30}$ в соответствии с (26), найдем диапазон регулирования комбинированной системы:

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{30} = \frac{1}{3000}.$$

Такой диапазон устойчивых скоростей дает возможность получить большую плавность системы, что имеет первостепенное значение для подобных объектов.

В качестве примера системы, где допустимы упрощения, приводящие к формуле (23) и функциональной схеме рис. 4, рассмотрим следящую систему ведения по азимуту радиотелескопа РТ-22. Момент инерции нагрузки в данной системе $J_n = 2,7 \cdot 10^5 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}^2$, моменты инерции силового и корректирующего приводов: $J_c = 0,018 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}^2$; $J_k = 0,0002 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}^2$. Передаточные отношения: $i_c = 210\,000$; $i_k = 8\,400\,000$.

Моменты инерции, приведенные к валу нагрузки:

$$i_c^2 J_c = (2,1 \cdot 10^5)^2 \cdot 0,018 = 7,9 \cdot 10^8 \text{ [кг} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}^2\text{]};$$

$$i_k^2 J_k = (8,4 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,0002 = 1,41 \cdot 10^{10} \text{ [кг} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}^2\text{]}.$$

Очевидно, условие (20) выполняется, и, следовательно, в соответствии с (28) расчет можно вести раздельной для каждой из составляющих систем. Следует отметить, что в рассматриваемой системе ни в коем случае нельзя пренебречь моментом нагрузки, так как ветровая нагрузка на антенну радиотелескопа может достигать весьма большой величины, переменной во времени. Однако отношение $\frac{i_k}{i_c} = 40$ достаточно велико, что позволяет пренебречь произведением $\Phi'_k M_n$ по сравнению с $\Phi'_c M_n$ в уравнении (23), после чего приближенное выражение для ошибки комбинированной системы получает вид:

$$\epsilon = E_k [F_c \theta + \Phi'_c M_n]. \quad (28)$$

Первый сомножитель правой части зависит только от корректирующего привода, а второй — от силового. Расчет комбинированной системы значительно упрощается.

Литература

1. Под ред. Бесекерского В. А., Проектирование следящих систем малой мощности, Судпромгиз, 1958.
2. Андриященко В. А., К вопросу устойчивости следящих систем с отрицательной постоянной времени двигателя, Изв. высших учебных заведений, Приборостроение, 1961, № 5, т. IV.
3. Михельсон Н. Н., Новый способ управления телескопами, Изв. ГАО АН СССР, Изд-во ГАО, 1961.
4. Гузенко А. И., Построение логарифмических частотных характеристик следящих систем с комбинированным управлением, «Автоматика и телемеханика», 1960, № 11.

[7.12.1964]



О зависимости электромагнитной мощности электродвигателя постоянного тока с дисковым якорем от геометрии элементов печатной обмотки якоря

Инж. У. Х. СИЙТАН

Таллин

В статье приводится исследование зависимости электромагнитной мощности электродвигателя постоянного тока с дисковым якорем от габаритных размеров якоря и геометрических соотношений между отдельными элементами проводников печатной обмотки. Одновременно делается попытка определить оптимальные геометрические соотношения элементов печатной дисковой обмотки постоянного тока, обеспечивающих получение в заданных габаритах якоря наибольшую электромагнитную мощность.

Электромагнитная мощность машины постоянного тока

$$P_{\text{эм}} = E_a I_a. \quad (1)$$

Электродвижущая сила обмотки якоря, наведенная в активной зоне машины под полюсами, пропорциональна полезному потоку полюса Φ , сцепляемому с одним витком обмотки:

$$E_a = \frac{pN}{a} n \Phi. \quad (2)$$

Величина тока в обмотке якоря I_a зависит главным образом от количества меди и максимально допустимой плотности тока в минимальном сечении проводников обмотки. Таким образом, при анализе рассматриваемой проблемы основное внимание направлено на определение зависимости полезного магнитного потока полюса Φ от геометрической конфигурации проводников печатной обмотки дискового якоря и выяснение оптимального расположения меди в обмотке.

На рис. 1 изображено расположение плоских печатных проводников на дисковом якоре.

При исследовании электромагнитных процессов в обмотке поверхность диска можно разбить на следующие три зоны: между радиусами $R_{1н}$ и $R_{2н}$ — зону внешних лобовых соединений; между радиусами R_2 и $R_{1н}$ — зону активных проводников и между радиусами R_1 и R_2 — зону внутренних лобовых соединений.

Многие авторы [Л. 1—3 и 5] предлагают создать магнитный поток в таких машинах только в пространстве между радиусами R_2 и $R_{1н}$, т. е. в зоне активных проводников (в заштрихованной части на рис. 1), и рассматривают все электромагнитные процессы машины, исходя из такого предположения. Следует отметить, что при таком распределении магнитного потока внешние и внутренние лобовые части обмотки не участвуют в создании электромагнитного момента и обмотка якоря не используется полностью.

Для более полного использования поверхности дискового якоря можно изготовить полюсы такой формы, чтобы полезный магнитный поток обмотки охватывал и внешние и внутренние лобовые части, как это показано на рис. 2 [Л. 4].

Лобовые части печатной обмотки дискового якоря целесообразно исполнять в форме эвольвентной кривой [Л. 1, 3 и 4], так как это обеспечивает минимальный вес обмоточной меди в зонах лобовых соединений. С учетом вышесказанного площадь полезного потока полюса S_n (рис. 2), охваченную одним витком, можно выразить следующим образом.

Элементарная площадь (рис. 3)

$$dS = R \varphi dR. \quad (3)$$

При эвольвентной кривой

$$\varphi = \sqrt{\left(\frac{R}{R_i}\right)^2 - 1} - \arctg \sqrt{\left(\frac{R}{R_i}\right)^2 - 1}, \quad (4)$$

где R — текущий радиус точки эвольвентной кривой; R_i — радиус опорной окружности эвольвенты.

Таким образом,

$$dS = R \left(\sqrt{\left(\frac{R}{R_i}\right)^2 - 1} - \arctg \sqrt{\left(\frac{R}{R_i}\right)^2 - 1} \right) dR \quad (5)$$

и площадь фигуры ABC на рис. 3 определится интегрированием:

$$S = \int_{R_i}^{R_2} R \left(\sqrt{\left(\frac{R}{R_i}\right)^2 - 1} - \arctg \sqrt{\left(\frac{R}{R_i}\right)^2 - 1} \right) dR. \quad (6)$$

Подставляя в формулу (6)

$$\sqrt{\left(\frac{R}{R_i}\right)^2 - 1} = x, \quad (7)$$

получаем:

$$S = \int_0^{x_2} R_i^2 (x^2 - x \arctg x) dx = R_i^2 \left\{ \frac{x_2^3}{3} - \left[\frac{1}{2} (x_2^2 + 1) \arctg x_2 - \frac{x_2}{2} \right] \right\}, \quad (8)$$

где

$$x_2 = \sqrt{\left(\frac{R_2}{R_i}\right)^2 - 1}.$$

Формула (8) дает выражение для половины площади, охваченной внутренними лобовыми частями, при условии, если начало лобовых соединений находится на опорной окружности эвольвенты, т. е. если $R_1 = R_i$. Если же $R_1 > R_i$, то искомая площадь (рис. 4) равна:

$$S_1 = S_{ABC} - (S_2 + S_3). \quad (9)$$

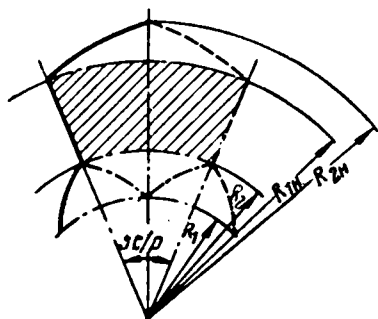


Рис. 1.

С учетом формулы (8)

$$S_1 = R_i^2 \left(\frac{x_2^3}{3} + \frac{x_2}{2} - \frac{x_2^2 + 1}{2} \operatorname{arctg} x_2 \right) - R_i^2 \left(\frac{x_1^3}{3} + \frac{x_1}{2} - \frac{x_1^2 + 1}{2} \operatorname{arctg} x_1 \right) - \frac{1}{2} (x_1 - \operatorname{arctg} x_1) (R_2^2 - R_1^2) = R_i^2 \left(\frac{x_2^3 - x_1^3}{3} + \frac{x_2 - x_1}{2} - \frac{x_2^2 + 1}{2} \operatorname{arctg} x_2 + \frac{x_1^2 + 1}{2} \operatorname{arctg} x_1 \right) - \frac{R_2^2 + R_1^2}{2} (x_1 - \operatorname{arctg} x_1), \quad (10)$$

где

$$x_1 = \sqrt{\left(\frac{R_1}{R_i} \right)^2 - 1}.$$

Применяя еще раз подстановку (7), получаем:

$$S_1 = R_i^2 \left[\frac{x_2^3 - x_1^3}{3} + \frac{x_2 - x_1}{2} - \frac{x_2^2 - x_1^2}{2} x_1 - \frac{x_2^2 + 1}{2} (\operatorname{arctg} x_2 - \operatorname{arctg} x_1) \right]. \quad (11)$$

Для внешних лобовых частей нужно искать площадь $S_{1н}$ (рис. 5). Для этого площадь

$$S_2 = S_{OAB} - S_3$$

вычитается из площади фигуры S_{ABCD} :

$$S_{1н} = S_{ABCD} - S_2, \quad (12)$$

где

$$S_{ABCD} = \frac{\varphi_{2н}}{2} (R_{2н}^2 - R_{1н}^2) = \frac{R_{1н}^2}{2} (x_{2н} - \operatorname{arctg} x_{2н}) (x_{2н}^2 - x_{1н}^2); \quad (13)$$

$$S_2 = R_{1н}^2 \left(\frac{x_{2н}^3 - x_{1н}^3}{3} + \frac{x_{2н} - x_{1н}}{2} - \frac{x_{2н}^2 + 1}{2} \operatorname{arctg} x_{2н} + \frac{x_{1н}^2 + 1}{2} \operatorname{arctg} x_{1н} \right). \quad (14)$$

Подставляя в уравнение (12) значения S_{ABCD} и S_2 , получаем:

$$S_{1н} = R_{1н}^2 \left[\frac{(x_{2н}^2 - x_{1н}^2) x_{2н}}{2} - \frac{x_{2н}^3 - x_{1н}^3}{3} - \frac{x_{2н} - x_{1н}}{2} + \frac{x_{1н}^2 + 1}{2} (\operatorname{arctg} x_{2н} - \operatorname{arctg} x_{1н}) \right]. \quad (15)$$

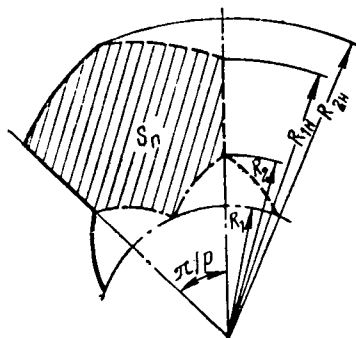


Рис. 2.

Площадь сектора зоны активных проводников

$$S_A = \frac{\pi}{4p} (R_{1н}^2 - R_2^2) = \frac{\pi}{4p} [(x_{1н}^2 + 1) R_{1н}^2 - (x_2^2 + 1) R_i^2]. \quad (16)$$

Вся площадь, охваченная витком под одним полюсом,

$$S_{\pi} = 2(S_1 + S_{1н} + S_A). \quad (17)$$

Так как в большинстве случаев внешние и внутренние лобовые части описываются одной и той же

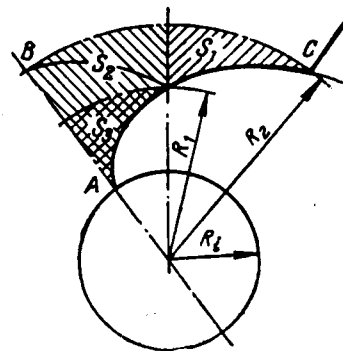


Рис. 4.

эвольвентой, т. е. $R_i = R_{1н}$ и внутренние лобовые части начинаются от опорной окружности эвольвенты $R_1 = R_i$, то

$$S_{\pi} = 2R_i^2 \left[\frac{(x_{2н}^2 - x_{1н}^2) x_{2н}}{2} - \frac{x_{2н}^3 - x_{1н}^3}{3} - \frac{x_{2н} - x_{1н}}{2} + \frac{x_{1н}^2 + 1}{2} (\operatorname{arctg} x_{2н} - \operatorname{arctg} x_{1н}) + \frac{\pi}{2p} \frac{x_{1н}^2 - x_2^2}{2} + \frac{x_2^3}{3} + \frac{x_2}{2} - \frac{x_2^2 + 1}{2} \operatorname{arctg} x_2 \right]. \quad (18)$$

Электромагнитная мощность якоря машины постоянного тока представлена формулой (1), причем

$$E_a = \frac{Nn}{a} p \Phi = \frac{Nn}{a} p S_{\pi} a_{\pi} B_{\pi}, \quad (19)$$

где N — количество проводников в обмотке якоря;
 a — количество пар параллельных ветвей обмотки якоря;
 p — количество пар полюсов;
 a_{π} — коэффициент полюсного перекрытия;
 B_{π} — максимальная индукция в воздушном зазоре под полюсом.

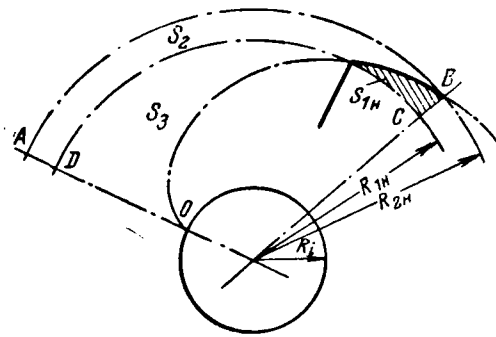


Рис. 5.

Ток якоря

$$I_a = 2aI_{пр} = 2a\Delta_{\max}h_{Cu}b_{Cu}, \quad (20)$$

где $I_{пр}$ — ток в одной параллельной ветви якорной обмотки;

Δ_{\max} — максимальная допустимая плотность тока в проводнике;

h_{Cu} — толщина меди проводника;

b_{Cu} — ширина проводника на опорной окружности эвольвенты.

Следует отметить, что максимальная допустимая плотность тока в лобовой части Δ_{\max} зависит [Л. 2] от толщины меди проводника:

$$\Delta_{\max} = \sqrt{\frac{\alpha\tau}{\rho h_{Cu}}} = \frac{k_{\Delta}}{\sqrt{h_{Cu}}}, \quad (21)$$

где α — коэффициент теплопередачи от поверхности проводника;

τ — допустимый перегрев печатной обмотки относительно воздуха;

ρ — удельное электрическое сопротивление материала проводника.

Обозначая коэффициент заполнения медью в зонах лобовых частей

$$\xi = \frac{b_{Cu}}{t_i}, \quad (22)$$

где t_i — шаг проводника на опорной окружности эвольвенты, получаем:

$$P_{эм} = \frac{Nn}{a} p S_n \alpha_n B_n 2ak_{\Delta} \sqrt{h_{Cu}} \xi t_i. \quad (23)$$

Если предположить, что магнитное поле в машине в пределах одного полюсного деления постоянно, однородно и независимо от радиуса, то при определенной скорости вращения электромагнитная мощность такой машины является функцией нескольких переменных:

$$P_{эм} = f(N, p, S_n, \xi, h_{Cu}, t_i). \quad (24)$$

Проанализируем, как изменяется эта мощность при изменении указанных параметров.

Имея в виду, что в печатных обмотках машин постоянного тока с дисковыми якорями количество проводников в обмотке определяется формулой

$$N = \frac{4\pi R_i}{t_i}, \quad (25)$$

получаем из (23)

$$P_{эм} = 8\pi R_i n p S_n \alpha_n B_n k_{\Delta} \sqrt{h_{Cu}} \xi. \quad (26)$$

В этой формуле R_i , p и S_n не зависят от h_{Cu} и ξ , поэтому можно утверждать, что, с одной стороны, электромагнитная мощность машины изменяется пропорционально ξ и h_{Cu} и, с другой стороны, параметры R_i , p и S_n взаимно связаны между собой и зависят только от геометрических соотношений ротора.

При исследовании этой зависимости целесообразно выбирать в качестве аргумента функции отношение радиусов, так как все параметры формулы (18) зависят от него, т. е.

$$d_{2H} = \frac{R_{2H}}{R_i}. \quad (27)$$

Действительно, согласно (18) S_n является функцией трех параметров;

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= \sqrt{\left(\frac{R_2}{R_i}\right)^2 - 1} = \sqrt{d_2^2 - 1} = f_1(d_2); \\ x_{1H} &= \sqrt{\left(\frac{R_{1H}}{R_i}\right)^2 - 1} = \sqrt{d_{1H}^2 - 1} = f_1(d_{1H}); \\ x_{2H} &= \sqrt{\left(\frac{R_{2H}}{R_i}\right)^2 - 1} = \sqrt{d_{2H}^2 - 1} = f_1(d_{2H}). \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Первый из этих параметров является постоянной величиной для заданного числа пар полюсов $2p$ и не изменяется при изменении отношения d_{2H} , так что для него можно написать:

$$x_2 = f_1(d_2) = f_2(2p). \quad (29)$$

Параметры x_{1H} и x_{2H} связаны соотношением:

$$\varphi = x_{2H} - \arctg x_{2H} - (x_{1H} - \arctg x_{1H}), \quad (30)$$

где φ — известный угол шага обмотки.

Если выразить радиус опорной окружности в виде

$$R_i = \frac{R_{2H}}{d_{2H}}, \quad (31)$$

то произведение $R_i p S_n$ в формуле (26) принимает вид:

$$R_i p S_n = 2p \frac{R_{2H}^3}{d_{2H}^3} f_3(d_{2H}) = 2p R_{2H}^3 F_1, \quad (32)$$

где

$$F_1 = \frac{f_3(d_{2H})}{d_{2H}^3}, \quad (33)$$

а величиной $f_3(d_{2H})$ обозначено выражение в квадратных скобках правой части формулы (18).

Более подробное исследование формулы (33) показывает, что эта функция представляет собой кривую, имеющую один выраженный максимум, соответствующий оптимальному соотношению d_{2H} , при котором якорь развивает максимальную электромагнитную мощность.

Аналитическое определение этого максимума является сложной задачей, поэтому было произведено вычисление функции F_1 на электронной вычислительной машине «Минск-2» для различных значений $2p$.

Кривые функции F_1 для $2p=4, 6, 8, 10$ представлены на рис. 6.

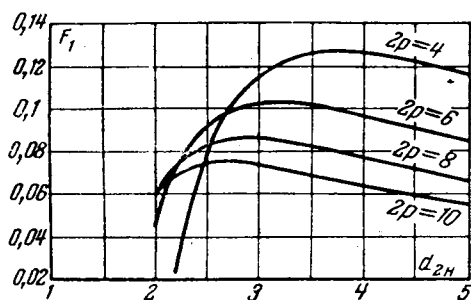


Рис. 6.

Оптимальные соотношения $d_{2н}$ представлены в нижеследующей таблице.

Таблица

$2p$	$d_{2н}$	$d_{1н}$	d_2	$2p$	$d_{2н}$	$d_{1н}$	d_2
4	3,730	2,905	2,115	8	2,860	2,434	1,650
6	3,160	2,600	1,810	10	2,670	2,327	1,549

Приведенные оптимальные соотношения элементов печатных обмоток дисковых якорей можно рекомендовать для проектирования электрических машин такого типа.

В [Л. 2] показано, что в машине с дисковым якорем и печатной обмоткой, где магнитная система сконструирована так, что внешние и внутренние лобовые части обмотки якоря не участвуют в создании электромагнитного момента, соотношение радиусов $R_{1н}$ и R_2 обмотки выбирается, исходя из условия:

$$\frac{R_{1н}}{R_2} \geq 1,73.$$

◇ ◇ ◇

Сравнивая такую машину с машиной, якорь которой имеет такой же внешний диаметр, но спроектирован, исходя из приведенных в настоящей работе соображений и геометрических соотношений, можно показать, что в последнем случае электромагнитная мощность машины увеличивается более чем на 35%.

Выводы. 1. В электрических машинах постоянного тока с дисковым якорем и печатной обмоткой целесообразно сконструировать магнитную систему так, чтобы полезный магнитный поток сцеплялся с полным витком обмотки якоря, включая внешние и внутренние лобовые части витка.

2. Зависимость электромагнитной мощности от геометрических соотношений элементов печатной обмотки якоря таких машин имеет один выраженный максимум, при котором электромагнитная мощность машины максимальна.

3. Электромагнитная мощность геометрически подобных дисковых якорей изменяется пропорционально третьей степени внешнего радиуса обмотки $R_{2н}^3$.

Литература

1. Пашков В. И., Расчет электродвигателей постоянного тока торцового типа с печатной обмоткой якоря, «Электротехническая промышленность», 1962, № 11.
2. Ивоботенко Б. А., Основные соотношения при проектировании многополюсных печатных обмоток электрических машин торцового типа, Труды МЭИ, вып. XXXVIII, «Электромеханика».
3. Чжу Жень-Цу, Теоретические основы проектирования электрических машин постоянного тока торцового типа с печатной обмоткой якоря, Диссертация МЭИ, 1962.
4. Таел В., О геометрии ротора с печатной обмоткой в электрических машинах, Изв. АН ЭССР, 1961, № 3.
5. Парте Р. Р., Машинная постоянная машины постоянного тока с печатными обмотками, Изв. вузов, Электромеханика, 1961, № 6.

[1.3.1965]

УДК 621.34:531.3

О влиянии упругой связи электромеханического датчика с двигателем на динамику автоматизированного электропривода

Кандидат техн. наук, доц. Г. С. ЧЕРНОРУЦКИЙ и инж. А. П. СИБРИН

Челябинский политехнический институт

Как известно, широкий диапазон изменения скорости вращения электропривода достигается при помощи системы автоматического регулирования (САР).

В качестве датчиков скорости часто используются тахогенераторы постоянного и переменного токов, соединенные с двигателем упругой связью (эластичная муфта, упругий вал, клиноремная передача и т. п.). Абсолютно жесткая связь двух несоизмеримых по диаметрам валов электрических машин из-за неизбежных неточностей центровки не может быть выполнена, так как при этом вал и подшипники малой машины быстро выходят из строя.

Аналогичная упругая связь может иметь место в следящем электроприводе при использовании, например, сельсина в качестве датчика угла поворота, а также и в других подобных случаях.

С другой стороны, при анализе САР указанную упругую связь почти всегда идеализируют, полагая соединение валов абсолютно жестким.

Опыт наладки электромеханических САР убеждает в том, что упругая связь ухудшает динамические свойства всей системы, особенно при малых скоростях вращения двигателя.

Рассмотрим влияние упругой связи двигателя с электромеханическим датчиком, имеющим нели-

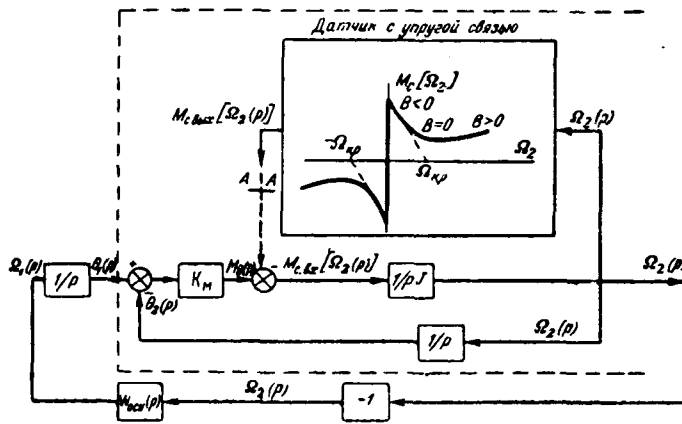


Рис. 1. Структурная схема САР при наличии упругой связи электромеханического датчика с двигателем.

нейную зависимость момента сопротивления от скорости вращения (рис. 1), на динамику системы. При этом полагаем, что отклонения скорости вращения от требуемого значения являются незначительными.

Уравнения движения системы (пренебрегаем влиянием датчика на скорость вращения приводного двигателя) имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1(p) &= \frac{1}{p} \Omega_1(p); \\ \theta_2(p) &= \frac{1}{p} \Omega_2(p); \\ M_d(p) &= K_M [\theta_1(p) - \theta_2(p)]; \\ \Omega_2(p) &= \frac{1}{pJ} [M_d(p) - M_{c.вх}(p)]; \\ M_{c.вх}(p) &= M_c[\Omega_2(p)]; \\ \Omega_1(p) &= -W_{осн}(p) \Omega_2(p), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где Ω_1 , θ_1 и Ω_2 , θ_2 — скорости вращения и углы поворота двигателя и тахогенератора соответственно;

M_d — момент движения, приложенный к тахогенератору;

$M_c = M_c(\Omega_2)$ — статический момент сопротивления тахогенератора;

J — момент инерции тахогенератора;

K_M — линейный коэффициент жесткости упругой связи;

$W_{осн}(p)$ — передаточная функция основной части системы.

Динамические свойства системы целесообразно исследовать для четырех характерных режимов:

1. Скорость вращения двигателя весьма малая (близкая к нулю); зависимость $M_c = M_c(\Omega_2)$ существенно нелинейная.

2. Малые скорости вращения, $B < 0$.

3. Средние скорости вращения, $B = 0$.

4. Большие скорости вращения, $B > 0$.

Во всех случаях

$$B = \frac{\Delta M_c}{\Delta \Omega_2}.$$

Для выявления нелинейности и приведенной линейной части САР разорвем контур структурной схемы, изображенной на рис. 1 (место разрыва А—А).

Используя метод гармонического баланса, получаем следующее уравнение свободных автоколебаний системы:

$$W_{л}(j\omega) S(\Omega_A) + 1 = 0, \quad (2)$$

где

$$W_{л}(j\omega) = \frac{1}{j\omega J + \frac{K_M}{j\omega} + \frac{K_M}{j\omega} W_{осн}(j\omega)}; \quad (3)$$

$W_{осн}(j\omega)$ — частотная характеристика основной части САР;

$S(\Omega_A)$ — эквивалентный комплексный коэффициент передачи нелинейного звена;

Ω_A — амплитуда скорости вращения Ω_2 .

Для получения зависимости $S(\Omega_A)$ аппроксимируем нелинейную характеристику $M_c = M_c(\Omega_2)$ тремя прямыми, как это показано на рис. 2, и получаем:

$$M_c(\Omega_A) = \left[1 - \frac{\Omega_A}{\Omega_{кр}} \frac{2\psi}{\pi} \right] M_{тр} \quad (4)$$

при $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$;

$$M_c(\Omega_A) = \left[1 + \frac{\Omega_A}{\Omega_{кр}} \left(\frac{2\psi}{\pi} - 1 \right) \right] M_{тр} \quad (5)$$

при $\frac{\pi}{2} < \psi < \pi$.

Для однозначной нечетной нелинейной зависимости, как известно, будем иметь:

$$S(\Omega_A) = g(\Omega_A) = \frac{2}{\pi \Omega_A} \int_0^{\pi} M_c(\Omega_A) \sin \psi d\psi. \quad (6)$$

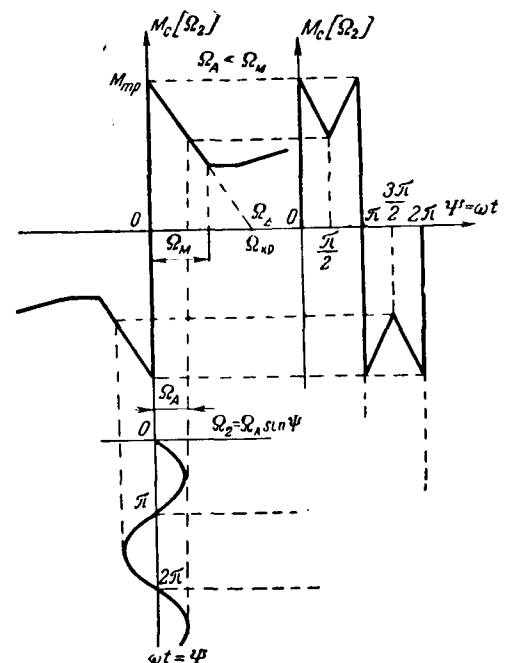


Рис. 2. К выводу комплексного коэффициента передачи нелинейного элемента.

Решая уравнение (6) с учетом (4) и (5), легко получить:

$$S(\Omega_A) = \frac{M_{\text{тр}}}{\Omega_A} \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{\frac{2}{\pi} - \frac{1}{2}}{\frac{\Omega_{\text{кр}}}{\Omega_A}} \right). \quad (7)$$

Если обозначить

$$\frac{\Omega_A}{\Omega_{\text{кр}}} = \Omega_A^*; \quad (8)$$

$$\frac{M_{\text{тр}}}{\Omega_{\text{кр}}} = B, \quad (9)$$

то после преобразований уравнения (7) окончательно получим:

$$S(\Omega_A^*) = \frac{4B}{\pi} \left(\frac{1}{\Omega_A^*} - 0,137 \right). \quad (10)$$

Преобразуем уравнение (2) с учетом (8) следующим образом:

$$-S(\Omega_A^*) = \frac{1}{W_{\text{л}}(j\omega)} = j\omega J + \frac{K_{\text{м}}}{j\omega} + \frac{K_{\text{м}}}{j\omega} W_{\text{осн}}(j\omega). \quad (11)$$

На рис. 3 представлены примеры графического решения уравнения (11) для следующих частотных характеристик основной части системы:

$$\text{а) } W_{\text{осн}}(j\omega) = \frac{K}{(1 + j\omega T_1)(1 + j\omega T_2)};$$

$$\text{б) } W_{\text{осн}}(j\omega) = \frac{K}{(1 + j\omega T_1)(1 + j\omega T_2)j\omega}.$$

Из рис. 3 видно, что в случаях «а» и «б» всегда имеет место пересечение кривых, построенных по уравнению (11). Это говорит о наличии устойчивых автоколебаний с частотой $\omega_{\text{АК}}$ и амплитудой $\Omega_{\text{АК}}^*$, численные значения которых легко могут быть определены из графика. Аналогичные построения, выполненные для статических и астатических САР высших порядков, также подтверждают наличие устойчивых автоколебаний.

Для 2, 3 и 4-го режимов САР может быть линеаризована в малом, поэтому имеется возможность перейти от уравнений (1) к следующим уравнениям в приращениях:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_1(p) &= \frac{1}{p} \Delta\Omega_{1\text{вх}}(p); \\ \Delta\theta_2(p) &= \frac{1}{p} \Delta\Omega_2(p); \\ \Delta M_{\text{д}}(p) &= K_{\text{м}} [\Delta\theta_1(p) - \Delta\theta_2(p)]; \\ \Delta\Omega_2(p) &= \frac{1}{pJ} [\Delta M_{\text{д}}(p) - \Delta M_{\text{с}}(p)]; \\ \Delta M_{\text{с}}(p) &= B \Delta\Omega_2(p); \\ \Delta\Omega_{1\text{вых}}(p) &= W_{\text{осн}}(p) \Delta\Omega_2(p). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Решив уравнение (12), получим передаточную функцию всей системы:

$$W(p) = \frac{\Delta\Omega_{1\text{вых}}(p)}{\Delta\Omega_{1\text{вх}}(p)} = W_{\text{осн}}(p) W_{\text{у.с}}(p), \quad (13)$$

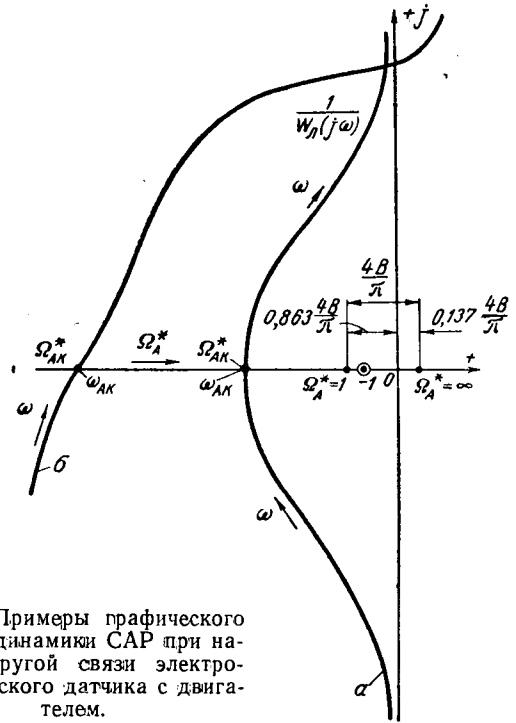


Рис. 3. Примеры графического анализа динамики САР при наличии упругой связи электромеханического датчика с двигателем.

где передаточная функция линеаризованной упругой связи

$$W_{\text{у.с}}(p) = \frac{\Delta\Omega_2(p)}{\Delta\Omega_1(p)} = \frac{1}{1 + p \frac{B}{K_{\text{м}}} + p^2 \frac{J}{K_{\text{м}}}} \quad (14)$$

или

$$W_{\text{у.с}}(p) = \frac{1}{1 + 2\xi p \frac{1}{\omega_{\text{к}}} + p^2 \frac{1}{\omega_{\text{к}}^2}}, \quad (15)$$

где

$$2\xi = \frac{B}{\sqrt{JK_{\text{м}}}}; \quad (16)$$

$$\omega_{\text{к}} = \sqrt{\frac{K_{\text{м}}}{J}}. \quad (17)$$

В рассматриваемых условиях величина B зависит от установленной скорости вращения двигателя. Собственная частота колебаний упругой связи (17), очевидно, может принимать любое значение. Коэффициент демпфирования ξ для 2, 3 и 4-го режимов работы может варьироваться в широких пределах:

2-й режим при $B < 0$, $\xi < 0$;

3-й режим при $B = 0$, $\xi = 0$;

4-й режим при $B > 0$, $\xi > 0$.

Решение уравнения (14) убеждает в том, что при 2-м и 3-м режимах, т. е. в зоне малых скоростей вращения двигателя, вал тахогенератора колеблется с незатухающей амплитудой относительно вала приводного двигателя. Электродвижущая сила тахогенератора пропорциональна мгновенной скорости вращения, следовательно, на вход усилителя системы подается гармонический сигнал, что вызывает колебания скорости вращения приводного двигателя.

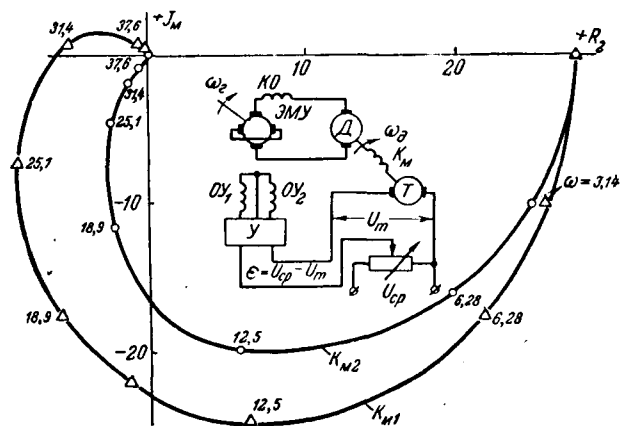


Рис. 4. Частотные характеристики скорости вращения электродвигателя физической модели САР.

При 4-м режиме в систему добавляется устойчивое колебательное звено, которое также ухудшает динамику всей системы.

Для тахогенераторов типов СЛ-281 и ПЛ-071 были сняты характеристики зависимости момента сопротивления от скорости вращения, подтверждающие, что для весьма малых скоростей отработки характерен резко падающий участок характеристики ($B < 0$), а для сравнительно малых скоростей на относительно большом участке $B = 0$.

Следовательно, здесь при малых скоростях вращения двигателя можно ожидать появления незатухающих автоколебаний системы регулирования, исчезающих при повышении скорости вращения, что подтверждается опытом.

На рис. 4 представлены частотные характеристики скорости вращения электродвигателя со свя-

зями различной упругости $K_{M2} > K_{M1}$ и тахогенератором типа СЛ-281 для постоянной амплитуды входного сигнала. Характеристики подтверждают необходимость точного учета передаточных свойств рассматриваемой упругой связи.

Выводы. 1. Опыт конструирования САР показывает, что абсолютно жесткая связь двигателя с тахогенератором в большинстве случаев не может быть выполнена.

2. Упругая связь исполнительного двигателя с тахогенератором может резко ухудшить динамические свойства всей САР.

3. При скоростях, близких к нулю, в системе всегда возникают устойчивые автоколебания.

4. При малых скоростях вращения исполнительного двигателя в контуре САР оказывается включенным колебательное неустойчивое звено с весьма малым коэффициентом демпфирования. Значение частоты собственных колебаний звена варьируется в широком диапазоне.

5. При переходе от тахометрического датчика к мостовому устойчивость САР резко возрастает, поскольку при этом устраняется упругая связь.

6. Коррекция САР должна выбираться с учетом параметров указанной упругой связи и необходимого диапазона регулирования скорости электропривода.

Литература

1. Сиротин А. А., Электроприводы с упругими механическими звеньями, «Электричество», 1962, № 8.
2. Под ред. В. В. Солодовникова, Основы автоматического регулирования, Машгиз, 1959.
3. Андрущенко В. А., К вопросу устойчивости следящих систем с отрицательной постоянной времени двигателя, Изв. вузов. Приборостроение, 1961, № 5.
4. Черноруцкий Г. С., Электромеханические системы автоматического регулирования, Машгиз, 1962.

[21.2.1963]



УДК 621.313.2:042.4

Определение эквивалентного воздушного зазора машины постоянного тока

Кандидат техн. наук, доц. В. А. ЯКОВЕНКО и инж. О. Р. МАНДРЫКА

Харьков

Одним из основных факторов, характеризующих коммутационные свойства, якорных обмоток машин постоянного тока, является результирующая индуктивность секции в момент размыкания, определяемая из приравнивания нулю следующего определителя [Л. 7]:

$$\begin{vmatrix} L_1 - L_{p1} & M_{12} & \dots & M_{1n} \\ M_{12} & L_2 & \dots & M_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{1k} & M_{2k} & \dots & L_k & \dots & M_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{1n} & M_{2n} & \dots & \dots & \dots & L_n \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где L_{p1} — результирующая индуктивность секции в момент размыкания;

L_k, M_{kn} — полные само- и взаимные индуктивности секций одновременно замкнутых щетками.

Полные индуктивности секций L_k, M_{kn} можно представить в виде двух составляющих: L_s, M_s , определяемых потоком рассеяния секции, и L_δ, M_δ , определяемых потоком секции, замыкающимся через полюсы и станину (рис. 1). Индуктивности L_s, M_s определяются по известным формулам [Л. 6—8].

Индуктивности L_δ и M_δ можно определять по формулам¹, предложенным Л. Дрейфусом [Л. 6—8]:

$$\left. \begin{aligned} L_\delta &= \frac{\mu_0 q_1 q_2 \tau_s}{(q_1 + q_2) \delta_\delta}; \\ M_{\delta_{12}} &= \frac{\mu_0 \tau_s}{\delta_\delta} \left(\frac{q_1 q_2}{q_1 + q_2} - 1 \right); \\ M_{\delta_{13}} &= \frac{\mu_0 \tau_s}{\delta_\delta} \frac{q_1^2}{q_1 + q_2}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где q_1 — шаг обмотки по пазам;

$q_1 + q_2$ — общее число пазов;

τ_s — зубцовое деление;

δ_δ — эквивалентный воздушный зазор, к которому приводится неравномерный воздушный зазор явнополюсной машины.

В [Л. 6 и 8] указывается, что для определения δ_δ явнополюсной машины необходимо найти распределение магнитного поля секции в воздушном зазоре любым возможным способом. Однако расчетная формула для определения δ_δ нигде не приводится.

Известны предложения по определению L_δ и M_δ методом электро моделирования [Л. 5]. В ряде работ [Л. 9] уже указывалось на необходимость детального изучения и использования выводов Л. Дрейфуса относительно демпферных свойств якорных обмоток машин постоянного тока. И можно надеяться, что определение результирующей индуктивности L_p по методу Л. Дрейфуса будет полезным при оценке коммутации вновь проектируемых электрических машин.

В настоящей статье с помощью конформного преобразования получены точная аналитическая формула для расчета δ_δ при равномерных зазорах под главным и добавочным полюсами, а также приближенная формула, позволяющая достаточно точно и быстро рассчитать δ_δ при неравномерном зазоре под главным полюсом.

Для определения δ_δ рассчитаем методом конформных преобразований магнитное поле секции в воздушном зазоре по расчетной схеме, представленной на рис. 2. Исследуемая область в плоскости W ограничена многоугольником $W_1 W_2 W_3 W_4 W_5$. Найдем распределение магнитного поля на поверхности якоря ($W_4 W_5$). При этом не учитываем демпфирующее действие статора и пренебрегаем влиянием насыщения магнитной цепи на индуктивность секции, что позволяет рассматривать якорь, главный и добавочные полюсы невозбужденными.

По теореме Кристоффеля — Шварца [Л. 1]

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} &= \frac{c}{(t + a_1)^{-1/2} (t + a_2)^1 (t + 1)^{-1/2} t} = \\ &= \frac{c \sqrt{(t + a_1)(t + 1)}}{t(t + a_2)}. \end{aligned}$$

Отображенные вершины в плоскости t приняты следующими: $a_3 = -1$; $a_4 = 0$; $a_5 = \infty$:

$$W = \int \frac{c \sqrt{(t + a_1)(t + 1)}}{t(t + a_2)} dt + C_1. \quad (3)$$

¹ Здесь и в дальнейшем приведены формулы для индуктивностей на единицу длины якоря.

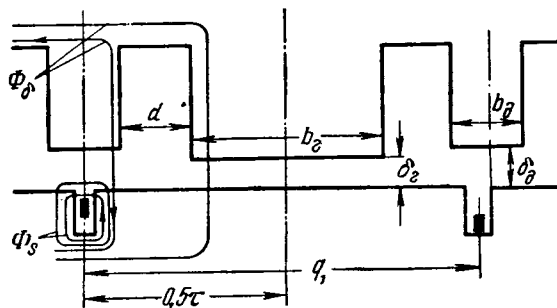


Рис. 1. К расчету индуктивности воздушного зазора L_δ .

Определим постоянные c , a_1 , a_2 .

1. Изменению W на величину d в точке W_2 соответствует в плоскости t (рис. 3) обход точки t_2 по окружности бесконечно малого радиуса τ . Представим t в окрестностях точки t_2 так:

$$t = -a_2 - \tau e^{i\varphi}; \quad dt = -j\tau e^{i\varphi} d\varphi.$$

Подставляя в (3) и пренебрегая в составе суммы бесконечно малым членом $\tau e^{i\varphi}$, получаем:

$$\begin{aligned} d &= \int_0^\pi \frac{c \sqrt{(a_2 - a_1)(1 - a_2)}}{a_2} d\varphi; \\ d &= \frac{c\pi}{a_2} \sqrt{(a_2 - a_1)(1 - a_2)}. \end{aligned} \quad (4)$$

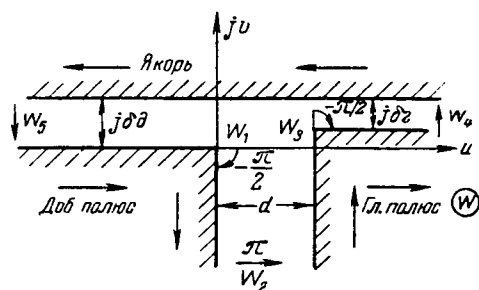


Рис. 2. Расчетная схема для определения индукции в воздушном зазоре. Стрелкой указано направление обхода контура.

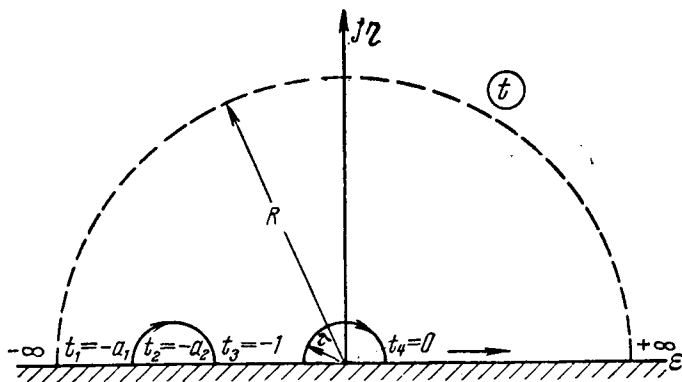


Рис. 3. Преобразование области W в верхнюю полуплоскость t .

2. Изменению W на величину $j\delta_r$ в точке W_4 соответствует в плоскости t обход точки t_4 по окружности бесконечно малого радиуса τ . Представим t в окрестностях точки t_4 так:

$$t = \tau e^{j\varphi}; \quad dt = j\tau e^{j\varphi} d\varphi.$$

Подставим в (3) и получим:

$$j\delta_r = \int_{\pi}^0 j \frac{c \sqrt{a_1}}{a_2} d\varphi; \quad \delta_r = -c\pi \frac{\sqrt{a_1}}{a_2}. \quad (5)$$

3. Изменению W на величину $-j\delta_d$ в точке W_5 соответствует в плоскости t переход из точки $+\infty$ в точку $-\infty$ по окружности бесконечно большого радиуса R :

$$t = Re^{j\varphi}; \quad dt = jRe^{j\varphi} d\varphi.$$

Подставим в (3), предварительно разделив числитель и знаменатель на t . Пренебрегая бесконечно малыми членами в составе суммы, получаем:

$$-j\delta_d = \int_0^{\pi} jc d\varphi; \quad c = -\frac{\delta_d}{\pi}. \quad (6)$$

Совместное решение (4)–(6) дает:

$$a_2 = \frac{d^2 + \delta_r^2 + \delta_d^2}{2\delta_r^2} + \sqrt{\left(\frac{d^2 + \delta_r^2 + \delta_d^2}{2\delta_r^2}\right)^2 - \left(\frac{\delta_d}{\delta_r}\right)^2}. \quad (7)$$

Знак минус перед квадратным корнем не имеет смысла, так как по условиям задачи $|a_1| > |a_2| > 1$:

$$a_1 = \frac{\delta_r^2 a_2^2}{\delta_d^2}. \quad (8)$$

Окончательно будем иметь:

$$W = -\frac{\delta_d}{\pi} \int \frac{\sqrt{t^2 + (a_1 + 1)t + a_1}}{t(t + a_2)} dt + C_1.$$

В результате интегрирования и нахождения постоянной интегрирования [Л. 4] получаем:

$$\begin{aligned} W = & \frac{\delta_r}{\pi} \ln \frac{2a_2 \frac{\delta_r}{\delta_d} \sqrt{t^2 + (a_1 + 1)t + a_1} + 2a_1 + (a_1 + 1)t}{t} - \\ & - \frac{\delta_d}{\pi} \ln (2\sqrt{t^2 + (a_1 + 1)t + a_1} + 2t + a_1 + 1) - \\ & - \frac{\delta_d}{\pi} \frac{\sqrt{a_1 a_2 + a_2 - a_2^2 - a_1}}{a_2} \times \\ & \times \arcsin \frac{(a_1 + 1 - 2a_2)t - a_1 a_2 - a_2 + 2a_1}{(a_1 - 1)(t + a_2)} + \\ & + \frac{\delta_d \sqrt{a_1 a_2 + a_2 - a_2^2 - a_1}}{2a_2} + \frac{\delta_d - \delta_r}{\pi} \ln(a_1 - 1) + j\delta_d. \end{aligned} \quad (9a)$$

Уравнение (9a) устанавливает соответствие между точками области W и точками верхней полуплоскости t и позволяет определить величину и направление магнитной индукции в любой точке области W . Преобразуем уравнение (9a) так, чтобы его правая часть зависела только от двух параметров $\frac{\delta_r}{\delta_d}$ и $\frac{d}{\delta_d}$, для чего разделим обе части уравнения на δ_d . За-

пишем уравнение для линии $W_4 W_5$, имеющей ординату $j\delta_d$, поскольку нас интересует распределение магнитной индукции на поверхности якоря:

$$\begin{aligned} \frac{W}{\delta_d} = & \frac{\delta_r}{\delta_d} \frac{1}{\pi} \ln \frac{2a_2 \frac{\delta_r}{\delta_d} \sqrt{t^2 + (a_1 + 1)t + a_1} + 2a_1 + (a_1 + 1)t}{t} - \\ & - \frac{1}{\pi} \ln (2\sqrt{t^2 + (a_1 + 1)t + a_1} + 2t + a_1 + 1) - \\ & - \frac{\sqrt{a_1 a_2 + a_2 - a_2^2 - a_1}}{\pi a_2} \times \\ & \times \arcsin \frac{(a_1 + 1 - 2a_2)t - a_1 a_2 - a_2 + 2a_1}{(a_1 - 1)(t + a_2)} + \\ & + \frac{\sqrt{a_1 a_2 + a_2 - a_2^2 - a_1}}{2a_2} + \frac{1 - \frac{\delta_r}{\delta_d}}{\pi} \ln(a_1 - 1). \end{aligned} \quad (9)$$

Вектор напряженности магнитного поля в плоскости W определяется, как известно, из выражения

$$\bar{H}_W = \bar{H}_t \left(\frac{dt}{dW} \right)^*, \quad (10a)$$

где \bar{H}_W — вектор напряженности в плоскости W ;

\bar{H}_t — вектор напряженности в плоскости t ;

$\left(\frac{dt}{dW} \right)^*$ — сопряженный комплекс производной;

$$\bar{H}_t = \frac{aW}{\pi r} e^{j\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)},$$

где

$$\bar{r} = te^{-j\varphi}, \quad aW = i_c W_c;$$

$$\left(\frac{dt}{dW} \right)^* = -\frac{\pi}{\delta_d} \left(\frac{t(t + a_2)}{\sqrt{t^2 + (a_1 + 1)t + a_1}} \right)^*.$$

Поскольку мы ищем распределение магнитного поля на поверхности якоря, что соответствует положительной полуоси в плоскости t , имеем $\varphi = 0$. При этом выражения упрощаются и принимают вид:

$$\left(\frac{dt}{dW} \right)^* = -\frac{\pi}{\delta_d} \frac{t(t + a_2)}{\sqrt{t^2 + (a_1 + 1)t + a_1}}; \quad (10b)$$

$$H_t = \frac{aW}{\pi t} e^{-j\frac{\pi}{2}} = -j \frac{aW}{\pi t}. \quad (10в)$$

Подставив выражения (10b) и (10в) в (10a), определим

$$\begin{aligned} H_W = & j \frac{aW}{\delta_d} \frac{(t + a_2)}{\sqrt{t^2 + (a_1 + 1)t + a_1}}; \\ B_W = & j\mu_0 \frac{aW}{\delta_d} \frac{(t + a_2)}{\sqrt{t^2 + (a_1 + 1)t + a_1}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Индуктивность воздушного зазора

$$L_\delta = \frac{W_c \Phi_\delta}{i_c} = W_c^2 G,$$

где W_c , i_c — число витков и ток секции;

Φ_δ — поток секции в воздушном зазоре.

$$\Phi_\delta = aWG = \frac{2q_1}{q} \int_{-0.5b_d}^{0.5(\tau - b_d)} B_W dW,$$

где q — число пазов на полюсное деление;
 b_d — ширина наконечника добавочного полюса;

$$G = \frac{2q_1}{aWq} \int_{-0,5b_d}^{0,5(\tau-b_d)} B_w dW.$$

Магнитная индукция B_w задается как функция параметра t , следовательно,

$$G = \frac{2q_1}{aWq} \int_{t_1}^{t_2} B(t) \frac{dW}{dt} dt = \frac{2\mu_0 q_1}{\pi q} \ln \frac{t_2}{t_1}, \quad (11)$$

где t_1 и t_2 — пределы изменения параметра t , по (9) для $\frac{W}{\delta_d}$, равному соответственно $-0,5 \frac{b_d}{\delta_d}$ и $0,5 \frac{(\tau-b_d)}{\delta_d}$,

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{\delta_d \sqrt{t^2 + (a_1 + 1)t + a_1}}{\pi t(t + a_2)}.$$

С другой стороны, из (2) очевидно, что

$$G = \frac{\mu_0 q_1 \tau_s}{\delta_a}. \quad (11a)$$

Таким образом, из выражений (11) и (11a) находим эквивалентный воздушный зазор

$$\delta_a = \frac{\pi}{2} \frac{q \tau_s}{\ln \frac{t_2}{t_1}}. \quad (12)$$

Формула (12) позволяет точно рассчитать эквивалентный воздушный зазор при равномерных воздушных зазорах под главным и добавочным полюсами.

Для учета непостоянства величины воздушного зазора под главным полюсом представим магнитную проводимость G , соответствующую L_δ , в виде трех составляющих:

$$G = G_r + G_d + 2G_{r,d}, \quad (13)$$

где $G_r = \frac{\mu_0}{\delta_r} b_r$ — магнитная проводимость под главным полюсом;

$G_d = \frac{\mu_0}{\delta_d} [b_d - (q - q_1) \tau_s]$ — магнитная проводимость под добавочным полюсом;

$G_{r,d} = \frac{\mu_0}{\delta_{r,d}} d$ — магнитная проводимость пространства между главным и добавочным полюсами;

b_r — ширина наконечника главного полюса;

δ_r — воздушный зазор под главным полюсом с учетом коэффициента Картера. В случае неравномерного воздушного зазора — эквивалентный зазор, рассчитанный по методике [Л. 2 и 3];

δ_d — воздушный зазор под добавочным полюсом с учетом коэффициента Картера.

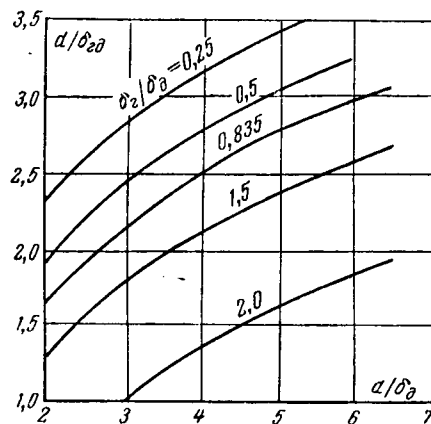


Рис. 4. К расчету магнитной проводимости межполюсного пространства.

В выражении (13) мы пренебрегаем уменьшением магнитной индукции под краями полюсов (краевой эффект), что приводит к завышенному значению L_δ на 0,5—0,8%:

$$\frac{d}{\delta_{r,d}} = \frac{G_{r,d}}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_0 a W} \int_0^d B_w dW = \frac{1}{\pi} \ln \frac{t_2}{t_1}. \quad (14)$$

На рис. 4 представлены зависимости $\frac{d}{\delta_{r,d}} = f\left(\frac{d}{\delta_d}\right)$ при различных значениях $\frac{\delta_r}{\delta_d}$.

На основании этих кривых была подобрана эмпирическая формула, позволяющая рассчитать $\frac{d}{\delta_{r,d}}$ с точностью до 2%:

$$\begin{aligned} \frac{d}{\delta_{r,d}} &= \lg 5,08 \frac{\left(\frac{d}{\delta_d}\right)^{2,745}}{\left(\frac{\delta_r}{\delta_d}\right)^{1,332}} = \\ &= 0,706 + 2,745 \lg \frac{d}{\delta_d} - 1,332 \lg \frac{\delta_r}{\delta_d}. \end{aligned} \quad (15)$$

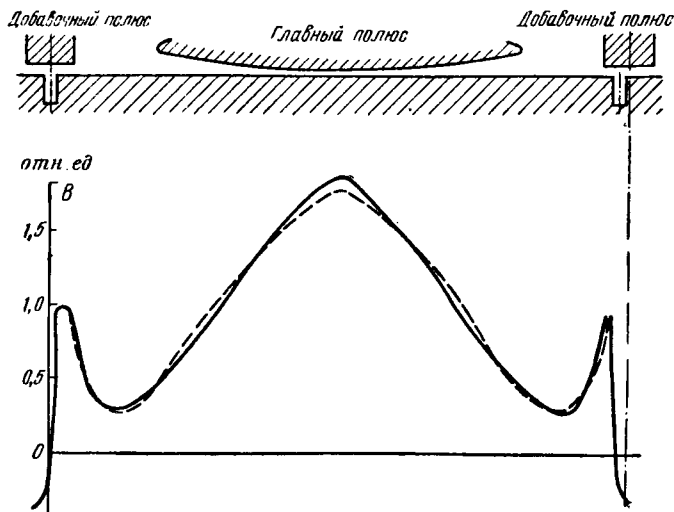


Рис. 5. Распределение магнитной индукции на поверхности якоря тягового двигателя ЭД-104.
— расчетная кривая индукции по формуле (10);
--- опытная кривая индукции.

t	0,1	0,49	1	10	50	100	200	500	1 000	1 725	3 000	10 000
$\frac{W}{\delta_d}$	7,757	6,47	6,158	3,739	2,145	1,523	1,025	0,49	0,215	0	-0,208	-1,725
$B_{отн.ед}$	0,563	0,495	0,443	0,294	0,348	0,423	0,529	0,694	0,81	0,885	0,965	1

Подставив в выражение (13) значения G_r , G_d и $G_{г.д.}$, получим:

$$G = \mu_0 \left(\frac{b_r}{\delta_r} + \frac{b_d - (q - q_1) \tau_s}{\delta_d} + \frac{2d}{\delta_{г.д.}} \right). \quad (16a)$$

Сравнивая с (11a), находим:

$$\delta_a = \frac{q \tau_s}{\frac{b_r}{\delta_r} + \frac{b_d - (q - q_1) \tau_s}{\delta_d} + \frac{2d}{\delta_{г.д.}}} \quad (16)$$

С помощью уравнений (12) и (16) можно рассчитать L_g и M_g по уравнениям (2).

Сравнение расчетной и опытной кривых магнитной индукции (рис. 5) показывает возможность применения предлагаемого метода для расчета δ_a .

Приложение. Расчет распределения магнитного поля секции и эквивалентного воздушного зазора для тягового двигателя ЭД-104.

Шаг обмотки по пазам $q_1 = 14$
 Число пазов на полюсное деление $q = 14,5$
 Расстояние между наконечниками главного и добавочного полюсов $d = 55 \text{ мм}$
 Зубцовое деление $\tau_s = 26,5 \text{ мм}$
 Ширина наконечника главного полюса $b_r = 243 \text{ мм}$
 Зазор под центром главного полюса $\delta_{п.} = 4,5 \text{ мм}$
 Зазор под краем главного полюса $\delta_{к.} = 15 \text{ мм}$
 Ширина наконечника добавочного полюса $b_d = 32 \text{ мм}$
 Зазор под добавочным полюсом $\delta_d = 8,5 \text{ мм}$
 По формулам (7) и (8) определяем:

$$a_2 = \frac{55^2 + 15^2 + 8,5^2}{2 \cdot 15^2} + \sqrt{\left(\frac{55^2 + 15^2 + 8,5^2}{2 \cdot 15^2} \right)^2 - \left(\frac{8,5}{15} \right)^2} = 14,77;$$

$$a_1 = \left(\frac{15}{8,5} \right)^2 \cdot 14,77^2 = 680.$$

Рассчитаем соответствие между точками плоскости t и W . Для этого задаемся рядом значений t и находим по уравнению (9) значения $\frac{W}{\delta_d}$. По формуле (10) рассчитаем распре-

деление магнитной индукции на поверхности якоря. Расчет сведен в таблицу.

Проводимость межполюсного пространства по формуле (14)

$$\frac{d}{\delta_{г.д.}} = \frac{1}{\pi} \ln \frac{t_3}{t_4} = \frac{1}{\pi} \ln \frac{1725}{0,49} = 2,605.$$

По эмпирической формуле (15)

$$\frac{d}{\delta_{г.д.}} = \lg 5,08 \frac{\left(\frac{d}{\delta_d} \right)^{2,745}}{\left(\frac{\delta_{к.}}{\delta_d} \right)^{1,332}} = \lg 5,08 \frac{6,47^{2,745}}{1,765^{1,332}} = 2,602.$$

Эквивалентный воздушный зазор под главным полюсом для $\frac{\delta_{п.}}{\delta_{к.}} = \frac{4,5}{15} = 0,3$; $\delta_r = 7,1 \text{ мм}$ [Л. 2].

Эквивалентный воздушный зазор по уравнению (16)

$$\delta_a = \frac{14,5 \cdot 26,5}{\frac{243}{7,1} + \frac{32 - (14,5 - 14) 26,5}{8,5} + 2 \cdot 2,605} = 9,2 \text{ мм}.$$

Литература

1. Черданцев И. А., Введение в теоретическую электротехнику, изд-во «Энергия», 1934.
2. Иоффе А. Б., Тяговые электрические машины, изд-во «Энергия», 1957.
3. Кожевников В. А. и Кочнев А. В., Анализ потенциальных условий на коллекторе высокоиспользованных некомпенсированных тяговых двигателей постоянного тока, сб. «Вопросы современного электроподвижного состава», Изд-во АН СССР, 1961.
4. Бронштейн И. Н. и Семендяев К. А., Справочник по математике, ГИТТЛ, 1954.
5. Магидсон В. В., Измерение и расчет индуктивных параметров секций якоря машин постоянного тока, «Электро-механика», 1963, № 6.
6. Dreyfus Z. A., Die Stromwendung Grosser Gleichstrommaschinen, Julius Spurger, Berlin, 1929.
7. Dreyfus Z. A., Die Stromwendung Grosser Gleichstrommaschinen Theorie der Gommutterungsstörungen, Acta Polytechnica, 1954, № 6.
8. Thielers G., A new aspect of Commutation Technical achievem of ASEA-res, Vacteras, 1946.
9. Вегнер О. Г., Теория и практика коммутации машин постоянного тока, изд-во «Энергия», 1961.

[14.1.1965]



О секционировании намотанных конденсаторов высокого напряжения

В производстве намотанных (бумажных или пленочных) конденсаторов с высоким переменным рабочим напряжением, как в СССР [Л. 1 и 2], так и за рубежом [Л. 3—5] используется принцип секционирования конденсатора, заключающийся в том, что конденсатор с номинальной емкостью $C_{ном}$ собирается из n последовательно соединяемых секций емкостью по $nC_{ном}$. Если при этом значение $nC_{ном} = C_{секц}$ оказывается технологически неудобным, то секции собирают из m отдельных «подсекций» (элементов), соединяемых параллельно. В этом случае готовый конденсатор представляет собой систему из последовательно-параллельно соединяемых элементов, имеющих емкость $C_{эл} = \frac{1}{m} C_{секц} = \frac{n}{m} C_{ном}$. Эта система собрана в одном общем корпусе и одновременно проходят процессы сушки и пропитки.

Напряжение $U_{секц}$, приходящееся на каждую последовательно включенную секцию конденсатора, будет, очевидно, в n раз меньше номинального рабочего напряжения $U_{ном}$ конденсатора в целом. При переменном напряжении $U_{секц}$ в зависимости от типа конденсатора обычно лежит в пределах 500—1500 в. При напряжении $U_{ном}$ порядка 100—110 кВ число последовательных секций конденсатора составляет величину порядка 100.

При расчете конденсаторной секции, т. е. при выборе толщины диэлектрика и размера закраин, приходится учитывать кратковременную электрическую прочность диэлектрика $E_{пр}$, напряженность начала ионизации $E_{ион}$ и величину напряжения U_p , при котором происходит разряд по закраине. Общий характер зависимости $E_{пр}$ и $E_{ион}$ от толщины диэлектрика d и зависимости U_p от величины закраины Δ показан на рисунке. Эти зависимости характерны для конденсаторов плоского типа (к которым можно отнести и намотанные конденсаторы) и связаны с искажением электрического поля у края обкладок. Кроме этого явления, сказывается также влияние слабых мест в отдельных слоях диэлектрика (бумаги, пленки) в области малых толщин (малого числа слоев), вызывающее снижение $E_{пр}$ в левой части рисунка а.

Рисунок а показывает, что при больших толщинах диэлектрика в секции конденсатора снижается как $E_{пр}$, так и $E_{ион}$, т. е. использование диэлектрика ухудшается. Наибольшее допустимое значение $E_{раб}$ будет соответствовать некоторому значению толщины $d_{опт}$, при котором высокое значение $E_{ион}$ будет сочетаться с высоким значением $E_{пр}$. Наибольшему значению $E_{раб}$ будет соответствовать наименьший объем конденсатора, который, как известно, примерно обратно пропорционален $E_{раб}^2$. При этом напряжение на одну секцию $U_{секц} = E_{раб} d_{опт}$ и число секций будет $n = U_{ном} / U_{секц}$.

Следует отметить, что уменьшенное в n раз (в сравнении с $U_{ном}$) напряжение секции согласно рисунку б, позволяет значительно выиграть в размере закраин, т. е. получить дополнительное снижение объема высоковольтного конденсатора.

Указанные здесь элементарные соображения общезвестны для работников конденсаторного производства и уже в течение многих лет используются при изготовлении конденсаторов

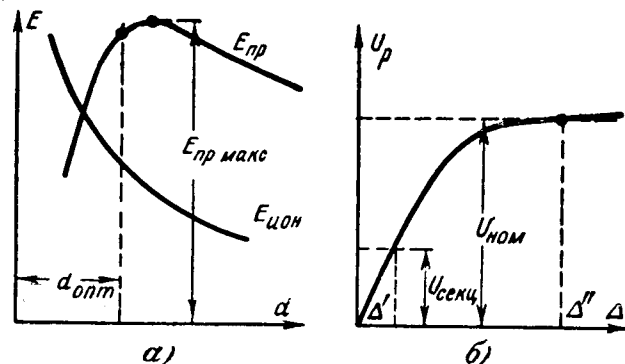
высокого переменного напряжения из таких рулонных диэлектриков, как бумага или пленка, допускающих намотку секций, а также и из пластинчатых диэлектриков типа слюды или листового стекла, применяемых в обычных плоских конденсаторах.

В связи с этим вызывает недоумение вывод, сделанный в работе Ю. Г. Есикова [Л. 6]: «Отказ от секционирования изоляции приведет к созданию более экономичных конструкций конденсаторов, не снижая их надежности». Этот вывод явно противоречит приведенным выше соображениям и всей практике мирового конденсаторостроения.

Ознакомление с работой Ю. Г. Есикова показывает, что под выражением «секционирование» он понимает не сборку конденсатора из отдельных последовательно соединяемых секций, а разделение диэлектрика конденсатора на более тонкие слои промежуточными обкладками, не имеющими соединения с выводами конденсатора. Такой принцип «секционирования» также давно известен (см., например, [Л. 7]), хотя и имеет ограниченное применение. Промежуточные обкладки, обеспечивающие разделение диэлектрика, в подобных конструкциях обычно называют «плавающими» обкладками.

Недавно вопрос о таких обкладках был рассмотрен в работе И. Ф. Переселенцева [Л. 8], который наглядно показал, что эффект «секционирования» при таких обкладках возможен только в том случае, когда размеры «плавающей» обкладки больше размеров «основных» обкладок, соединенных с выводами конденсатора. Только в этом случае «плавающая» обкладка может способствовать уменьшению искажения поля у краев «основных» обкладок, а следовательно, приводить к повышению $E_{ион}$ и $E_{пр}$ изоляции.

В работе Ю. Г. Есикова эксперименты проводились на макетах плоских конденсаторов, собранных из стопки листов конденсаторной бумаги, пропитанной маслом, причем обкладки имели вид кружков одинакового размера диаметром 85 мм. Таким образом, в этой работе как «основные», так и «плавающие» обкладки имели одинаковые размеры, а потому применение «плавающих» обкладок не могло повлиять на уменьшение искажения поля у краев «основных» обкладок. В соответствии с этим автор и не получил улучшения элек-



Зависимость электрической прочности и ионизационной напряженности от толщины диэлектрика (а) и зависимости разрядного напряжения от размера закраины (б).

трической прочности и ионизационной напряженности при своем «секционировании». Этим недоразумением и следует объяснять неправильные выводы работы Ю. Г. Есикова.

Литература

1. Ренне В. Т., Электрические конденсаторы, Госэнергиздат, 1959.
2. Поляков Б. А., Конденсаторные установки для повышения коэффициента мощности, Госэнергиздат, 1962.
3. Marbury R. E., Power capacitors, New York, McGraw Hill, 1949.
4. Bauer F., Der Kondensator in der Starkstromtechnik, Berlin, J. Springer, 1934.

5. Grzybowski S., Kordus A., Królikowski C., Seidel S., Zeydler-Zborowski J., Kondensatory w energoelektryce, WNT, Warszawa, 1964.

6. Есиков Ю. Г., О секционировании плоскопараллельной изоляции, «Электричество», 1964, № 2.

7. Brown S. G., Sporing P. A., The prevention of ionisation in impregnated paper dielectrics, JIEE 1929, vol. 67, № 392, p. 968.

8. Переселенцев И. Ф., Ионизационные характеристики бумажных конденсаторов, «Вестник электропромышленности», 1962, № 1.

Доктор техн. наук, проф. В. Т. Ренне



УДК 621.31

Хроника

Профессор М. Д. КАМЕНСКИЙ

(К 80-летию со дня рождения)

Исполнилось 80 лет со дня рождения одного из старейших энергетиков Советского Союза, заслуженного деятеля науки и техники, доктора технических наук, профессора Михаила Давидовича Каменского.

М. Д. Каменский, окончив в 1909 г. Петербургский политехнический институт, остался в этом институте для усовершенствования. С тех пор, уже 55 лет, он в своей научно-педагогической деятельности тесно связан с Ленинградским политехническим институтом.

Сразу же после Великой Октябрьской социалистической революции М. Д. Каменский активно включился в работу по национализации электропромышленности и организации ее управления на новых началах. В 1918 г. он назначается заместителем заведующего Электрическим отделом ВСНХ и одновременно комиссаром ВСНХ по предприятиям бывшего Акционерного о-ва «Динамо», а в 1919 г. уполномоченным по демонтажу и перевозке на Урал оборудования новой электростанции. По приглашению Г. М. Кржижановского в феврале 1920 г. М. Д. Каменский принимает участие в организационных заседаниях созданной по инициативе В. И. Ленина комиссии ГОЭЛРО, а затем активно участвует в работах ее Петроградской группы.

В 1921 г. М. Д. Каменский был назначен членом коллегии электротехнической секции Петроградского Совнархоза, в ведение которой к этому времени перешла вся электротехническая



промышленность, а затем членом правления Электромашиностроительного треста. С начала 1922 г. в течение 10 лет он работает в Ленэнерго. Здесь Михаил Давидович занимал должности помощника главного инженера, заведующего проектным отделом и затем начальника строительного управления Ленэнерго, руководил работой по восстановлению 3-й ГЭС и расширению 2-й ГЭС, а затем проектированием одной из крупнейших по тому времени Дубровской ГРЭС, входившей в план ГОЭЛРО.

С 1932 г., в течение шести лет, М. Д. Каменский занимает должности начальника сектора спецпроектирования Ленинградского отделения Гидроэлектростроя и затем главного инженера

электротехнического отдела Гидроэнергопроекта, где принимает участие в проектировании группы Волжских ГЭС, Пермской ГЭС на Каме, а также станций на реках Нива, Баксан, Ульба, Чирчик и связанных с указанными станциями сетей и линий электропередачи.

В годы Великой Отечественной войны, оставаясь все время в Ленинграде, М. Д. Каменский много энергии отдал укреплению нашей обороны. Он являлся членом комиссии Горкома КПСС по вопросам, связанным с повышением обороноспособности города. По его инициативе при Ленинградском Доме ученых им. Горького было создано Бюро технической помощи военным организациям и оборонным предприятиям Ленинграда.

В послевоенный период М. Д. Каменский разрабатывает вопросы экономичности работы электрических систем и вопросы рационального построения городских электрических сетей.

Одновременно с широкой инженерной деятельностью М. Д. Каменский ведет плодотворную педагогическую и научную работу. Начав преподавание в Петербургском Политехническом институте в 1918 г., он прошел путь от ассистента до профессора, заведующего кафедрой «Электрические системы и сети», которой руководит бессменно с 1932 г.

Научно-технические интересы М. Д. Каменского широки и разнообразны. Им опубликовано более 80 работ, относящихся к области электрических станций, паровых турбин, общих вопросов

энергетики и главным образом к вопросам электрических систем и сетей, в которых он, несомненно, является пионером в нашей стране. Первой работой по городским сетям на русском языке была статья, опубликованная им в 1913 г. в журнале «Электричество». В книгах «Электрические сети» (1934 г.) и «Электрические системы» (1939, 1941 и 1952 г.) разносторонне и в тоже время систематически изложены важнейшие вопросы работы энергетических систем.

В книге «Городские электрические сети» (1958 г.), написанной коллективом авторов, организованным М. Д. Каменским, приведен обширный материал

по технико-экономическому проектированию электрических сетей современных городов.

Труды М. Д. Каменского пользуются заслуженной популярностью как у советских, так и зарубежных энергетиков.

Имя М. Д. Каменского широко известно инженерной общественности. С 1916 по 1924 г. он был членом редколлегии журнала «Электричество», членом и заместителем председателя электротехнического отдела Русского технического общества, участником многих Всероссийских электротехнических съездов.

Много лет М. Д. Каменский являет-

ся председателем секции электрических сетей и систем Ленинградского отделения НТОЭП. В период 1948—1962 гг. он неоднократно был председателем Оргкомитетов по проведению научно-технических сессий НТОЭП по городским электрическим сетям. В 1962 г. он избран почетным членом НТОЭП.

Заслуги М. Д. Каменского высоко оценены правительством. В 1946 г. ему присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки и техники РСФСР. Он награжден орденами Ленина, «Знак почета» и медалями «За оборону Ленинграда» и «За победу над Германией».

Б. Л. Айзенберг, Г. Н. Александров, А. Н. Грибов, И. А. Груздев, Б. И. Доманский, Л. А. Дубинский, А. М. Залесский, М. П. Костенко, М. В. Костенко, М. Л. Левинштейн, А. А. Микиртичев, В. И. Михайлова, Л. Р. Нейман, Я. Л. Рузин, В. С. Смирнов, К. С. Стефанов, С. В. Усов, В. А. Хоберг, О. В. Щербачев

УДК 621.316.3:621.315.616.9.004.15

ХИМИЮ — В ПОМОЩЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ

В конце 1964 г. на ВДНХ работал семинар инженерно-технических работников по передовым методам производства электромонтажных работ на электростанциях и подстанциях.

Энергостроители страны добились за прошедшие годы семилетки значительных успехов. В 1963 г. введено в эксплуатацию свыше 10 млн. кВт установленной мощности на электростанциях. Советский Союз приблизился вплотную к вводу турбоагрегатов на электростанциях США, а по протяженности ежегодно сдаваемых линий электропередачи на напряжение 35 кВ и более уже превзошел США и находится на первом месте в мире.

Вместе с тем перед энергостроителями поставлены новые грандиозные задачи для выполнения исторического решения XXII съезда КПСС о создании материальной базы для построения коммунизма в нашей стране. Темпы электрификации должны быть усилены, так как полная электрификация страны является стержнем программы по созданию материальной базы. Для ее осуществления необходимо в ближайшее пятилетие мощности электростанций примерно удвоить, а к 1980 г. — увеличить в 6 раз.

На строительстве энергетических объектов электромонтажные работы относятся к числу наиболее сложных, требующих наиболее высокой квалификации исполнителей.

Несмотря на то, что из года в год производительность труда в энергостроительстве растет, на электромонтажных работах рост производительности труда все еще не соответствует заданиям семилетнего плана.

Для выполнения задач о быстром росте производительности труда должны быть приняты решения по совершенствованию конструкций электрических распределительных, электрических аппаратов и машин. Должны быть разработаны и внедрены новые методы выполнения электромонтажных работ.

В своем докладе на семинаре главный инженер Главэлектромонтажа Н. А. Иванов рассказал о мероприятиях, намеченных для совершенствования организации технологии электромонтажных работ в ближайшее время. К числу важнейших мероприятий относится внедрение на электромонтажных работах новых прогрессивных материалов — продукции большой химии, а также применение методов работ на основании использования пластмасс, эпоксидных смол и т. д.

С докладами и сообщениями о внедрении новых материа-

лов на семинаре выступили А. П. Захаров, Л. О. Маневич, В. С. Ратьковский (монтажно-наладочный участок Электростроительного управления), В. П. Краснощекова (МОПЭО Тяжпромэлектротехники) и др.

Применение эпоксидных соединительных и концевых муфт наружной установки на напряжение до 10 кВ обеспечивает значительное снижение трудозатрат. Если при монтаже концевой наружной установки типа КТН расходуется 15 чел-ч, то в случае применения эпоксидной муфты трудозатраты снижаются до 10,9 чел-ч и производительность труда повышается на 38%.

Во время монтажа соединительных муфт силовых кабелей трудозатраты равны 16,2 чел-ч для случаев установки свинцовой муфты, тогда как при использовании эпоксидных муфт трудозатраты уменьшаются до 10,5 чел-ч, а производительность труда возрастает на 54%.

Эпоксидные заделки получают широкое распространение и для концевой заделки кабелей внутренней установки. На работах по концевой разделке воронок внутренних помещений для случаев применения свинцовых перчаток трудозатраты равны 6,1 чел-ч, а для эпоксидных заделок они составляют лишь 4,5 чел-ч, т. е. производительность труда повышается на 57%.

Эпоксидные композиции кабеля характеризуются высокой степенью герметичности, малой габаритностью, большой электрической прочностью. При их внедрении обеспечивается надежная эксплуатация кабелей. Только для одной эпоксидной концевой заделки в случае установки ее вместо муфты КТН-10 экономия средств составляет 22 руб.

Эпоксидные смолы широко применяются для изготовления заливочных и пропиточных композиций и изоляционных материалов. Из эпоксидных смол и компаундов готовят пресс-формы и штампы, а эпоксидный клей находит все более широкое применение для склеивания металла, пластмасс и дерева.

В последние годы отечественная промышленность получила новую эпоксидно-полиэфирную смолу (ЭПС).

Так как эпоксидные смолы не могут сами по себе становиться неустойчивыми, то для эффективного применения их при электромонтажных работах одновременно пользуются также активными химическими веществами отвердителями. Отвердителями эпоксидов служат амины, ангидриды кислот

и фенолформальдегидные смолы. Кроме того, иногда для отверждения эпоксидных смол пользуются фенолятами многовалентных металлов, триэтанолламинборатом, комплексными органическими соединениями олова, полиэфирами и полиизоцианатами. Иногда для отверждения применяются ароматические амины, обеспечивающие окраску эпоксидных смол в разные цвета.

Широкое распространение как отвердители получают низкомолекулярные полиамиды, называемые также версамидами. К числу отечественных версамидов относятся марки Л2-18, Л-19, Л-20. Версамиды, обозначенные более высокими номерами, расходуются для отверждения эпоксидных смол в меньших количествах. Добавка версамидов разрешается в процессе изготовления изделий, работающих при температурах в пределах от -60 до $+80^{\circ}\text{C}$ для высоковольтной аппаратуры и при температурах до $+160^{\circ}\text{C}$ для низковольтной аппаратуры.

Материалом для кабельных муфт могут быть, кроме того, высокомолекулярные смолы горячего твердения, отверждение которых обеспечивается применением ангидридов дикарбоновых кислот. К числу таких кислот относятся фталевая и малеиновая. Эти кислоты придают смолам теплостойкость, они же снижают их горючесть. Смешение эпоксидных смол с фталевыми ангидридами производится при точке плавления этих ангидридов, т. е. при температуре 120 — 130°C . Точка плавления малеинового ангидрида соответственно ниже, и поэтому смешение смол с малеиновыми ангидридами ведется при температуре 50 — 60°C .

За последние годы получили также распространение эпоксидные смолы ЭПС и ЭДЛ. При использовании в качестве отвердителя применяются хлорендиловый ангидрид и, кроме того, для отверждения применяют так называемые инициаторы. К инициаторам относятся циклогексилперекись, гидроперекись метилэтилкетона и пердиметиланилин бензоила. При отверждении применяются ускорители: нафтенат кобальта или диметиланелин.

Эпоксидные смолы и компаунды характеризуются высокой адгезией по отношению к металлу и другим пластмассам, большой химической стойкостью, хорошими диэлектрическими свойствами, малой горючестью и низким влагопоглощением.

К числу их недостатков относится относительно высокая стоимость. Кроме того, их механические свойства ухудшаются по мере роста температуры. Они обладают высоким коэффициентом линейного расширения и характеризуются также некоторой усадкой.

Для того чтобы снизить коэффициент теплового расширения, в эпоксидные смолы и компаунды добавляют в качестве наполнителя тальк, цемент, асбест, фарфоровую и слюдяную муку, резиновую муку, порошкообразную целлюлозу, а также железный, чугунный, бронзовый и алюминиевый порошки.

Агрессивным по отношению к эпоксидным смолам является ацетон. Кроме того, при воздействии на эпоксидные компаунды и смолы трихлорэтлена, этилацетата и перекиси водорода отмечается их сильное набухание. Опыт эксплуатации показал, что кабельные муфты из эпоксидных смол могут длительное время выдерживать воздействие атмосферных осадков и солнечных лучей.

До последнего времени сушка трансформаторного масла на месте монтажа выполнялась при помощи фильтр-прессов и центрифуг. Центрифуги часто выходили из строя в связи с авариями подшипников и подпятников. Отмечались также частые неисправности пластин феродо в центрифугах. Ремонт центрифуг обходился дорого, и для ремонта их отгружали с монтажных участков в Москву и другие города.

Сушка трансформаторного масла при помощи центрифуг производилась долго, например до 7 суток и больше при трехсменной работе, если требовалось очистить 50 т масла. При этом масло многократно пропускать через центрифуги.

В 1963 г. монтажно-наладочной лабораторией треста Электроцентромонтаж Главэлектроцентра Госуниверситета по энергетике и электрификации СССР было организовано внедрение новых методов сушки. При этом было предложено пропускать масло через слой осушителя-сорбента, в связи с чем возникла задача о его подборе. Сорбенты должны характеризоваться большой сорбционной избирательностью (селективностью), т. е. при невысокой концентрации сорбента в растворе должно быть адсорбировано большое количество удаляемого вещества.

В качестве сорбента решено было применять синтетиче-

ские цеолиты или так называемые молекулярные сита. Они имеют пористую поверхность, и при фильтровании через них масла вода задерживается на их поверхности.

К числу сит описанного типа относятся сита Линде 13X с удельной поверхностью $1030 \text{ м}^2/\text{г}$, сита — 5-A с удельной поверхностью 750 — $800 \text{ м}^2/\text{г}$, сажа ($770 \text{ м}^2/\text{г}$) и силикагель ($610 \text{ м}^2/\text{г}$). Цеолиты — полигидраты алюмосиликатов имеют характерную структуру, при которой в молекулярных веществах часть ионов кремния заменена ионами алюминия. Ионы кремния и алюминия окружены каждый четырьмя ионами кислорода.

Молекулярные сита характеризуются однородностью размеров каналов, которые соразмерны с величиной молекул. Именно благодаря этому они и называются молекулярными ситами. Такая структура дает возможность производить адсорбцию тех молекул, которые могут в силу своих геометрических размеров проникнуть в каналы. Для молекулярных сит характерно наличие слабоудерживаемых молекул воды в кристаллах. Такие молекулы удаётся легко заменить молекулами других веществ или вовсе удалить. Внутри молекулярных сит есть значительное количество внутренних каналов, соединенных между собой, в которых происходит перемещение молекул воды и др.

Каркас молекулярных сил образован кольцами тетраэдов. Он не изменяется даже при нагреве до 300 — 450°C и при обезжелезивании. Не отмечается изменение жесткости каркаса молекулярных сит и под разрезанием. Объем полостей в молекулярных ситах составляет до 56% всего объема.

Трансформаторные масла, даже обводненные, характеризуются невысоким содержанием влаги, чаще всего не более 0,01%. Цеолиты по своей структуре напоминают структуру воды. Они быстро находят себе применение в металлургии, химической промышленности и т. д.

Лаборатория монтажно-наладочного отдела Электроцентромонтажа испытала несколько типов цеолитов. При этом был проведен опыт по сушке масла без подогрева при температуре до 20°C . В ходе испытания выяснилось, что вес молекулярного сита не превышает 0,2% веса масла. Молекулярные сита были использованы после прокалывания для освобождения их от влаги. В горячем состоянии после прокалывания цеолиты загружались в адсорберы, которые сразу же заливались трансформаторным маслом.

В процессе опытных работ удалось обеспечить после однократного фильтрования понижение содержания влаги в 6 и более раз, например от 0,1 до 0,01%. При этом электрическая прочность трансформаторного масла возрастала с 10 до 58—60 кВ.

Экономическая эффективность сушки трансформаторного масла весьма велика и только по монтажно-наладочному управлению треста Электроцентромонтаж может быть оценена в 1 год в сумме около 28 тыс. руб. Если стоимость сушки 1 т трансформаторного масла составляет 5 р. 40 к., то при сушке с применением молекулярных сит она уменьшается до 1 р. 27 к. Внедрение молекулярных сит для сушки трансформаторного масла представляется весьма перспективным.

При производстве электромонтажных работ в масляном хозяйстве электромонтажных участков широкое применение могут найти также пластмассы для устройства маслопроводов. Ранее такие маслопроводы изготавливались из стальных труб. Однако они тяжелы, и работы по устройству коммуникаций из них чрезвычайно трудоемки.

Синтетические материалы могут быть в ближайшее время в широких масштабах внедрены и на других видах работ в электромонтажном производстве. Наиболее термостойкие пластмассы давно применяются в электромонтажном деле, в том числе текстолит. В ближайшие годы будут применены стеклопласты, деревопласты, волокнит. Из числа поливинилхлоридов наибольшее распространение имеют полиэтилен и полиизобутилен.

Еще в 1953 г. на строительстве Черепетской ГРЭС из пластмасс были изготовлены шинодержатели на выводах генераторов 150 Мвт. Без сомнения, пластмассы являются наиболее удачным материалом для шинодержателей и шинопроводов, рассчитанных на различные токи, и они должны в ближайшее время полностью вытеснить металлические шинодержатели. Следует повсеместно внедрять распорки из пластмасс для шин и проводов, а также межшинных прокладок.

Имеется возможность изготавливать из пластмасс заглушки для проходных изоляторов и трансформаторов тока.

Большую работу по внедрению пластмасс в электромонтажном производстве развернул трест Электроцентромонтаж. В этом тресте приняты меры к изготовлению из пластмасс кронштейнов для подвесной осветительной арматуры и изоляторов для аккумуляторных батарей. Кронштейны для подвесной арматуры могут быть изготовлены из материалов ДПК и волокнита, а изоляторы для шин аккумуляторных батарей — из декорозита. Изоляционные стойки рубильников и плиты предохранителей изготавливаются из деревопласта и пенопласта. Фенопласт и винипласт могут найти широкое применение для изготовления коробок ответвления в сети освещения, в цепях коммутации, для изготовления клемм, крепления проводов. Давно уже применяются полиэтилен и пластмассы для изготовления боксов для маркировки кабелей. Полихлориды могут полностью вытеснить металлические трубы при прокладке проводов в трубах.

Монтажно-наладочный участок треста Электроцентромонтаж с успехом применил полиэтилен для маслопроводов взамен стали, причем было достигнуто значительное снижение трудозатрат и сокращение сроков выполнения работ при подготовке к ревизии силовых трансформаторов. Из полиэтилена могут быть изготовлены трубы и воздухопроводы к воздушным выключателям. Естественно, что такие воздухопроводы не ржавеют, ипадает необходимость в установке сложных фильтров, применять которые необходимо в случае использования для изготовления воздухопроводов стальных труб, так как окалина и ржавчина могут попасть в систему управления воздушных выключателей, что влечет за собой аварии.

Из полиэтилена могут быть изготовлены баки для разведения электролита.

Монтажно-наладочный участок Электроцентромонтажа применил при ревизии силовых трансформаторов емкости для хранения трансформаторного масла, изготовленные из полиэтилена и полимерных материалов. Такие же материалы могут быть использованы для перевозки и хранения электролита аккумуляторных батарей. Поливинилхлорид может быть применен для уплотнения муфт на вводе кабеля и проводов, а также для изготовления пряжек и крепления проводов, а поливинилхлорид и полиэтилен — также для изготовления дюбелей для закрепления труб и проводов.

В системе треста Электроцентромонтаж, уже начиная с 1959 г., начато изготовление образцов различных изделий для электромонтажных работ. Часть их еще в 1960 г. экспонировалась на ВДНХ и отмечена Дипломом ВДНХ.

Сейчас работы по применению пластмасс на электромонтаже продолжаются. Начиная с 1964 г., применяются мягкие емкости для трансформаторного масла и аккумуляторного электролита. Намечено также применение стальных бочек с вкладышем из полимеров, в которых можно хранить и перевозить аккумуляторные кислоты, так как перевозка кислоты в стеклянных бутылках чрезвычайно опасна и неоднократно сопровождалась несчастными случаями.

Широкое применение пластмасс и других химических материалов на электромонтаже даст возможность снизить сроки производства работ и сократить трудозатраты.

Н. Я. Турчин



Библиография

УДК 621.311

«В. И. ЛЕНИН ОБ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ». Составители В. Ю. Стеклов и Л. А. Фотиева, изд. 2-е, Госполитиздат, М., 1964, 495 стр., ц. 83 коп.

Эта книга представляет большой интерес для всех советских энергетиков. В ней собраны высказывания В. И. Ленина по вопросам электрификации, опубликованные в собрании сочинений Ленина и в ленинских сборниках. Помимо того, в книгу включено свыше 30 ленинских документов, хранящихся в Институте марксизма-ленинизма при ЦК КПСС, ранее нигде не опубликованных.

Свыше 400 ленинских документов, собранных в книге, наглядно показывают, какое огромное внимание уделял Ленин проблемам электрификации страны, и позволяют нам еще раз осознать всю глубину ленинского учения об электрификации как о материально-технической базе коммунистического общества.

Многочисленные выступления Ленина, его статьи, письма и записки, свидетельствующие о широком круге научных проблем электрификации и вопросов практического руководства развитием электроэнергетического хозяйства, тщательно собраны составителями сборника — В. Ю. Стекловым и Л. А. Фотиевой в одном объемистом томе.

Помещенные в сборнике ленинские документы расположены в четырех разделах: I. Преимущества электрической энергии. Электрификация при капитализме. II. Электрификация при социализме. Ленинский план электрификации. III. Пропаганда электрификации. IV. Осуществление электрификации.

Сборнику предпослана вводная статья В. Ю. Стеклова и Л. А. Фотиевой, кото-

рые уже в течение многих лет плодотворно занимаются изучением и подборкой ленинского наследия в области электрификации. В этой статье дается научный анализ основных положений ленинского учения об электрификации и показывается роль В. И. Ленина в ее осуществлении. В конце книги даются хронологический указатель и примечания составителей, значительно облегчающие пользование ею.

Первый раздел книги содержит ленинские документы, относящиеся к революционному периоду. Они показывают, что еще в конце прошлого и начале нашего века Ленин ясно представлял себе революционную роль электрификации в развитии современных производительных сил. В ряде своих высказываний он указывал на неразрывную связь технического прогресса с применением электроэнергии. Ленин показал, что с применением электроэнергии производительные силы капитализма бурно развиваются, обостряя внутренние противоречия капиталистического способа производства. Только в условиях социалистического общества электрификация может быть использована для блага народа, для создания материальной базы нового бесклассового общества.

Второй раздел книги целиком посвящен ленинским высказываниям об электрификации в условиях коммунизма. Из них ясно видно, что с самых первых месяцев существования советского государства Ленин указывал на электрифи-

кацию как на единственный путь к восстановлению и перестройке всего народного хозяйства на основе передовой техники.

Уже в апреле 1918 г. он выдвигает задачу составления единого плана развития народного хозяйства страны и указывает на электрификацию как на его техническую основу. Только после побед на фронтах гражданской войны, в самом начале 1920 г., удалось начать разработку плана электрификации.

Десятки документов, приведенных в сборнике, показывают роль Ленина как инициатора и руководителя разработки плана ГОЭЛРО. Мне — непосредственному участнику составления плана ГОЭЛРО — особенно памятные дни, когда мы с нетерпением ждали сообщений нашего председателя, ближайшего соратника Ленина Г. М. Кржижановского о результатах обсуждения и его беседах с Владимиром Ильичем. Ленин давал нам направляющие идеи для решения проблем электрификации страны, определял основные принципиальные положения плана и оказывал самую разнообразную помощь в нашей работе. Владимира Ильича был первым читателем материалов плана ГОЭЛРО. В сборнике впервые публикуются пометки Ленина на книге проф. К. А. Круга «Программа работ по электрификации России», пометки на бюллетенях комиссии ГОЭЛРО и самом плане ГОЭЛРО. Эти документы показывают, с каким вниманием работал Ленин над материа-

лами плана ГОЭЛРО, каким тщательным образом он изучал отдельные разделы плана электрификации. Именно в эти годы в ряде своих выступлений Ленин развил свои взгляды на электрификацию страны, нашедшие свое блестящее выражение в знаменитой ленинской формуле «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны».

Владимир Ильич ставил в неразрывную связь победу коммунизма в нашей стране с осуществлением электрификации.

«Единственной материальной основой социализма — писал Ленин, — может быть крупная машинная промышленность, способная реорганизовать и земледелие. Но этим общим положением нельзя ограничиться. Его необходимо конкретизировать. Соответствующая уровню новейшей техники и способная реорганизовать земледелие крупная промышленность есть электрификация всей страны»¹.

Ленинские принципы явились основой плана развития народного хозяйства страны на базе широкой электрификации.

Исторический план ГОЭЛРО был первым единым народнохозяйственным планом переустройства всей экономики страны на основе передовой техники — техники электричества. При создании и обосновании плана ГОЭЛРО Ленину пришлось вести борьбу не только с прямыми врагами страны, но и с различными внутривластными группировками, выступавшими против плана электрификации.

Материалы сборника наглядно показывают, как Ленин последовательно и твердо отстаивал план электрификации от нападок оппортунистов всех мастей. «Никакого другого единого хозяйственного плана кроме выработанного уже «ГОЭЛРО» нет и быть не может»².

С первых дней работы над планом электрификации Ленин выступил самым горячим пропагандистом его. Он считал необходимым разъяснить самым широ-

ким массам трудящихся значение электрификации для окончательной победы советского строя. Третий раздел сборника показывает, какую огромную работу по пропаганде идей электрификации развернул Владимир Ильич. Он не только сам неоднократно выступал с пропагандой электрификации, но и требовал проведения широкого круга лекций, организации музеев, издания научно-популярной литературы и изучения электричества в системе политехнического образования.

Осуществление программы электрификации страны началось в тяжелые годы молодой пролетарской республики. И с этих первых лет Владимир Ильич был непосредственным руководителем развития электроэнергетического хозяйства страны. Весь четвертый раздел сборника, содержащий сотни ленинских документов, во всем величии показывает роль Ленина как руководителя строительства первых электростанций, создателя первых научных организаций, первых мероприятий по использованию электроэнергии во всех отраслях народного хозяйства страны.

Строители первенцев социалистической электрификации — Каширской, Шатурской и Ивано-Вознесенской тепловых электростанций и Волховской ГЭС — всегда находили у Ленина помощь и поддержку. Он неоднократно приходил на помощь строителям и твердой рукой направлял их на скорейшее претворение в жизнь предначертаний плана ГОЭЛРО.

Впервые публикуемые в сборнике материалы показывают, что Ленин стоял и у истоков строительства Земо-Авчальской ГЭС в Грузии и Днепровской ГЭС на Украине. Особый интерес представляет ранее неизвестное широкому кругу читателей письмо Ленина к Сергею Орджоникидзе по поводу строительства Земо-Авчальской ГЭС.

«16.X. 1922 г.

тов. СЕРГО!

И Сталин и Сокольников оказались против ассигновки на электростанцию под Тифлисом.

Компромисс: поездка Туманова. Отнесите с сугубым вниманием (тут и вопрос о чае и др.).

Весь материал соберите (для управления).

Мне пришлите и весь материал, и краткую сводку (для меня лично). Борьба будет трудная.

Ваш Ленин»³

В этом же разделе помещены материалы, показывающие помощь Ленина развитию торфяной и сланцевой промышленности страны, электрификации сельского хозяйства и др.

В сборнике помещена записка Ленина Н. П. Горбуну, в которой Владимир Ильич просит обратить сугубое внимание на выполнение просьбы проф. К. А. Круга о предоставлении средств для закупки за границей оборудования для электротехнического факультета МВТУ и Государственного экспериментального электротехнического института (ныне ВЭИ им. Ленина). Эти документы показывают, какое большое значение придавал Ленин организации научного центра в области электротехники.

Значимость этой книги трудно переоценить. Она вышла в то время, когда наша страна успешно заканчивает выполнение семилетнего плана, являющегося важнейшим рубежом в осуществлении ленинской идеи электрификации всей страны. Но несмотря на то, что количественные показатели нашей электроэнергетики сегодня не могут идти ни в какое сравнение с тем, с чего мы начали свой путь, ленинские идеи электрификации, его гениальное учение об электрификации как о материально-технической базе коммунизма всегда будет жить в сознании и труде советского народа, строящего коммунизм.

Рецензируемая книга рассчитана на широкий круг читателей; она представляет большой интерес для всех работающих в области электроэнергетики нашей страны — инженеров, научных исследователей, преподавателей, студентов и учащихся высших и средних специальных заведений, а также может служить прекрасным пособием для пропагандистов.

³ В. И. Ленин, Об электрификации, 1964, стр. 274, 450.

*Заслуженный деятель науки и техники РСФСР
академик В. С. Кулебакин*



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. И. Борисенко, Г. В. Бутневич, Б. Б. Воронцов, Д. В. Васильев, Н. Г. Дроздов (главный редактор), **Л. А. Дубинский, Л. А. Жenuлин, А. М. Залесский, А. С. Касаткин, М. П. Костенко, П. И. Кузнецов, В. С. Кулебакин, Л. Г. Мамиконянц, Н. А. Мельников, Л. Р. Нейман, И. И. Петров, С. И. Рабинович, В. А. Самохвалов, В. В. Солодовников, И. А. Сыромятникова, А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов**

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2/10. Телефон: К 4-24-80.

Почтовый адрес: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.

Адрес для телеграмм: МОСКВА, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО