

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

4

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

Лауреаты Сталинских премий

Постановлением Совета Министров Союза ССР присуждены Сталинские премии за выдающиеся научные работы, выдающиеся изобретения и коренные усовершенствования методов производственной работы за 1949 год.

Вдохновленные великим Сталиным, советские ученые, инженеры, передовые рабочие, окруженные исключительной заботой коммунистической партии и советского правительства, достигли новых замечательных успехов в области науки, техники, производства. Внедрение многочисленных изобретений славной армии советских ученых и инженеров в народное хозяйство Советского государства обеспечивает значительный технико-экономический прогресс, ускоряя победоносное движение нашей Родины вперед, по пути к коммунизму.

Сталинскими премиями за 1949 год отмечены выдающиеся работы в самых различных областях науки и техники. Среди лауреатов Ста-

линской премии насчитывается 1285 деятелей науки и техники, новаторов производства. Наряду с известными учеными — академиками, профессорами — в числе лауреатов Сталинских премий за 1949 г. — мастера, рабочие, передовики социалистической промышленности, превосходно овладевшие современной техникой, обогащающие ее новыми передовыми методами и прокладывающие новые пути в науке и технике. Творческое сотрудничество деятелей науки и работников производства будет и впредь раскрывать могучие силы нашего народа. Советская научно-техническая интеллигенция, в тесном единении с рабочими — новаторами производства, продолжает бороться за неуклонный технический прогресс и дальнейший расцвет советской науки и техники, достойный великой Сталинской эпохи.

Сталинскими премиями за 1949 год отмечен также ряд работ в области электротехники.

ЗА ВЫДАЮЩИЕСЯ НАУЧНЫЕ РАБОТЫ

Сталинские премии второй степени в размере 100 000 рублей присуждены:

Иваненко Дмитрию Дмитриевичу, Соколову Александру Александровичу, профессорам Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Померанчуку Юзику Яковлевичу, доктору физико-математических наук, заведующему сектором теплотехнической лаборатории Академии наук СССР, — за работы по теории «стационарного» электрона и по современным про-

блемам электродинамики, изложенные в монографии «Классическая теория поля», опубликованной в 1949 г.

Шателену Михаилу Андреевичу, члену-корреспонденту Академии наук СССР, профессору Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина, — за научный труд «Русские электротехники», опубликованный в 1949 году.

ЗА ВЫДАЮЩИЕСЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ И КОРЕННЫЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ РАБОТЫ

Сталинские премии первой степени в размере 150 000 рублей присуждены:

Крейцеру Виктору Леонидовичу, руководителю работ, начальнику отдела Научно-исследовательского института, Воронову Александру Владимировичу, Кодессу Петру Ефимовичу, Мигачеву Яковлеву Ивановичу, инженерам того же института, Лебедеву-Карманову Андрею Ивановичу, Боруху Вульфовичу, Ванатовскому Стаславу Владимировичу, Куприянову Николаю Сергеевичу, инженерам, Казанскому Петру Петровичу, главному инженеру главного управления Министерства промышленности

средств связи СССР, Новаковскому Сергею Васильевичу, главному инженеру Московского телевизионного центра, — за создание новой высококачественной телевизионной передающей системы высокой четкости.

Штырену Ефиму Семеновичу, руководителю работ, Маторину Николаю Алексеевичу, Каменскому Николаю Николаевичу, Домбровскому Ивану Ивановичу, научным сотрудникам, — за работу в области связи.

ЗА ВЫДАЮЩИЕСЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ И КОРЕННЫЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ РАБОТЫ

Сталинские премии второй степени в размере 100 000 рублей присуждены:

Еремееву, Александру Сергеевичу, руководителю работы, **Вакурову** Константину Ивановичу, **Федорову** Василию Петровичу, инженерам завода «Электросила» имени С. М. Кирова, **Лежневу** Борису Николаевичу, строгальщику того же завода, — за создание гидрогенератора для Днепровской гидроэлектрической станции имени В. И. Ленина.

Липсману Фролу Петровичу, руководителю работы, **Длугачу** Григорию Владимировичу, **Исаенко** Никите Григорьевичу, **Клингеру** Всеволоду Евгеньевичу, **Кононову** Василию Гавриловичу, **Сосунову** Василию Николаевичу, **Улиничу** Роману Борисовичу, инженерам научно-исследовательских институтов, — за разработку новой радиоаппаратуры.

Мельникову Виктору Семеновичу, руководителю работы, начальнику лаборатории Научно-исследовательского института, **Агапову** Ивану Федоровичу, главному инженеру Московской дирекции радиосвязи, **Магазанику** Амиаду Ариевичу, научному сотруднику Научно-исследовательского института связи, **Львову** Валентину Ивановичу, бывшему научному сотруднику Научно-исследовательского института, **Уманскому** Моисею Яковлевичу, старшему научному сотруднику того же института, — за разработку и внедрение новых высокоэффективных способов радиосвязи.

Розенфельду Виталию Евгеньевичу, профессору Московского энергетического института имени В. М. Молотова, **Кулебакину** Виктору Сергеевичу,

академику, профессору, того же института, **красову** Олегу Алексеевичу, ассистенту того же института, **Лившицу** Исааку Ильичу, заместителю начальника Технического управления Министерства угольной промышленности СССР, **Тихоневу** Борису Николаевичу, инженеру завода «Намо» имени С. М. Кирова, **Зарману** Льву Николаевичу, конструктору Гипроуглемаша, **Хрипуну** Андрею Ионовичу, главному инженеру шахт комбината Москуголь, **Крейцбергу** Мейеру Иосифовичу, старшему научному сотруднику треста «Электропривод», — за создание и внедрение нового рудничного конденсаторного электровоза.

Савельеву Антону Антоновичу, главному конструктору, **Харинскому** Анатолию Леонидовичу, инженеру завода, **Лебедеву** Николаю Ивановичу, инженеру Научно-исследовательского института, — за работу в области радиосвязи.

Щербинину Борису Васильевичу, главному инженеру Сталинской ТЭЦ Мосэнерго, **Устинову** Николаю Васильевичу, начальнику котельного цеха той же ТЭЦ, **Федосеенко** Василию Ивановичу, старшему мастеру, **Фомичеву** Григорию Ивановичу, директору ТЭЦ, **Островскому** Якову Ивановичу, **Комкову** Петру Ивановичу, инженеру Мосэнерго, **Волкову** Федору Федоровичу, инженеру Закамской ТЭЦ, **Глауралэнерго**, **Полухину** Григорию Прокопьевичу, старшему мастеру котельного цеха той же ТЭЦ, — за коренное усовершенствование методов ремонта оборудования электростанций.

ЗА ВЫДАЮЩИЕСЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ И КОРЕННЫЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ РАБОТЫ

Сталинские премии третьей степени в размере 50 000 рублей присуждены:

Абахаеву Мартину Голсановичу, руководителю работы, **Митягиной** Зое Ивановне, **Эльтерману** Илье Михайловичу, инженерам, **Розенцвейг** Софье Азарьевне, старшему научному сотруднику Научно-исследовательского института, — за разработку технологии, конструкции и организацию массового производства железо-никелевых аккумуляторов.

Амарантову Владимиру Николаевичу, руководителю работы, **Старицыну** Георгию Васильевичу, **Удалову** Александру Петровичу, инженер-подполковнику, **Богомолу** Георгию Александровичу, **Сандлеру** Самуилу Мануиловичу, научным сотрудникам научно-исследовательских институтов, **Востокову** Михаилу Николаевичу, инженеру Министерства промышленности средств связи СССР, **Плешкову** Аркадию Ефимовичу, бывшему директору института, — за работу в области средств связи.

Артеменко Евгению Петровичу, научному сотруднику Научно-исследовательского института, **Николаеву** Аркадию Федоровичу, инженеру Горь-

ковского индустриального института имени А. М. Жданова, — за создание нового механизма сооружения линии связи.

Атабекову Григорию Иосифовичу, руководителю работы, профессору Московского авиационного института имени С. Орджоникидзе, **Волкову** Виктору Макаровичу, **Сморозинскому** Якову Михайловичу, **Фабриканту** Вениамину Львовичу, инженерам треста «Теплоэлектропроект», — за разработку и освоение серийного выпуска блочно действующей фильтровой высокочастотной защиты электросетей.

Богуславскому Евгению Яковлевичу, инженер-подполковнику, главному конструктору проекта, **Губенко** Евгению Степановичу, **Петропавловскому** Георгию Борисовичу, **Пешневу** Сергею Григорьевичу, **Тунику** Петру Андреевичу, научным сотрудникам, **Керимову** Кериму Алиевичу, инженер-капитану, — за разработку новой радиоаппаратуры.

Бродскому Аркадию Яковлевичу, руководителю работы, старшему научному сотруднику На-

но-исследовательского института, **Верченко** Василию Романовичу, **Дьяченко** Василию Васильевичу, **Мешковой** Ольге Васильевне, **Петрову** Александру Васильевичу, **Третьякову** Федору Михайловичу, научным сотрудникам института, — за разработку и внедрение новых методов дуговой электросварки.

Виноградову Евгению Андреевичу, старшему технику-лейтенанту, руководителю работы, **Облому** Алексею Федоровичу, инженеру Научно-исследовательского института, **Смординскому** Борису Самойловичу, **Хахареву** Вениамину Михайловичу, инженерам завода, **Чикишеву** Виктору Ивановичу, инженеру конструкторского бюро, — за работу в области средств связи.

Гинкину Георгию Григорьевичу, главному конструктору, **Савельеву** Борису Николаевичу, **Соколову** Ивану Тимофеевичу, **Келлеру** Григорию Ильичу, **Ковалеву** Евгению Васильевичу, **Шпаги** Василию Ивановичу, инженерам Научно-исследовательского института, — за разработку и внедрение в серийное производство новой радиоаппаратуры.

Гуревичу Науму Абрамовичу; руководителю работы, **Гагулину** Евгению Ивановичу, **Львовичу** Александру Аркадьевичу, **Калихману** Семену Григорьевичу, инженерам завода, — за разработку и внедрение в серийное производство новой радиоаппаратуры.

Елизаровой Вере Васильевне, руководителю работы, **Хазану** Аркадию Исааковичу, **Светлову** Николаю Ивановичу, **Аствацатурову** Акиму Григорьевичу, **Бондаренко** Константину Михайловичу, инженерам, — за работу в области средств связи.

Калачеву Константину Александровичу, руководителю работы, инженеру Московского автозавода имени И. В. Сталина, **Савченко** Василию Степановичу, **Чичельницкому** Иосифу Моисеевичу, **Столярову** Владимиру Ивановичу, инженерам того же завода, — за разработку конструкций, изготовление и внедрение высокопроизводительных автоматизированных сварочных аппаратов.

Качурину Абраму Давидовичу, главному конструктору разработки, **Жданову** Георгию Дмитриевичу, **Лелювскому** Антону, Феликсовичу, **Носовскому** Юрию Борисовичу, инженерам завода, **Жук** Николаю Александровичу, директору завода, — за разработку новых средств связи.

Козыреву Борису Павловичу, доценту, заведующему кафедрой Ленинградского электротехнического института имени В. И. Ульянова (Ленина); — за создание фотоэлектрооптических элементов.

Конторову Борису Моисеевичу, руководителю работы, инженеру треста «ОРГРЭС», **Журакову** Николаю Матвеевичу, старшему мастеру того же треста, **Рафаловичу** Изекиилу Исааковичу, инженеру «Ростовэнерго», **Соколову** Евгению Владимировичу, главному инженеру опытно-свадного завода, — за разработку и промышленное внедрение электроодных сплавов для наплавления изнашиваемых деталей оборудования электроустановок.

Кошко Степану Степановичу, главному конструктору, **Вяткиной** Евлалии Ильиничне, **Докторовской** Ирине Владимировне, **Лизареву** Борису Алексеевичу, научным сотрудникам Научно-исследовательского института, **Алексееву** Владимиру Павловичу, инженеру завода, **Даниличу** Андрею Макаровичу, директору завода, — за разработку и внедрение в серийное производство новой радиоаппаратуры.

Красиллову Александру Викторовичу, главному конструктору разработки, **Мельникову** Александру Ивановичу, инженерам Научно-исследовательского института, — за разработку и внедрение в серийное производство новой радиоаппаратуры.

Лебедеву Сергею Алексеевичу, действительно члену Академии наук Украинской ССР, директору Института электротехники Академии наук УССР, **Цукернику** Льву Вениаминовичу, старшему научному сотруднику того же института, — за разработку и внедрение устройства компаундирования генераторов электростанций для повышения устойчивости энергосистем и улучшения работы электроустановок.

Логинову Дмитрию Федоровичу, руководителю работы, **Вознесенскому** Борису Николаевичу, **Гранату** Михаилу Борисовичу, **Аверину** Павлу Павловичу, **Кобленцу** Якову Германовичу, научным сотрудникам, — за работу в области средств связи.

Марону Соломону Рафаиловичу, руководителю работы, **Ладухину** Михаилу Евтихийевичу, **Гальбрайху** Рувиму Авсеевичу, **Секретову** Сергею Михайловичу, инженерам завода, — за разработку образца новой радиоаппаратуры.

Медовару Борису Израилевичу, руководителю работы, старшему научному сотруднику института, **Лашкевичу** Рафаилу Ивановичу, конструктору института, **Слыш** Георгию Кондратьевичу, директору завода, **Гарагуля** Алексею Михайловичу, **Соболеву** Петру Ивановичу, работникам завода, — за разработку нового высокопроизводительного способа двудуговой автоматической электросварки труб большого диаметра.

Милютину Виктору Владимировичу, главному конструктору разработки, **Балабанову** Вячеславу Дмитриевичу, **Керпелеву** Гдалию Менделевичу, **Тимаеву** Леониду Петровичу, инженерам завода, **Левенцову** Ивану Николаевичу, директору завода, **Кузину** Владимиру Степановичу, научному сотруднику института, — за работу в области радиосвязи.

Миронову Вадиму Дмитриевичу, руководителю работы, **Давыдову** Науму Ильичу, научным сотрудникам Всесоюзного теплотехнического научно-исследовательского института имени Ф. Э. Дзержинского, **Стефани** Евгению Павловичу, заведующему лабораторией того же института, — за разработку и внедрение в промышленность электронных автоматических регуляторов тепловых процессов.

Патону Борису Евгеньевичу, руководителю работы, заведующему электротехническим отделом Института электросварки Академии наук УССР имени академика Е. О. Патона, **Дудко** Даниилу Андреевичу, **Гребельнику** Петру Григорьевичу,

вичу, **Рублевскому** Ивану Николаевичу, инженерам того же института, **Кочановскому** Николаю Яковлевичу, **Катлеру** Семену Марковичу, **Кушнareву** Леониду Николаевичу, **Болотникову** Леониду Афанасьевичу, инженерам завода «Электрик», **Ситникову** Тихону Сергеевичу, главному технолог завода «Укркабель», — за разработку нового способа и создание автоматов и полуавтоматов шланговой сварки.

Седову Павлу Ивановичу, руководителю работы, **Гаврилину** Ивану Максимовичу, **Мирскому** Григорию Яковлевичу, **Румянцеву** Николаю Николаевичу, **Михайлову** Алексею Ивановичу, инженерам завода, **Усковой** Елизавете Сергеевне, монтажнице завода, — за разработку и внедрение в серийное производство новой радиоаппаратуры.

Смирнову Вениамину Ивановичу, руководителю работы, **Дехтяреву** Владимиру Сергеевичу, **Камневу** Константину Федоровичу, **Мишину** Борису Сергеевичу, **Низову** Федору Ивановичу, **Цыбульскому** Сергею Антоновичу, инженерам завода, — за внедрение в серийное производство новой радиоаппаратуры.

Соловьеву Ивану Ивановичу, профессору, руководителю работы, **Цареву** Михаилу Ивановичу, **Попову** Иосифу Николаевичу, старшим научным сотрудникам Центральной научно-исследовательской электротехнической лаборатории, — за разработку и внедрение новых устройств релейной защиты, повышающих надежность работы энергетических систем.

Тагеру Павлу Григорьевичу, профессору, руководителю работы, **Качеровичу** Арону Наумовичу, доценту, **Парфентьеву** Андрею Ивановичу, руководителям лабораторий Всесоюзного научно-исследовательского кино-фотоинститута, **Шушарину** Сергею Сергеевичу, сотруднику того же института, **Коноплеву** Борису Николаевичу, начальнику технического управления Министерства кинематографии СССР, **Попову** Валерию Ивановичу, **Трахтенбергу** Льву Соломоновичу, инженерам Московской киностудии «Мосфильм», **Мелик-Степаняну** Араму Матвеевичу, **Ламагину** Кириллу Александровичу, инженерам Ленинградского завода киноаппаратуры «Ленкинап», — за разработку и внедрение нового метода звукозаписи кинофильмов.

Фомину Виктору Николаевичу, руководителю работы, **Соустину** Василию Федоровичу, **Борисову** Сергею Васильевичу, **Александрову** Владимиру Николаевичу, инженерам завода, — за разработку и промышленное освоение серии специальных источников света.

Францевичу Ивану Никитичу, руководителю работы, члену-корреспонденту Академии наук Украинской ССР, заведующему отделом инсти-

тута, **Абиндеру** Алексею Алексеевичу, **Разумскому** Виктору Анатольевичу, сотрудникам того же института, — за разработку и освоение производства контактных сплавов.

Черкасскому Михаилу Исааковичу, руководителю работы, главному инженеру Московского завода «Приборов», **Путюшкину** Илье Михайловичу, директору того же завода, **Сорокину** Алексею Петровичу, мастеру того же завода, **Шелеву** Самуилу Иосифовичу, начальнику производства того же завода, **Михайлову** Анатолию Федоровичу, инженеру Главлаборприбора, Министерства машиностроения и приборостроения СССР, — за коренное усовершенствование методов производства электроизмерительных приборов.

Шаферу Юрию Георгиевичу, руководителю работы, научному сотруднику Научно-исследовательского института, **Григорову** Науму Леонидовичу, **Муратову** Анатолию Сергеевичу, научным сотрудникам, — за разработку конструкции аппаратуры для изучения космических лучей.

Шембелю Борису Константиновичу, руководителю лаборатории Института химической физики Академии наук СССР, руководителю работы, **Агалецкому** Павлу Николаевичу, старшему научному сотруднику Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии, **Макашеву** Марку Хазиевичу, инженеру, **Тхоржéвскому**, Олегу Алексеевичу, младшему научному сотруднику того же института, — за разработку новой конструкции государственного эталона для воспроизведения единицы частоты.

Шитикову Георгию Трофимовичу, инженеру-полковнику, руководителю работы, **Суханову** Владимиру Васильевичу, капитану, **Кефели** Валентину Соломоновичу, **Морозову** Ивану Ивановичу, инженер-майору, **Мякишеву** Ивану Никитичу, старшему техник-лейтенанту, сотрудникам Научно-исследовательского института, — за работу в области радиотехники.

Шориной Анне Федоровне, руководителю работы, **Гаврилову** Николаю Петровичу, **Пузыревскому** Георгию Михайловичу, инженерам завода **Заплетину** Николаю Васильевичу, **Апрелеву** Николаю Ивановичу, сотрудникам Научно-исследовательского института, — за работу в области средств связи.

Щагину Николаю Алексеевичу, руководителю работы, **Орешникову** Вячеславу Васильевичу, **Пигину** Сергею Михайловичу, **Кавалерову** Геннадию Ивановичу, инженерам завода, **Гуменюку** Леониду Степановичу, инженер-капитану 1 ранга, **Кирасю** Алексею Ивановичу, инженер-подполковнику, — за создание новой электроизмерительной аппаратуры.



Теория и расчет рационального электрического привода с маховиком

Кандидат техн. наук, доц. Г. М. КАЯЛОВ

Ижевчеркасский политехнический институт

Введение. Целью статьи является изложение общего метода определения экономически и технически наивыгоднейших значений параметров электропривода с

асинхронным двигателем маховиком, работающего без автоматизации и пауз. Задача расчета подобного привода для машины с заданной пиковой диаграммой статической нагрузки¹ $M_s = f(t)$ сводится в общем случае к рациональному выбору из трех основных параметров: 1) номинальной мощности двигателя P_N ; 2) расчетного номинального скольжения двигателя s_n ; 3) махового момента GD^2 маховика.

В изложенной общей постановке обоснован и полное решение задачи в литературе отсутствует; в различных работах и учебных руководствах предлагаются различные критерии оценки рациональности (см. ниже) привода.

В последующем изложении синхронная скорость n_0 двигателя и вала маховика n_m предполагаются известными. Выбор этих величин лежит за пределами рассматриваемой задачи. Основу всех выводов в целях надлежащей точности положена приближенная криволинейная характеристика асинхронного двигателя [Л. 13]

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

Следует отметить, что аппроксимация посредством прямой характеристики [Л. 7] может привести к грубым ошибкам при относительно малых значениях инерционной постоянной T . Между тем, применение криволинейной характеристики приводит к весьма простым четким формулам (см. ниже).

¹ Физическим аргументом изменения M_s чаще всего является угол поворота в ведомого вала. Однако [Л. 6] в скольжениях, меньших 20%, зависимость $\beta = F(t)$ от t к линейной, поэтому можно исходить из диаграммы $M_s = f(t)$, с возможной последующей коррекцией.

Излагается общий метод определения параметров электропривода с асинхронным двигателем и маховиком без регулятора (мощность, номинальное скольжение электродвигателя, GD^2 маховика), наивыгоднейших по удельному расходу энергии на единицу продукции, либо по удельным эксплуатационным расходам. Излагаемая теория исходит из криволинейной механической характеристики асинхронного двигателя и содержит ряд формул, упрощающих расчеты.

Диаграмма нагрузки $M_s = f(t)$ по тем же причинам предположена наиболее общей, состоящей из нескольких различных пиков статического момента произвольной формы, чередующихся с

паузами холостого хода $M_s = M_0 = \text{const}$.

Принципы расчета рационального электропривода с маховиком. В литературе предлагалось вести расчеты и производить выбор рационального варианта электропривода с маховиком, исходя из следующих принципов: 1) наименьшие удельные эксплуатационные расходы на единицу продукции [Л. 3]; 2) максимум энергии, отдаваемой при прочих равных условиях маховиком приводу [Л. 7, 9]; 3) наименьшие удельные потери энергии на единицу продукции [Л. 1, 14]; 4) полное использование двигателя по нагреву и максимальному моменту перегрузки [Л. 10].

Наиболее естественным и обоснованным бесспорно является впервые предложенный С. А. Ринкевичем и ранее других примененный первый из перечисленных принципов. Значительный интерес представляет также третий принцип, вследствие большой важности вопросов экономии энергии и топлива, а также известной неопределенности некоторых экономических коэффициентов, входящих в расчеты по первому принципу.

Несмотря на теоретический интерес основ второго принципа его применение не обеспечивает положительного экономического эффекта и потому вызывает возражения [Л. 14]; принцип четвертый также не может получить надлежащего обоснования.

Исходя из сказанного, решение задачи дается ниже² применительно к первому и третьему принципам.

² Интересно следующее мнение В. К. Попова [Л. 1] "... в силу необходимости учитывать экономику, вопрос простому математическому анализу не поддается". Видимо, в связи с этим, а также учитывая значение экономии потерь энергии, В. К. Попов в своем труде не дал формулировки принципа 1, а указал, что следует выбирать вариант "наиболее дешевый по капитальным затратам, с меньшим расходом электроэнергии" [Л. 1, стр. 291].

Расчетные параметры электропривода. Согласно каталожным данным параметр P_N может принимать лишь некоторые определенные значения. При этом даже для двигателей, близких друг другу по мощности, технические данные (кратность опрокидывающего момента и др.) могут заметно различаться без подчинения правильной закономерности. Целесообразно поэтому заранее задаться для P_N вариантными значениями и искать наиболее выгодные значения при двух независимых параметрах: опрокидывающего скольжения двигателя

$$s_m = \lambda (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) s_n = \lambda s_n,$$

где $\lambda = \frac{M_m}{M_N}$ — кратность опрокидывающего момента, и постоянной времени разгона электропривода

$$T_0 = \frac{GD^2 n_0}{375 M_m}.$$

Выбор s_m вместо s_n удобнее ввиду использования криволинейной характеристики. Выбор T_0 (вместо T_m) в качестве второго параметра обеспечивает простое уравнение (24) для наиболее выгодного скольжения (см. ниже).

Пределы мощности электродвигателя. Прежде всего следует выяснить область реально возможных значений параметров привода. Начнем с величины P_N , связанной с инерционной постоянной времени $T_m = \frac{GD^2 n_0 s_m}{375 M_m}$ условиями расчета на нагрев ($M_e \leq M_N$) и максимальную перегрузку по моменту ($M \leq M_m$).

Согласно предложенной автором формуле [Л. 15] эффективный момент асинхронного двигателя при переменной нагрузке

$$M_e = M_{se} \sqrt{1 - \frac{m T_m}{T_m + \vartheta}} = \sqrt{\frac{M_{se}^2 \vartheta + M_{cp}^2 T_m}{\vartheta + T_m}}, \quad (2)$$

где параметры M_{se} , m и ϑ диаграммы $M_s = f(t)$ равны³:

$$M_{se} = \sqrt{\frac{1}{t_z} \int_0^{t_z} M_s^2 dt}; \quad m = 1 - \left(\frac{M_{cp}}{M_{se}} \right)^2; \\ \vartheta = t_z \frac{M_{se}^2 - M_{cp}^2}{\Sigma (M_{sk} - M_0)^2}. \quad (3)$$

Условие расчета на нагрев будет:

$$M_N \geq M_N^{(r)} = \sqrt{\frac{M_{se}^2 \vartheta + M_{cp}^2 T_m}{\vartheta + T_m}}. \quad (4)$$

Согласно предложенной автором формуле [Л. 16] для наименьшего значения постоянной

T_m , удовлетворяющего условию максимальной перегрузки ($M \leq M_m$), имеем:

$$T_{m \min} \approx \frac{t_a \sqrt{\mu_s - 1}}{\arctg \frac{0,825}{\sqrt{\mu_s - 1}}} \approx 1,23 \left(\frac{M_s}{M_m} - 0,85 \right) t_a,$$

где M_s и t_a — соответственно величина и продолжительность наиболее тяжелого пика статического момента заданной диаграммы $M_s = f(t)$.

Как вполне достаточное в данном случае приближение, можно принять, что наиболее тяжелым является тот пик, для которого выражение (5) принимает наибольшее значение. Например, с помощью выражения (5) легко установить, что из двух пиков ($\mu_{s1} = 1,5$; $t_{a1} = 3$) ($\mu_{s2} = 6$, $t_{a2} = 0,3$) более тяжелым является первый, тогда как согласно сравнительно наиболее точному из ранее предложенных выражений Л. Б. Гейлера ($\mu_s - 1$) t_a получается неправильный вывод об эквивалентности обоих этих пиков. Если для наиболее тяжелого пика (при некотором P_N) $M_s < M_{s \max}$, то при увеличении P_N наиболее тяжелым может оказаться уже другой пик с большим M_s .

После решения (5) относительно величины $M_N = \frac{M_m}{\lambda}$ условие допустимой перегрузки по моменту примет вид:

$$M_N \geq M_N^{(a)} = \frac{M_s t_a}{\lambda (0,81 T_m + 8,5 t_a)}.$$

По конструктивным причинам (предельный диаметр маховика, предельное снижение скорости электропривода) следует принимать $t_a \leq 10$ сек. Таким образом, реальное значение $M_{N \min}$ отвечает наибольшей из двух величин

$$M_N^{(r)} = \sqrt{\frac{M_{se}^2 \vartheta + 10 M_{cp}^2}{\vartheta + 10}}; \quad M_N^{(a)} = \frac{M_s t_a}{\lambda (8,1 + 8,5 t_a)}.$$

Заметим, что формулы (1) — (5) предполагают пики статического момента диаграммы $M_s = f(t)$ одноступенчатыми, вида $M_s = M_{sk} = \text{const}$. В наличии многоступенчатых (или криволинейных) пиков они заменяются эквивалентными одноступенчатыми (M_x , t_x) по формулам, предложенным автором [Л. 16]:

для расчета на нагрев

$$M_x = \frac{M_{se}^2}{M_{s \text{ cp}}}; \quad t_x = t_{ak} \frac{M_{s \text{ cp}}}{M_x} = t_{ak} \frac{M_{s \text{ cp}}^2}{M_{se}^2},$$

причем M_{se}^2 и $M_{s \text{ cp}}$ определяются за фактическое время t_{ak} приводимого пика $M_{sk} = \varphi_k(t)$.

для расчета на перегрузку

$$M_x = M_{s \max}; \\ t_x = \frac{t_{ak}}{2} \left(\frac{M_{s \text{ cp}}}{M_{s \max}} + \frac{M_{s \text{ cp}}}{M_{s \max} - 0,85 M_m} \right),$$

где $M_{s \max}$ — наибольший момент за время t_{ak} .

³ В [Л. 15] для коэффициентов формулы (3) были даны несколько более сложные выражения, впоследствии упрощенные [Л. 16].

Формулы (7А) легко выводятся из условий равенства эффективных и соответственно средних значений статического момента для обоих пиков; формулы (7В) представляют простое следствие формулы (5), полученное автором [Л. 16] с помощью принципа расчета, предложенного А. Т. Голубовым ([Л. 7], стр. 70).

Наибольшее реальное значение $M_{N \text{ макс}}$ определяется наибольшей величиной результата подстановки в (4) и (5) значения

$$T_{\text{мин}} = T_{01} s_{mN} = \frac{GD_1^2 n_0 s_{mN}}{375 M_m}, \quad (8)$$

отвечающего случаю отсутствия маховика, где GD_1^2 — маховой момент системы без маховика.

Реально возможные значения параметров. При данном $P_N = \text{const}$ практически осуществимые комбинации значений параметров T_0 и s_m образуют в координатной плоскости этих переменных область $PQRSV$, изображенную на рисунке.

Граничная кривая QR есть ветвь равнобокой гиперболы

$$T_0 s_m = T_{m \text{ мин}} = \text{const}, \quad (9)$$

где $T_{m \text{ мин}}$ — наибольшая из величин:

$$T_{m \text{ мин}}^{(a)} = 1,23 \left(\frac{M_s}{M_m} - 0,85 \right) t_a; \\ T_{m \text{ мин}}^{(b)} = \vartheta \frac{M_{se}^2 - M_N^2}{M_N^2 - M_{cp}^2}, \quad (10)$$

из которых первая отвечает формуле (5), а вторая получается путем определения T_m из (4).

Пределами изменения скольжения s_m служат: $s_{m \text{ мин}} = s_{mN}$ (линейный участок RS периметра) и $s_{m \text{ макс}} = F_2(T_0)$ (участок PV периметра).

Пределы изменения параметра T_0 определяются эмпирически установленными конструктивными зависимостями [Л. 5] средних значений махового момента GD_m^2 и веса G маховика от его диаметра D . Здесь прежде всего надлежит выбрать окружную скорость на ободе маховика, для чего естественно воспользоваться формулой, предложенной автором ⁴ [Л. 16],

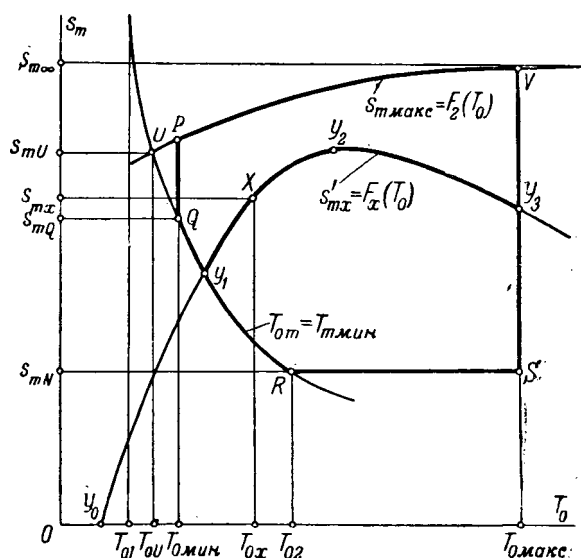
$$v_x = 1,15 W^{3/16} \cdot n_m^{3/8}$$

$$v_x = 0,273 (M_m n_0 n_m^2)^{3/16} (T_0 - T_{01})^{3/8}. \quad (11)$$

Для проектируемого маховика с заданными запасом кинетической энергии W (квтсек) и числом оборотов в минуту n_m его вала эта формула дает значение окружной скорости $v = v_x$.

⁴ В (11) n_0 — обороты в минуту двигателя, к которым внесены величины M_m и GD_m^2 ; n_m ($\leq n_0$) — обороты в минуту маховика, величина же T_{01} дается формулой (8). Как показывают расчеты, формула (11) всегда дает для

и $D = \frac{60v}{\pi n_m}$ осуществимые значения.



Область реально возможных значений параметров T_0 и s_m электропривода с маховиком при данной мощности асинхронного двигателя $P_N = \text{const}$. $T_0 = \frac{GD^2 n_0}{375 M_m}$; $s_{\text{макс}}$ — предельное допустимое скольжение привода (около 0,20); $T_{m \text{ мин}}$ — наименьшее допустимое значение величины $T_m = \frac{GD^2 n_0 s_m}{375 M_m}$; $s_{m \infty} = \frac{s_{\text{макс}}}{1 - \sqrt{1 - \mu_{cp}}}$; $s_{mU} \approx s_{\text{макс}}$; $s_{mQ} = \frac{T_{m \text{ мин}}}{T_{0 \text{ мин}}}$; $T_{02} = \frac{T_{m \text{ мин}}}{s_{mN}}$; T_{01} — наименьшее значение T_0 — при отсутствии маховика; $X(T_{0x}, s_{mx})$ — точка наилучших параметров электропривода.

при котором суммарные потери мощности в маховике (см. приложение I) достигают минимума.

Определив v , а следовательно, и D , нетрудно найти примерные пределы веса реального маховика:

$$G_{\text{мин}} \geq (0,5 \div 0,7) G_0; \quad G_{\text{макс}} \leq 1,6 G_0, \quad (12)$$

где G_0 можно принимать согласно следующей табличке, составленной по графикам А. И. Целикова [Л. 5] для упомянутых выше усредненных зависимостей

$D; \text{м}$	1,2	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	9
$G; \text{т}$	1,1	1,5	4,1	8	13,4	17,8	22,6	32,3	44,6	60	78,5	100

В итоге находим:

$$T_{0 \text{ мин}} = T_{01} + \frac{G_{\text{мин}} v^2}{1,76 M_m n_0}; \quad T_{0 \text{ макс}} = T_{01} + \frac{G_{\text{макс}} v^2}{1,76 M_m n_0} \quad (13)$$

причем величина $T_{0 \text{ мин}}$ должна еще удовлетворять условию (точка V рисунка) ⁵

$$T_{0 \text{ мин}} \geq T_{0U} = \frac{T_{m \text{ мин}}}{s_{m \text{ макс}}} = \frac{T_{m \text{ мин}}}{0,15}. \quad (14)$$

⁵ Величина $T_{0 \text{ макс}}$ должна удовлетворять дополнительному условию предельной величины потерь в маховике P_G , а именно:

$$M_{cp} + 975 \frac{P_G}{n_0} < M_N.$$

Удельные потери. Величина сравнительных удельных потерь энергии в электроприводе на единицу продукции в части, зависящей от параметров P_N , T_0 , s_m , может быть представлена в виде:

$$w = (p_m + p_f) \frac{t_z}{3600} + (p_{Fe} + p_\varphi + p_{Cu} + p_R + p_l) \frac{t'_z}{3600} \text{ кВтч;} \quad (15)$$

здесь $p_m + p_{Fe} = p_c$ — постоянные потери в двигателе;

$p_f + p_\varphi = p_G$ — потери в маховике;

$p_{Cu} + p_R + p_l = p_v$ — средняя за один цикл величина переменных потерь в электроприводе;

t_z — расчетная продолжительность одного цикла нагрузки при условном допущении $n_{cp} \approx \text{const} = n_0$;

t'_z — фактическая продолжительность цикла нагрузки с учетом средней величины скольжения s_{cp} (см. ниже).

Строго говоря, работа сил полезного статического сопротивления может также изменяться вместе с s_{cp} и t'_z , т. е. может зависеть от T_0 и s_m . Так, при горячей обработке металлов увеличение s_{cp} и t'_z будет, вообще говоря, сопровождаться некоторым снижением средней температуры обрабатываемого изделия; но, с другой стороны, уменьшение скорости деформации металла сопряжено с некоторым уменьшением известного динамического эффекта и с соответственным уменьшением полезного сопротивления. Учитывая практическую незначительность

снижения скорости и разности $\delta = \frac{t_z - t'_z}{t_z}$, удельный полезный расход энергии принят независимым от T_0 и s_m и в (15) не включен.

Для потерь p_m и p_f расчетная продолжительность в (15) принята равной t_z , а не t'_z , так как отвечающие силам трения пройденные за один цикл нагрузки пути не зависят от средней скорости, а влиянием скорости на величину сил трения можно пренебречь. При этом условно принято, что потери p_m обусловлены только трением, а потери p_φ — только завихрениями, но не собственно трением о воздух. Заметим, что для механизмов с независимой от s_{cp} продолжительностью пауз (см. ниже) эти пути за цикл с увеличением s_{cp} даже несколько уменьшаются. Считая все потери p_{Fe} локализованными в статоре, мы пренебрегаем также увеличением незначительных потерь в стали ротора при увеличении s_{cp} .

При вычислении для рассматриваемых приводов величины t'_z в функции от T_0 и s_m следует различать две категории рабочих механизмов:

1) механизмы, у которых продолжительность цикла нагрузки зависит от среднего скольжения s_{cp}^a привода, определенного только за время $\sum_k t_{ak}$ рабочих интервалов нагрузочной диаграммы; время же пауз $\sum_k t_{ok}$ от s_{cp} не зависит (например, большинство прокатных станов);

2) механизмы, у которых производительность зависит от среднего скольжения s_{cp} привода и время цикла нагрузки, так как во время пауз происходит подготовка рабочего механизма к следующему интервалу рабочей нагрузки (например, кривошипные механизмы).

Величина t'_z для обеих категорий механизмов дается соответственными формулами

$$t'_{1z} = \frac{\sum_k t_{ak}}{1 - s_{cp}^{(a)}} + \sum_k t_{ok};$$

$$t'_{11z} = \frac{\sum_k t_{ak} + \sum_k t_{ok}}{1 - s_{cp}} = \frac{t_z}{1 - s_{cp}}. \quad (16)$$

Среднее скольжение s_{cp} за всё время t_z можно определить по приближенной формуле [см. (1)]

$$s_{cp} = s_m \sigma_{cp} \approx s_m (1 - \sqrt{1 - \mu_{cp}}); \quad (17)$$

где $\mu_{cp} = \frac{M_{cp}}{M_m}$ — относительная величина среднего момента за один цикл; относительное среднее скольжение $\sigma_{cp}^{(a)}$ за время рабочих пиков статической нагрузки для механизмов категории 1 дается приближенно формулой, предложенной [Л. 16] автором, в виде функции только от одного параметра T_m

$$\sigma_{cp}^{(a)} = \frac{s_{cp}^{(a)}}{s_m} = 1 - \frac{T_m}{t_x} \ln \left[\cos \frac{\xi_x t_x}{T_m} + \frac{\sqrt{1 - \frac{\mu_0 + \mu_{cp}}{2}}}{\xi_x} \sin \frac{\xi_x t_x}{T_m} \right], \quad (18)$$

где

$$t_x = \frac{\sum_k \xi_k t_{ak}}{\sum_k \xi_k}; \quad \xi_x = \frac{\sum_k \xi_k t_{ak}}{\sum_k t_{ak}}; \quad \xi_k = \sqrt{\mu_{sk} - 1},$$

$$k = 1, 2, \dots \quad (19)$$

Привод, наивыгоднейший по удельному расходу энергии. Включение в выражение (15) зависимости t'_z от T_0 и s_m по формулам (16) и (17) или (18) весьма усложняет непосредственное разыскание точки минимума потерь энергии. Учитывая относительную незначительность влияния s_{cp} , особенно в наиболее частом случае механизмов I категории (большинство прокатных станов), целесообразно приближенно принять в (15) $t'_z \approx t_z$.

С учетом сказанного, а также приложения 1, приходим к разысканию в области $PQRSV$ наименьшего значения функции

$$p(T_0, s_m) = (p_m + p_{Fe}) + A(T_0 - T_{01})^{1/2} + k \frac{v^3}{n^3} + k_2(T_0 - T_{01}) + B \left(k'_s + \frac{s_m}{\Lambda} \right) \frac{(1-m) T_0 s_m + \vartheta}{T_0 s_m + \vartheta}, \quad (20)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Lambda &= \frac{s_m}{s_n} = \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}; \\ A &= \frac{0,82}{v^3} \left(\frac{M_m n_0}{1000} \right)^{3/2} \frac{n_m}{1000}; \\ B &= P_N \frac{M_{se}^2}{M_N^2}, \quad k_2 = 0,49 \cdot 10^{-3}; \\ k_3 &= 0,18 \cdot 10^{-9} M_m n_0 n_m; \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

При этом возможные значения независимых параметров T_0 и s_m должны лежать внутри или на границе области $PQRSV$ (рисунок).

Вместо совместного решения системы уравнений

$$\frac{\partial p(T_0, s_m)}{\partial s_m} = 0; \quad \frac{\partial p(T_0, s_m)}{\partial T_0} = 0, \quad (22)$$

в данном случае гораздо удобнее следующий способ определения точки $X(T_{0x}, s_{mx})$ минимума потерь. Из уравнения

$$\frac{\partial p}{\partial s_m} = 0 \quad \text{или} \quad s_m^2 + 2 \frac{\vartheta}{T_0} s_m + \frac{\vartheta(\vartheta - m \Lambda k'_s T_0)}{(1-m) T_0^2} = 0 \quad (23)$$

получим:

$$s_{mx} = F_x(T_0) = \frac{-\vartheta + \sqrt{\frac{m\vartheta}{1-m} (\Lambda k'_s T_0 - \vartheta)}}{T_0}. \quad (24)$$

Второй корень (23), вопреки ошибочному указанно в [Л. 11,14], всегда отрицателен.

Для любого значения T_0 в интервале $(T_{0\min}, T_{0\max})$ эта формула дает соответствующее значение $s_{mx}(T_0)$, отвечающее возможному при данном T_0 минимуму потерь $p'_{\min}(T_0)$ (см. кривую Y_1, Y_2, Y_3 на рисунке).

Строим график функции $p'_{\min}(T_0)$, вычисляя значения по формуле (20) не более чем для 5 значений T_0 и для соответствующих значений $s_{mx} = F_x(T_0)$ согласно (24).

Наивыгоднейшая комбинация (T_{0x}, s_{mx}) будет лежать в точке минимума построенного графика. Если s'_{mx} для некоторого T_0 окажется комплексной величиной, то реальное наивыгоднейшее значение s_m для этого T_0 является $s_{m\min} = s_{mN}$; если же величина s'_{mx} , будучи вещественной, приведет к точке $M(T_0, s'_{mx})$, лежащей в области $PQRSV$, то в качестве реального наивыгоднейшего скольжения при данном T_0

следует взять ординату ближайшей точки периметра $PQRSV$ с той же абсциссой⁶ T_0 .

Достоинства изложенного пути расчета следующие: 1) построение графика $p'_{\min} = p'_{\min}(T_0)$ устраняет необходимость особого математического исследования реализации минимума в точке, отвечающей решению системы (22); 2) график $p'_{\min}(T_0)$ выясняет практически важный характер отклонения величины потерь от минимума при значениях $T_0 \neq T_{0x}$.

Если наивыгоднейшее значение s_{mx} окажется большим, то поправку на величину s_{cr} достаточно ввести для значений $p'_{\min}$ вблизи найденной точки минимума. При этом можно с достаточной точностью считать, что исходная зависимость (24) для определения s'_{mx} остается неизменной.

Для учета этой поправки удобно условно принять, что $t_z = \text{const}$, но что потери мощности увеличиваются в отношении t'_z/t_z , причем $\frac{t'_z}{t_z}$ для данных T_0 и $s_m = s_{mx}$ вычисляется по формулам (16).

Привод, наивыгоднейший по удельным эксплуатационным расходам. Удельные годовые эксплуатационные расходы по электроприводу и рабочему механизму в части, зависящей от параметров T_0 и s_m , складываются в наиболее общем случае из следующих составляющих.

Стоимость потерь энергии на единицу продукции

$$a_w = \frac{h_w}{3600} [(p_m + p_f) t_z + (p_\varphi + p_{Fe} + p_{cu} + p_R + p_l) t'_z], \quad (25)$$

где h_w — стоимость электроэнергии (руб/квтч); остальные величины известны из (15).

Отчисления на ремонт и амортизацию электрооборудования

$$a_D = z_D \left[(Q_D^{(0)} + Q'_D + Q''_D + Q'''_D) + \frac{b s_m}{\Lambda} P_N \right] \frac{t'_z}{3600 T_z}, \quad (26)$$

где z_D (около 0,16) — величина отчислений;

$Q_D^{(0)}$, Q'_D , Q''_D — соответственно стоимости двигателя, пусковой аппаратуры и подводящего кабеля к двигателю;

Q'''_D — составляющая стоимости питающей подстанции, отвечающая тому увеличению мощности последней, которое обуславливается установкой данного электропривода с двигателем той или иной мощности P_N ;

⁶ График $s'_{mx} = F_x(T_0)$ (рисунок) зависимости (24), на котором лежит искомая точка $X(T_{0x}, s_{mx})$ минимума потерь, имеет достаточно четко выраженный максимум (точка Y_2 рисунка). Согласно сказанному выше участок $Y_0 Y_1$ кривой $s'_{mx} = F_x(T_0)$, выходящий за пределы $PQRSV$, надлежит заменить участком QY_1 периметра $PQRSV$.

b — удельная стоимость постоянно включенного внешнего сопротивления в цепи ротора на 1 кВт поглощаемой мощности;
 T_z — годовое число часов работы привода.

Отчисления на амортизацию по маховику

$$a_G = z_G h_G \cdot G \frac{t'_z}{3600 T_z}, \quad (27)$$

где z_G (около 0,06) — величина отчислений на амортизацию, общая для всего агрегата, причем отчислениями на ремонт по маховику можно пренебречь;

h_G — стоимость маховика на одну тонну его веса, принимаемая зависящей только от материала маховика [Л. 10].

Постоянная удельная составляющая общих годовых цеховых расходов, приходящихся на данный агрегат,

$$a_c = \frac{A_c t'_z}{3600 T_z}. \quad (28)$$

Постоянные цеховые расходы A_c , относящиеся к данному агрегату, должны быть заданы. Эта величина определяется различными методами Л. [16] и практически в известной мере условна.

Годовые удельные расходы a_{wr} по снабжению электропривода реактивной энергией целесообразно здесь условно приравнять расходам по эксплуатации дополнительной мощности статических конденсаторов, требующихся для этой цели. С достаточной точностью, пренебрегая стоимостью потерь в конденсаторах, можно принять:

$$a_{wr} = z_D Q_D^{(IV)} \frac{t'_z}{3600 T_z},$$

$$\text{где } Q_D^{(IV)} = h_k \frac{P_N}{\eta_N} \operatorname{tg} \varphi_N \frac{T_z}{T_z}, \quad (29)$$

здесь $Q_D^{(IV)}$ — стоимость конденсаторов;

h_k — стоимость одного установленного реактивного киловольтампера;

T'_z — годовое число часов включения батареи, причем средняя реактивная нагрузка двигателя принята постоянной.

На основании (25) — (29) приходим к следующему выражению для сравнительных удельных расходов на 3600 единиц продукции:

$$\begin{aligned} 3600a = & t_z [c_0 + c_1 (T_0 - T_{01})^{3/2}] + \\ & + t'_z [c_2 + c_3 \left(k'_s + \frac{s_m}{\Lambda} \right) \frac{(1-m) T_0 s_m + \vartheta}{T_0 s_m + \vartheta} + \\ & + c_4 (T_0 - T_{01}) + c_s s_m], \end{aligned} \quad (30)$$

где

$$\begin{aligned} c_0 &= h_w p_m; \\ c_1 &= A h_w = \frac{0,82 h_w}{v^3} \left(\frac{M_m n_0}{1000} \right)^{3/2} \frac{n_m}{1000}; \\ c_2 &= \frac{1}{T_z} \left[z_D \sum_l^{0,IV} Q_D^{(l)} + A_c \right] + \\ &+ h_w \left(p_{Fe} + 0,49 \cdot 10^{-3} \frac{v^3}{n_m^2} \right); \\ c_3 &= h_w P_N \frac{M_{se}^2}{M_N^2}; \\ c_4 &= 0,18 \cdot 10^{-9} M_m n_0 n_m h_w + \\ &+ 1,76 \frac{z_G h_G}{T_z} \frac{M_m n_0}{v^2}; \\ c_5 &= z_D \frac{b}{\Lambda} \frac{P_N}{T_z}. \end{aligned}$$

В этих формулах вместо $v = v_x$ естественно принять v равным значению $v = v_y$, при котором достигают минимума годовые эксплуатационные расходы по маховику [Л. 16].

Путь разыскания минимума выражения (30) во всех деталях аналогичен изложенному выше для выражения (20). В частности, пренебрегая в (30) незначительными расходами $e_s s_m$ по амортизации и ремонту внешнего сопротивления в цепи ротора, получим для s_m уравнение, тождественное с уравнением (23). Итак, точка $Y(T_{0y}, s_{my})$ наименьших удельных эксплуатационных расходов лежит на той же самой кривой (рисунок) $s'_{mx} = F_x(T_0)$, что и точка $X(T_{0x}, s_{0x})$ наименьших удельных потерь, хотя обе точки, вообще говоря, между собой не совпадают. При этом точка Y , подобно X , определяется по минимуму ординаты вспомогательного графика $a'_{min} = a'(T_0)$, полученного подстановкой в (30) значений $s'_{mx} = F_x(T_0)$ из (24).

Приложение 1. Потери мощности в маховике. Обычно потери на трение скольжения в опорах маховика определяются по известной формуле [Л. 4]

$$p_f = 0,65 f G d n_m \cdot 10^{-5} \text{ [кВт]}.$$

Однако, для вариантных расчетов электропривода с маховиком эта формула крайне неудобна, так как требует знания диаметра d шейки вала (см) маховика, зависящей в основном от веса маховика G (м).

Как показал автор [Л. 16], приближенно имеет место зависимость

$$d \approx 4,4 \sqrt{G} \text{ [см]},$$

с помощью которой вместо (1,1) приходим к удобной формуле

$$p_f \approx \gamma_f 10^{-3} \cdot G^{3/2} n_m,$$

где $\gamma_f = 0,3 \div 0,4$, в среднем $\gamma_f \approx 0,35$; G — вес маховика в метрах.

Если выразить в (1,3) G через расчетные моменты T_0 и v , то окончательно найдем:

$$p_f = F(T_0) = A (T_0 - T_{01})^{3/2},$$

⁷ Среднее значение подтверждено техническими данными действующих маховиков [Л. 2].

$$A = \frac{0,82 \cdot (M_m n_0)^{3/2}}{v^3} \cdot \frac{n_m}{1000}.$$

Для определения потерь в маховике на сопротивлении среды удобна формула [Л. 2]

$$p_\varphi = \gamma_\varphi \left(\frac{v}{100} \right)^3 D^2 \left(1 + 5 \frac{B}{D} \right), \quad (1,5)$$

где $\gamma_\varphi = 1$ или 1,33 в зависимости от наличия или отсутствия на маховике защитного кожуха. Выразив приблизительно диаметр D и ширину обода маховика B через T_0 , приходим к выражению [Л. 16]

$$p_\varphi \approx k_3(T_0 - T_{01}) + k_2 \frac{v^5}{n_m^2}, \quad (1,6)$$

$$k_2 = 0,49 \cdot 10^{-3} = \text{const}; k_3 = 0,18 \cdot 10^{-9} M_m n_0 n_m. \quad (1,7)$$

При $T_0 = \text{const}$ сумма правых частей равенств (1,4) и (1,6) дает явное выражение для потерь в маховике $p = p_f + p_\varphi$ в функции от v , минимум которой имеет кто при $v = v_x$ [см. выше формулу (11)].

Приложение 2. Средняя мощность переменных потерь в электроприводе с маховыми массами. Приняв приближенно, что средняя мощность потерь в меди двигателя p_{Cu} пропорциональна квадрату его эффективного тока, получим:

$$p_{Cu} \approx \frac{M_e^2}{M_N^2} P_N (k_s + s_N) = \frac{M_e^2}{M_N^2} P_N \left(k_s + \frac{s_m N}{\Delta} \right), \quad (1,8)$$

где $k_s = \frac{p_{sN}}{P_N}$; p_{sN} — номинальные потери в меди статора.

Чтобы учесть потери p_R во внешнем (компаундирующем) сопротивлении цепи ротора, достаточно заменить величину s_N величиной $s_d = \frac{s_m}{\Delta}$ фактического номинального скольжения на компаундированной характеристике.

Для учета потерь во внешней цепи статора, в питающей кабеле сечением q и длиной l , достаточно заменить k_s на

$$k'_s = k_s + k_l, \quad \text{где} \quad k_l = \frac{3l^2 I_N^2}{56q P_N} \cdot 10^{-3};$$

заменяя еще M_e его выражением через $T_m = T_0 s_m$ по формуле (2), окончательно найдем мощность переменных потерь в электроприводе

$$p_v = p_{Cu} + p_R + p_l = P_N \frac{M_{se}^2}{M_N^2} \left(k'_s + \frac{s_m}{\Delta} \right) \times \frac{(1-m) T_0 s_m + \vartheta}{T_0 s_m + \vartheta}. \quad (1,9)$$

Литература

1. В. К. Попов. Основы электропривода. Госэнергоиздат М, 1945.
2. В. К. Попов. Применение электродвигателей в промышленности. Госэнергоиздат ч. 1. М. 1932.
3. С. А. Ринкевич и Д. М. Бер. Определение работы прокатки цветных металлов и выбор мощности электродвигателя. Вестник металлопромышленности, № 10, 1929.
4. Н. П. Куницкий. Электрооборудование прокатных и термических цехов. М, 1938.
5. А. И. Целиков. Прокатные станы. М, 1947.
6. Т. П. Губенко. Нахождение мощностей двигателей для механизмов с кривошипной передачей. Сборник ХЭТИ, вып. II, 1936.
7. А. Т. Голован. Электрооборудование кузнечно-прессовых механизмов. М., 1936.
8. Л. Б. Гейлер. Переходный режим асинхронного двигателя. Электричество, № 8, 1937.
9. Л. Б. Гейлер. Асинхронные двигатели в приводах с переменной нагрузкой. ВЭП, № 4, 1939.
10. Л. Б. Гейлер. Инструкция для расчета электропривода нерезервных прокатных станов (1 редакция), Уралсибэлектромонтаж, Свердловск, 1945.
11. Л. Б. Гейлер. Оптимальное скольжение асинхронного двигателя при переменной нагрузке. Электричество, № 3, 1947.
12. Г. М. Каялов. К расчету асинхронных двигателей на механическую перегрузку. ВЭП, № 1, 1937.
13. Г. М. Каялов. Работа асинхронного электродвигателя при вращающем моменте, близком к опрокидывающему. ВЭП, № 7, 1937.
14. Г. М. Каялов. О рациональном выборе номинального скольжения асинхронного двигателя в приводах с переменной нагрузкой. ВЭП, № 5, 1941.
15. Г. М. Каялов. Расчет асинхронного прокатного электродвигателя на нагрев. Электричество, № 3, 1948.
16. Г. М. Каялов. Теория электроприводов с маховиком. Диссертация. Нозочеркасский политехнический институт, 1949.
17. Н. С. Бурмистров. Затраты производства и снижение себестоимости в машиностроении. М, 1948.

[21. 11. 1949]



Переходные процессы в асинхронных машинах с учетом асимметрии ротора

Кандидат техн. наук Е. Я. КАЗОВСКИЙ

Ленинград

Переходные процессы во вращающейся асинхронной машине при включении в сеть, коротких замыканиях и др. были рассмотрены в работах автора [Л. 2—5]. Были рассмотрены случаи постоянной [Л. 2, 3, 5] и переменной [Л. 2, 4, 5] скорости вращения, однако ротор предполагался симметричным, как это обычно имеет место в асинхронных машинах.

На практике часто требуется рассчитать режим синхронной машины при асинхронной скорости вращения, пуск синхронных двигателей с пусковой клеткой и др. Такой расчет требует рассмотрения влияния магнитной и электрической несимметрии ротора.

В настоящей работе на базе предложенных [Л. 2] комплексных операторных уравнений изложены методы расчета токов статора и электромагнитного вращающего момента асинхронной машины, работающей с постоянной либо с переменной скоростью вращения.

На основе проведенного рассмотрения предлагается для практического пользования полярная векторная диаграмма, аналогичная обычной круговой диаграмме асинхронной машины с симметричным ротором, позволяющая с хорошим для практики приближением оценивать в переходных режимах токи, потокосцепления и электромагнитный вращающий момент асинхронной машины, имеющей в общем случае асимметрию ротора.

Допущения. 1. Машина со стороны статора питается системой напряжений прямой последовательности от бесконечно мощной сети; обмотки ротора замкнуты накоротко, либо на сопротивление. 2. На статоре имеется одна система синусоидальных обмоток. 3. Насыщение в стали учитывается только выбором соответствующих параметров. 4. Потери в стали статора не учитываются. 5. Скорость вращения в тех случаях, когда нет специальных оговорок, принимается постоянной.

Рассмотрение ведется в относительных единицах. За единицу напряжения, потокосцеплений и

Представлены формулы и графические методы для расчета токов, потокосцеплений и вращающих моментов асинхронных машин с учетом асимметрии ротора в переходных режимах. Рассмотрены процессы включения в сеть вращающейся машины, короткие замыкания и другие переходные процессы. Представленные методы позволяют учесть произвольное число цепей в роторе.

тока приняты статорное напряжение, потокосцепления и ток в номинальном режиме. За единицу сопротивления принята величина, равная номинальному фазовому напряжению, деленному на номинальный фазовый ток статора.

За единицу вращающего момента принят вращающий момент, имеющий место при мощности, равной номинальной мощности машины при номинальной скорости вращения. За единицу скорости принята номинальная синхронная скорость вращения. За единицу времени принят радиан (при частоте 50 $\frac{1}{314}$ сек.).

Общие уравнения. Для напряжений, потокосцеплений и токов статора по продольной и поперечной осям, связанным с ротором, при отсутствии питания со стороны ротора имеем следующие уравнения [Л. 2]:

$$e_{sd} = r_s i_{sd} + p \psi_{sd} - \psi_{sq} \omega; \quad \psi_{sd} = x_d(p) i_{sd};$$

$$e_{sq} = r_s i_{sq} + p \psi_{sq} + \psi_{sd} \omega; \quad \psi_{sq} = x_q(p) i_{sq};$$

здесь e_{sd} и e_{sq} — напряжения по продольной и поперечной осям;

ψ_{sd} и ψ_{sq} — потокосцепления статора по продольной и поперечной осям;

i_{sd} и i_{sq} — токи статора по продольной и поперечной осям;

$x_d(p)$ и $x_q(p)$ — операторные реактивности по продольной и поперечной осям;

ω — скорость вращения ротора;

r_s — активное сопротивление фазы обмотки статора.

Если ввести комплексные величины

$$e_s = e_{sd} + j e_{sq}; \quad \psi_s = \psi_{sd} + j \psi_{sq}; \quad i_s = i_{sd} + j i_{sq}$$

то получаем следующую систему комплексных операторных уравнений:

$$e_s = r_s i_s + (p + j\omega) \psi_s;$$

$$\psi_s = x_s(p) i_s + y_s(p) i_s^*,$$

где

$$x_d(p) = \frac{x_d(p) + x_q(p)}{2}, \quad x_q(p) = \frac{x_d(p) - x_q(p)}{2},$$

и звездочкой обозначены сопряженные комплексные величины (j заменяется на $-j$).

Из уравнений (3) можно определить ток i_s в функции напряжения e_s в операторном виде [Л. 2]:

$$i_s = \frac{z_{sx}^* e_s - z_{sy} e_s^*}{z_{sx} z_{sx}^* - z_{sy} z_{sy}^*}, \quad (4)$$

где

$$z_{sx} = r_s + (p + j\omega) x_s(p); \quad z_{sy} = (p + j\omega) y_s(p). \quad (5)$$

Знаменатель в формуле (4)

$$z_{sx} z_{sx}^* - z_{sy} z_{sy}^* = (p^2 + \omega^2) x_d(p) x_q(p) + r_s [r_s + 2p x_s(p)].$$

Потокоцепления статора в операторном виде

$$\psi_s = \frac{[r_s x_s(p) + (p - j\omega) x_d(p) x_q(p)] e_s + r_s y_s(p) e_s^*}{z_{sx} z_{sx}^* - z_{sy} z_{sy}^*}. \quad (6)$$

где

$$D(p) = p^3 + (\alpha'_r + \alpha_q + \alpha'_d) p^2 + (\omega^2 + \alpha'_r \alpha_q + \alpha'_d \alpha_r + \alpha'_d \alpha_q) p + (\omega^2 \alpha'_r + \alpha'_d \alpha_q \alpha_r) = (p - p_1)(p - p_2)(p - p_3); \quad (8)$$

$$\alpha_q = \frac{r_s}{x_q}; \quad \alpha'_d = \frac{r_s}{x'_d}; \quad p_1, p_2, p_3 - \text{корни уравнения}$$

$$D(p) = 0.$$

Приближенное решение уравнения $D(p) = 0$ представлено в приложении 1.

Если напряжение в фазе a статора выражается в функции времени в виде $e_{sm} \cos(t + \gamma_0)$, а угол между продольной осью ротора и осью фазы a статора в момент времени $t=0$ равен Θ_0 , то напряжение e_s при неизменном скольжении s можно выразить в функции времени в виде

$$e_s = e_{sm} e^{j(st + \beta_0)},$$

где $\beta_0 = \gamma_0 - \Theta_0$; $s = 1 - \omega$; e_{sm} — амплитуда напряжения e_s .

Применяя в уравнении (7) теорему смещения, получаем:

$$i_s = e_s \left\{ \frac{2r_s(p + js + \alpha_r) + (p - j\omega + js)[(p + js + \alpha'_r)x'_d + (p + js + \alpha_r)x_q]}{2x'_d x_q D(p + js)} 1 \right\} - e_s^* \left\{ \frac{(p + j\omega - js)[(p - js + \alpha'_r)x'_d - (p - js + \alpha_r)x_q]}{2x'_d x_q D(p - js)} 1 \right\}. \quad (9)$$

Электромагнитный вращающий момент $M = \text{Re}[j\psi_s i_s^*]$, где Re означает реальную часть комплекса. ψ_s и i_s в этой формуле должны быть выражены как функции времени.

Включение машины, вращающейся с неизменным скольжением s , в сеть. Случай отсутствия демпферной системы на роторе. Характеристическое уравнение дифференциального уравнения (4) уже для случая одной обмотки в роторе по продольной оси оказывается кубическим.

В этом случае

$$x_d(p) = x'_d \frac{p + \alpha'_r}{p + \alpha_r}; \quad x_q(p) = x_q,$$

где x'_d — переходная реактивность по продольной оси;

и α'_r — коэффициенты затухания обмотки ротора при разомкнутой и замкнутой обмотке статора соответственно;

x_q — синхронная реактивность по поперечной оси.

В этом случае ток статора в операторном

где

$$i_s = \frac{2r_s(p + \alpha_r) + (p - j\omega)[(p + \alpha'_r)x'_d + (p + \alpha_r)x_q]}{2x'_d x_q D(p)} e_s - \frac{(p + j\omega)[(p + \alpha'_r)x'_d - (p + \alpha_r)x_q]}{2x'_d x_q D(p)} e_s^*, \quad (7)$$

Корни уравнения $D(p + js)$ равны $p_1 - js$; $p_2 - js$; $p_3 - js$. Ток i_s может быть разбит на следующие составляющие:

$$i_s = i_{s0x} + \Delta i_{s0} + i_{s1x} + \Delta i_{s1} + i_{s2x} + \Delta i_{s2} + i_{s3x} + \Delta i_{s3},$$

где $i_{s0x} + \Delta i_{s0} = i_{s0}$ — установившийся ток;

$i_{s1x} + \Delta i_{s1} = i_{s1}$ — переходные составляющие, имеющие затухания, связанные с корнями p_n ($n = 1, 2, 3$).

Знаком Δ обозначаем дополнительную составляющую, связанную с e_s и вызванную асимметрией ротора.

Токи i_{s0x} и Δi_{s0} в функции времени могут быть получены непосредственно по формуле (4) подстановкой $p = \pm js$ в составляющие, связанные с e_s и e_s^* соответственно, и равны:

$$\left. \begin{aligned} i_{s0x} &= \frac{[r_s - j(\omega - s)x_s(js)]}{(\omega - s)x_d(js)x_q + r_s[r_s + 2jsx_s(js)]} e_s; \\ \Delta i_{s0} &= \frac{-j(\omega - s)y_s(-js)}{(\omega - s)x_d(-js)x_q + r_s[r_s - 2jsx_s(-js)]} e_s^* \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Переходные токи i_{snx} и Δi_{sn} ($n=1, 2, 3$) в функции времени могут быть выражены в виде:

$$\left. \begin{aligned} i_{snx} &= \frac{e_{sm}}{x'_d x_q} \left\{ \frac{[r_s + (p_n - j\omega) x_s(p_n)] (p_n + \alpha_r)}{D'(p_n) (p_n - js)} e^{p_n t + j\beta_0} \right\}; \\ \Delta i_{sn} &= \frac{e_{sm}}{x'_d x_q} \left\{ \frac{(p_n + j\omega) y_s(p_n) (p_n + \alpha_r)}{(p_n + js) D'(p_n)} e^{p_n t - j\beta_0} \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где

$$x_s(p_n) = [x_s(p)]_{p=p_n}; \quad y_s(p_n) = [y_s(p)]_{p=p_n}; \\ D'(p_n) = \left[\frac{D(p)}{p - p_n} \right]_{p=p_n}.$$

Потокосцепления статора в операторном виде

$$\psi_s = \frac{[(2p - 2j\omega + \alpha_q)(p + \alpha'_r) + \alpha'_d(p + \alpha_r)] e_s + [\alpha_q(p + \alpha'_r) - \alpha'_d(p + \alpha_r)] e_s^*}{2D(p)}. \quad (12)$$

Пользуясь теоремой смещения, получаем:

$$\psi_s = e_s \left\{ \frac{(2p - 2j\omega + js + \alpha_q)(p + js + \alpha'_r) + \alpha'_d(p + js + \alpha_r)}{2D(p + js)} \mathbf{1} \right\} + \\ + e_s^* \left\{ \frac{\alpha_q(p - js + \alpha'_r) - \alpha'_d(p - js + \alpha_r)}{2D(p - js)} \mathbf{1} \right\}. \quad (13)$$

Рассматривая ψ_s как сумму:

$$\psi_s = \psi_{s0r} + \Delta\psi_{s0} + \sum_{n=1}^3 (\psi_{snx} + \Delta\psi_{sn}),$$

где индексы приняты по аналогии с таковыми для токов, получаем в функции времени:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{s0r} &= \frac{[r_s x_s(js) - j(\omega - s) x_d(js) x_q] e_s}{(\omega - s) x_d(js) x_q + r_s [r_s + 2js x_s(js)]}; \\ \Delta\psi_{s0} &= \frac{r_s y_s(-js) e_s^*}{(\omega - s) x_d(-js) x_q + r_s [r_s - 2js x_s(-js)]}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Составляющие потокосцеплений ψ_{snx} и $\Delta\psi_{sn}$ ($n=1, 2, 3$) в функции времени:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{snx} &= \frac{e_{sm}}{2x'_d} \left\{ \frac{[r_s + (2p_n - 2j\omega + \alpha_q) x_d(p_n)] (p_n + \alpha_r)}{D'(p_n) (p_n - js)} e^{p_n t + j\beta_0} \right\}; \\ \Delta\psi_{sn} &= \frac{e_{sm}}{2x'_d} \left\{ \frac{(p_n + \alpha_r) [\alpha_q x_d(p_n) - r_s]}{(p_n + js) D'(p_n)} e^{p_n t - j\beta_0} \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Электромагнитный вращающий момент имеет большое количество составляющих, вызванных в основном магнитной асимметрией.

Средний установившийся вращающий момент

$$M_{c0} = \frac{e_{sm}^2 (\omega - s)}{A(s)} \left\{ \frac{s(\omega - s) \left[\left(\frac{r_s}{\omega - s} \right)^2 + x_q^2 \right] x'_d (\alpha'_r - \alpha_r)}{2} - \right. \\ \left. - r_s \left[\frac{(x'_d \alpha'_r - x_q \alpha_r)^2 + s^2 (x'_d - x_q)^2}{4} \right] \right\}, \quad (16)$$

где знаменатель

$$A(s) = (\omega - s)^2 x_q^2 x_d'^2 (\alpha_r'^2 + s^2) - \\ - r_s (\omega - s) x_q^2 x_d'^2 2s^2 (\alpha_r - \alpha_r') + \\ + r_s^2 [2 \omega^2 x_q x_d' (\alpha_r' \alpha_r + s^2) + \\ + s^2 x_d'^2 (\alpha_r'^2 + s^2) + s^2 x_q^2 (\alpha_r^2 + s^2)] + \\ + 2r_s^3 x_d' s^2 (\alpha_r' - \alpha_r) + r_s^4 (\alpha_r'^2 + s^2). \quad (17)$$

Пульсирующий установившийся электромагнитный вращающий момент

$$M_{p0} = \frac{(\omega - s)^2}{A(s)} \operatorname{Re} \left\{ \left[x'_d \left(jx_q - \frac{r_s}{\omega - s} \right) (\alpha_r' + js) (\alpha_r - js) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{r_s}{\omega - s} \left(x_q + j \frac{r_s}{\omega - s} \right) (\alpha_r'^2 + s^2) \right] y_s(js) e_s^* \right\}. \quad (18)$$

Аналогично можно вычислить и затухающие составляющие электромагнитного вращающего момента.

Как нетрудно видеть, установившаяся пульсирующая составляющая будет иметь частоту ω так как $e_s^2 = e_{sm}^2 e^{j(2st + 2\beta_0)}$.

Электромагнитный вращающий момент в переходном режиме в рассматриваемом случае состоит из большого количества составляющих имеющих разные частоты. Составляющие будут иметь 9 разных коэффициентов затухания.

Рассмотрение при произвольном числе цепей в роторе при приближенном учете активного сопротивления в цепи статора. Если учитывать приближенно активное сопротивление в цепи статора r_s вместо точного учета, как это было сделано выше, то задача сильно упрощается:

$$\psi_s \approx \frac{e_s}{j} [1 - e^{-\alpha_1 t - j\omega_1 t}] = \psi_{s0} + \psi_{s1}; \quad (19)$$

здесь

$$-\alpha_1 - j\omega_1 = -\alpha_{s\omega}^* - j; \quad \alpha_{s\omega}^* \approx \frac{r_s}{x_s(-j\omega)} = \alpha_1 - j\omega_c. \quad (20)$$

В частном случае при отсутствии демпфной обмотки

$$\alpha_{s\omega}^* \approx \frac{2r_s (\alpha_r - j\omega)}{x'_d (\alpha_r' - j\omega) + x_q (\alpha_r - j\omega)}; \quad (21) \\ \alpha_1 = 2 \frac{\alpha_r (x'_d \alpha_r' + x_q \alpha_r) + \omega^2 (x'_d + x_q)}{(x'_d \alpha_r' + x_q \alpha_r)^2 + \omega^2 (x'_d + x_q)^2} r_s; \\ \omega_c = 2r_s \frac{x'_d (\alpha_r' - \alpha_r) \omega}{(x'_d \alpha_r' + x_q \alpha_r)^2 + \omega^2 (x'_d + x_q)^2}. \quad (22)$$

При произвольном числе цепей в роторе статора определится из операторного уравнения

$$i_s = \frac{x_s(p) \psi_s - y_s(p) \psi_s^*}{x_d(p) x_q(p)} = \\ = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\psi_s}{x_d(p)} + \frac{\psi_s}{x_q(p)} + \frac{\psi_s^*}{x_d(p)} - \frac{\psi_s^*}{x_q(p)} \right\}. \quad (23)$$

Подставляя вместо ψ_s его значение (19) и пользуясь теоремой смещения, получаем:

$$i_s = \frac{e_s}{2j} \left\{ \frac{1}{x_d(p+js)} + \frac{1}{x_q(p+js)} \right\} - \frac{e_s^*}{2j} \left\{ \frac{1}{x_d(p-j\omega) - x_q(p-j\omega)} \right\} - \frac{e_{s1}}{2j} \left[\frac{1}{x_d(p-j\omega)} + \frac{1}{x_q(p-j\omega)} \right] + \frac{e_{s1}^*}{2j} \left[\frac{1}{x_d(p+j\omega)} - \frac{1}{x_q(p+j\omega)} \right], \quad (24)$$

где при выражении в функции времени

$$e_{s1} = e_s e^{-\alpha_1 t - j\omega_c t} = e_{sm} e^{-\alpha_1 t} e^{-j(\omega - \omega_c)t - \beta_0}. \quad (25)$$

Выражение (24) раскрывается в функции времени по обычным правилам теоремы разложения. При пользовании теоремой смещения мы пренебрегли влиянием активного сопротивления r_s в цепи статора на величину операторных реактивностей.

Пользование круговой диаграммой. Пользуясь приближенным учетом r_s , ток i_s при включении вращающейся машины можно найти по обычной упрощенной „круговой“ диаграмме асинхронной машины, построенной для установившихся режимов¹. Ток $(i_s)_{p=0}$ на основании (24) в функции времени равен:

$$(i_s)_{p=0} = \frac{e_s}{2j} \left\{ \left[\frac{1}{x_d(js)} + \frac{1}{x_q(js)} \right] + e^{-2j(st+\beta_0)} \left[\frac{1}{x_q(-js)} - \frac{1}{x_d(-js)} \right] \right\} - \frac{e_s e^{-\alpha_1 t} e^{-j(1-\omega_c)t}}{2j} \left\{ \left[\frac{1}{x_d(-j\omega)} + \frac{1}{x_q(-j\omega)} \right] + e^{j2[(\omega - \omega_c)t - \beta_0]} \left[\frac{1}{x_q(j\omega)} - \frac{1}{x_d(j\omega)} \right] \right\} = i_{s0} + i_{s1}, \quad (26)$$

т. i_{s0} установившийся ток; а i_{s1} — составляющая, затухающая с коэффициентом затухания α_1 .

Пусть круговые диаграммы, соответствующие асинхронным машинам с операторными реактивностями $x_d(p)$ и $x_q(p)$, работающим в установившихся режимах, представлены на рис. 1. Для определения установившегося тока i_{s0} находим установившийся ток i_{s0d} для машины с реактивностью $x_d(p)$, работающей при заданном скольжении s , и установившийся ток i_{s0q} для машины с реактивностью $x_q(p)$, работающей со скольжением s .

Соединяем концы векторов тока, делим разность векторов пополам и из полученного центра описываем окружность через концы векторов i_{s0d} и i_{s0q} . Полученная окружность будет геометрическим местом, которое описывает конец вектора установившегося тока i_{s0} , двигаясь по ней по часовой стрелке со скоростью $2s$.

Для определения тока i_{s0} в момент $t=0$ нужно провести из конца вектора i_{s0q} вертикаль до пере-

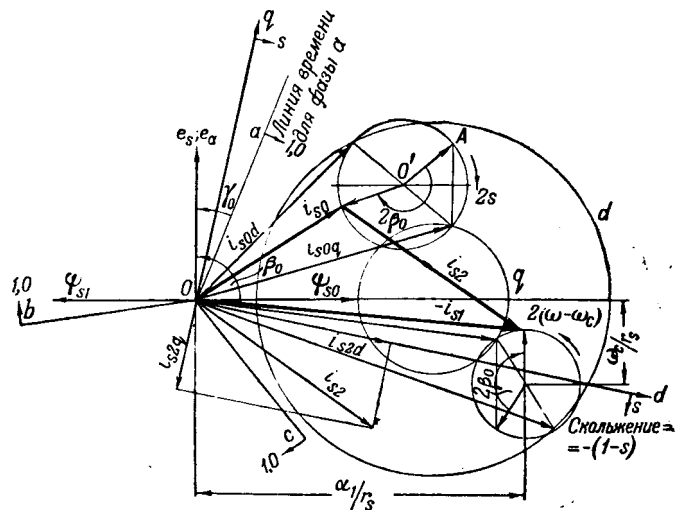


Рис. 1. Определение токов i_{s0} , i_{s1} и i_{s2} и потоковсцеплений ψ_{s0} и ψ_{s1} в момент $t=0$.

сечения с малой окружностью (рис. 1). Полученный вектор $O'A$, как это видно из формулы (26), нужно повернуть на угол $2\beta_0$ по часовой стрелке. Этот радиус-вектор после поворота определит точку окружности, соответствующую i_{s0} в момент $t=0$. Угол β_0 определен выше.

Аналогично находится переходный ток i_{s1} , затухающий с коэффициентом затухания α_1 . В этом случае на круговых диаграммах, соответствующих установившимся режимам, определяется соответствующий ток при скольжении, численно равном $-\omega$, совершенно аналогично определению тока i_{s0} . Этот ток равен $(-i_{s1})_{t=0}$. Полный ток i_s может быть представлен в виде суммы $i_s = i_{s0} + i_{s1} + i_{s2}$. Составляющей i_{s2} при приближенном учете r_s можно пренебречь. В момент $t=0$ ток $i_s=0$. Зная i_{s0} и i_{s1} в момент $t=0$, нетрудно определить ток $(i_{s2})_{t=0}$ в момент $t=0$, как показано на рис. 1. Ток i_{s1} вращается по часовой стрелке со скоростью $1-\omega_c$ вместе со своим маленьким кругом, по которому одновременно движется конец вектора i_{s1} , скользя по этому последнему со скоростью $2(\omega - \omega_c)$ против часовой стрелки. При этом масштабы всей круговой диаграммы для тока i_{s1} уменьшаются пропорционально $e^{-\alpha_1 t}$, как это представлено на рис. 2. Коэффициент затухания α_1 и частота ω_c определяются из круговой диаграммы как координаты центра малого круга для i_{s1} при $t=0$ (рис. 1, приложение 3). Ток i_{s2} представляет собой сумму токов, количество которых опреде-

¹Как известно, при наличии нескольких систем токов в роторе обычная круговая диаграмма асинхронной машины превращается в геометрическое место точек высокого порядка, поэтому слово „круговая“ мы в кавычки.

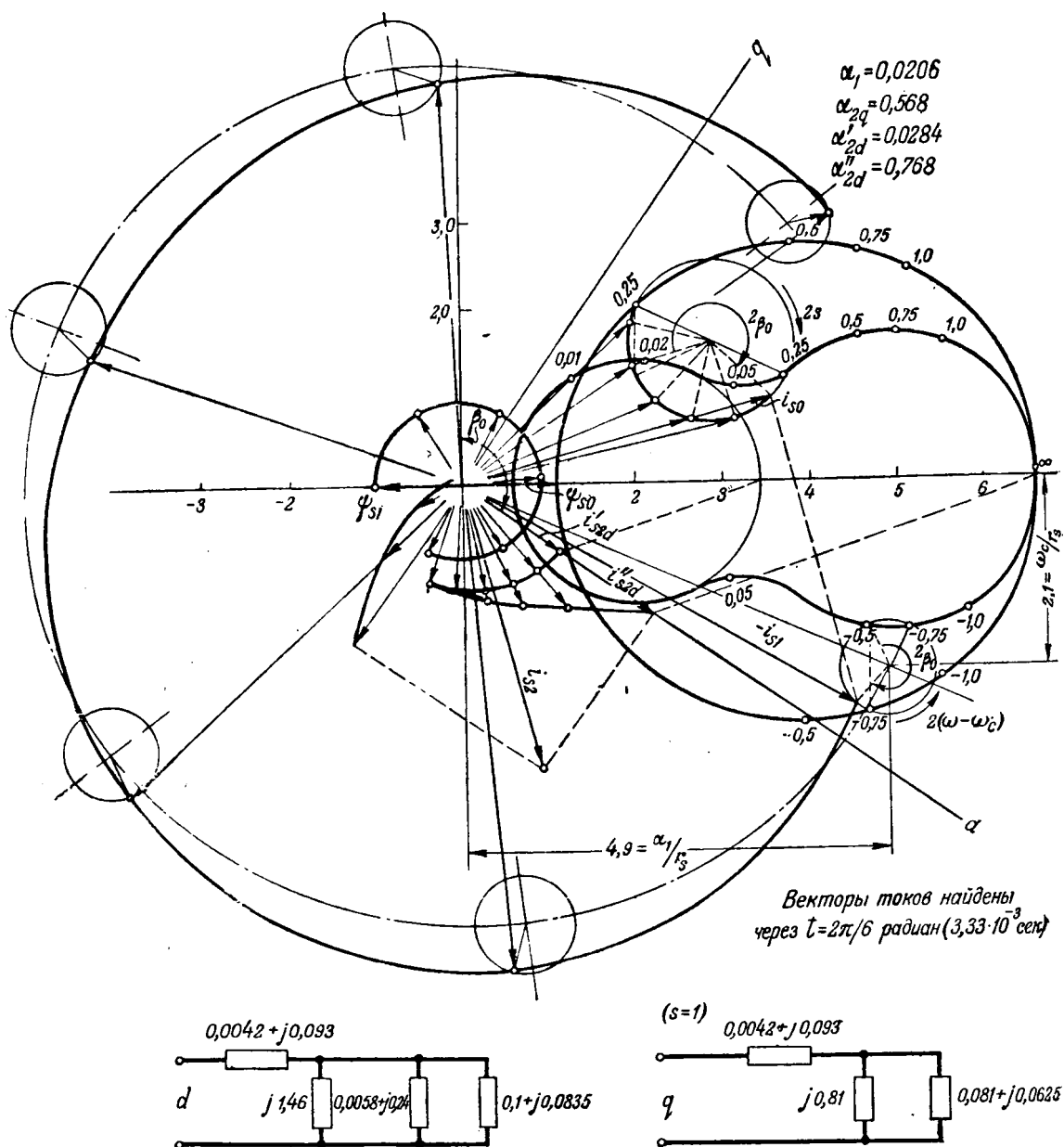


Рис. 2. Изменение токов статора во времени после включения в сеть машины, вращающейся со скольжением $s = 0,25$. Машина имеет обмотку возбуждения и демпферную систему по продольной оси и демпферную систему по поперечной. Параметры машины представлены на эквивалентных схемах, соответствующих установившемуся режиму.

ляется числом цепей в роторе. Все эти токи представляются на векторной диаграмме рис. 1 векторами, сумма которых в момент $t=0$ равна $(i_{s2})_{t=0}$. Векторы эти при асимметричном роторе движутся на диаграмме по часовой стрелке с одинаковой скоростью $\omega_2 = s$. Затухание амплитуд векторов составляющих i_{s2} в общем случае будет равным и определяется величиной активных сопротивлений и рассеянием в отдельных цепях.

При отсутствии демпферной системы вектор i_{s2} затухает по амплитуде с коэффициентом затухания $\alpha_2 \approx \alpha_r$. При наличии демпферной системы ток i_{s2} нужно разложить на составляющие по продольной и поперечной оси i_{s2d} и i_{s2q} , как это представлено на рис. 2. Определение коэффи-

циентов затухания для этих составляющих представлено в приложении III.

Переходные потокосцепления ψ_{s1} в момент $t=0$ равны и противоположны по знаку установившимся потокосцеплениям ψ_{s0} . В дальнейшем, вектор ψ_{s1} вращается на круговой диаграмме по часовой стрелке со скоростью $\omega_1 = 1$ - затухая при этом с коэффициентом затухания α_1 .

Электромагнитный вращающийся момент определяется как векторное произведение вектора тока на вектор потокосцеплений:

$$M = [i_s \cdot \psi_s] = [(i_{s0} + i_{s1} + i_{s2}) \cdot (\psi_{s0} + \psi_{s1})].$$

Для определения составляющих электромагнитного вращающегося момента от данных составляющих тока и потокосцеплений достато-

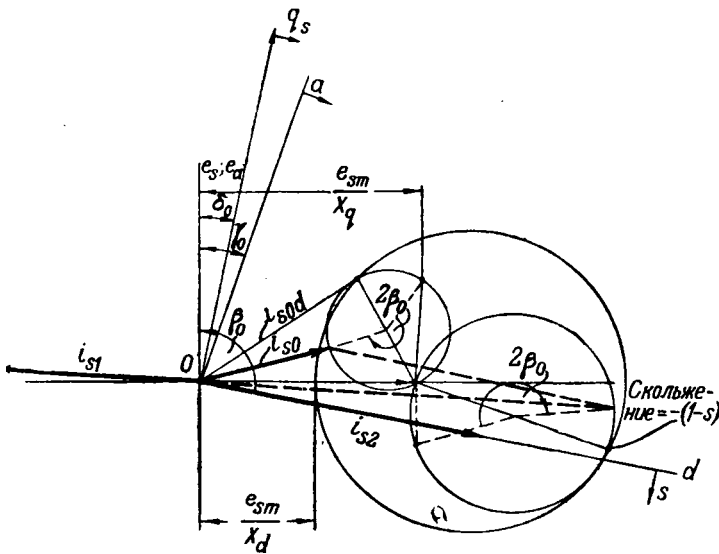


Рис. 3. Токи при отсутствии в роторе замкнутых контуров по поперечной оси.

делить величину перпендикуляра, опущенного из конца вектора данной составляющей тока на направление данной составляющей потокосцеплений, и умножить эту величину на величину составляющей потокосцеплений.

Фазовые напряжения, токи и потокосцепления. Фазовые токи i_a , i_b , i_c и потокосцепления ψ_a , ψ_b , ψ_c в фазах a , b , c определяются как

$$\begin{aligned} i_a &= \operatorname{Re} [i_s e^{j\theta}]; \quad i_b = \operatorname{Re} \left[i_s e^{j(\theta - \frac{2}{3}\pi)} \right]; \\ i_c &= \operatorname{Re} \left[i_s e^{j(\theta - \frac{4}{3}\pi)} \right]; \\ \psi_a &= \operatorname{Re} [\psi_s e^{j\theta}]; \quad \psi_b = \operatorname{Re} \left[\psi_s e^{j(\theta - \frac{2}{3}\pi)} \right]; \\ \psi_c &= \operatorname{Re} \left[\psi_s e^{j(\theta - \frac{4}{3}\pi)} \right], \end{aligned} \quad (27)$$

$$\theta = \omega t + \Theta_0.$$

Учитывая (27), нетрудно видеть, что если в формулах для e_s , i_s и ψ_s заменить аргументы знаком синуса и косинуса, прибавляя к аргументам величину Θ либо $\Theta - \frac{2\pi}{3}$, либо $\Theta - \frac{4\pi}{3}$, получаются соответственные выражения комплексных фазовых напряжений, токов и потокосцеплений в фазовых обмотках a , b и c . Так, например, для определения мгновенных значений токов в фазе a нужно заменить в выражении i_{s0} аргумент $st + \beta_0$ на $st + \beta_0 + \Theta = t + \gamma_0$, в выражении i_{s2} аргумент $st - \omega_1 t + \beta_0$ на $st - \omega_1 t + \beta_0 + \Theta = t + \gamma_0$, в выражении i_{s2} аргумент β_0 на $\beta_0 + \Theta = t + \gamma_0$ и найти реальные составляющие полученных комплексных. Отсюда следует, что если на круговой диаграмме по вертикали отклады-

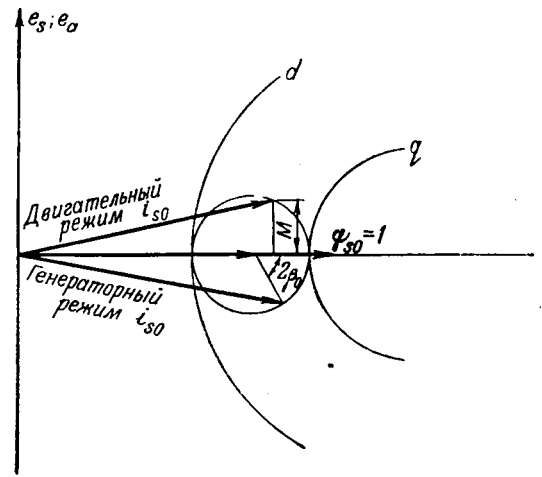


Рис. 4. Круговая диаграмма при синхронной скорости в установившемся режиме.

вать в качестве исходного вектора не e_s , а e_a , то круговая диаграмма, построенная для токов i_s , будет круговой диаграммой для комплексных, соответствующих токам в фазе a .

Для определения мгновенных значений напряжений токов и потокосцеплений в фазах a , b , c достаточно нанести на круговой диаграмме 3 оси времени O_a , O_b и O_c (рис. 3), вращающиеся по часовой стрелке со скоростью, равной единице, и расположенные под углами в $2\pi/3$. В момент $t=0$ ось O_a должна быть расположена по отношению к вертикали под углом γ_0 , соответствующим начальной фазе напряжения в фазовой обмотке a . Мгновенные значения токов, напряжений и потокосцеплений в фазах a , b , c определяются как проекции соответствующих векторов диаграммы на оси O_a , O_b и O_c соответственно.

Таким образом, полученные из круговой диаграммы значения потокосцеплений ψ_s и токов i_s для переходного режима могут быть непосредственно использованы для определения мгновенных значений токов и потокосцеплений в фазовых обмотках.

Процессы при синхронной скорости. При синхронной скорости $s=0$; $x_d(js)=x_d$; $x_q(js)=x_q$. Формулы (9) для токов статора, (12) для потокосцеплений статора соответственно существенно упрощаются.

При приближенном учете активного сопротивления r_s в цепи статора круговая диаграмма в этом случае будет иметь вид, представленный на рис. 4.

В установившемся режиме геометрическое место установившегося тока i_{s0} представляется малым кругом, построенным по изложенной методике. Ввиду того что $s=0$, ток i_{s0} будет занимать постоянное положение, не скользя по малому кругу. Положение радиуса-вектора i_{s0} определится его вертикальной проекцией, численно равной при номинальном напряжении электромагнитному вращающему моменту.

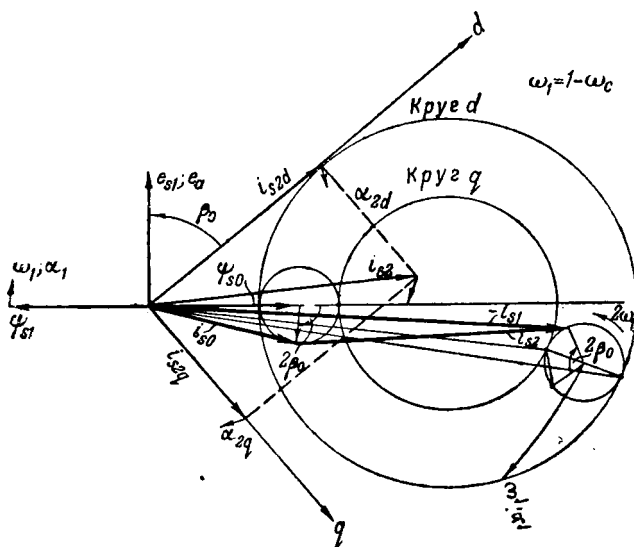


Рис. 5. Переходные токи при включении в сеть для случая $s=0$.

В установившемся режиме при $s=0$

$$\begin{aligned} i_{s0} &= i_{s0x} + \Delta i_{s0} = \frac{r_s - jx_s}{x_d x_q + r_s^2} e_s - \frac{jy_s}{x_d x_q + r_s^2} e_s^* = \\ &= \frac{r_s - jx_s}{x_d x_q + r_s^2} e_s - \frac{jy_s}{x_d x_q + r_s^2} e_s e^{-j2\beta_0}. \end{aligned} \quad (28)$$

Ток в фазе a

$$\begin{aligned} i_a &= i_{ax} + \Delta i_{a0} = \operatorname{Re} \left[\frac{r_s - jx_s}{x_d x_q + r_s^2} e_a \right] - \\ &- \operatorname{Re} \left[\frac{jy_s}{x_d x_q + r_s^2} e_a e^{-j2\beta_0} \right], \end{aligned} \quad (29)$$

где $x_s = \frac{x_d + x_q}{2}$; $y_s = \frac{x_d - x_q}{2}$.

Как видим из векторной диаграммы, реактивный момент определяется углом $2\beta_0$ и пропорционален $\sin 2\beta_0$. В рассматриваемом случае электромагнитный вращающий момент

$$\begin{aligned} M &= - \frac{x_d x_q (x_d - x_q)}{2 [x_d x_q + r_s^2]^2} e_{sm}^2 \sin 2\beta_0 - \\ &- \frac{2r_s y_s^2}{[x_d x_q + r_s^2]^2} e_{sm}^2 - \\ &- \frac{-r_s y_s + e_{sm}^2}{[x_d x_q + r_s^2]^2} [2x_s \cos 2\beta_0 - r_s \sin 2\beta_0]. \end{aligned} \quad (30)$$

Знак минус при реактивном вращающем моменте получился вследствие того, что этот момент при положительном β_0 соответствует случаю генератора, в то время как нами за положительный момент принят электромагнитный вращающий момент двигателя, т. е. случай, когда ось d отстает от оси фазы a при $\gamma_0=0$ на угол больше $\frac{\pi}{2}$.

Переходные токи и вращающие моменты при $s=0$ определяются по круговой диаграмме так же, как и в общем случае. Соответствующая диаграмма представлена на рис. 5.

Переходные режимы. Случай постоянной скорости вращения. Потокосцепления и токи в внезапном коротком замыкании и падении напряжения при неизменной скорости вращения можно определять, пользуясь принципом наложения. Внезапное трехфазное короткое замыкание представится в этом случае как результирование двух режимов: а) установившегося режима, имевшего место до к. з.; б) внезапного включения машины в сеть на напряжение, равное и противоположное напряжению сети, вешемому место в момент к. з. Для каждого из этих режимов потокосцепления и токи находятся независимо. Результирующий электромагнитный момент определится взаимодействием токов всеми потокосцеплениями статора по формуле:

$$M_e = \operatorname{Re} \{ j(\Sigma \psi)(\Sigma i^*) \}.$$

Аналогично рассчитывается переходный режим при падениях напряжения и при несимметричных к. з. машины, включенной в мощную сеть. В последнем случае при несимметричных к. з. пользуясь методом суперпозиции, приходится рассматривать включение машины в сеть, имеющей несимметричные напряжения. Эти напряжения нужно разбить на три системы симметричных напряжений по методу симметричных составляющих, как это представлено в работах [Л. 2], определяя для каждой системы напряжений отдельно токи и потокосцепления.

Зная векторную диаграмму для установившегося режима и для переходного режима включения в сеть, нетрудно построить векторную диаграмму для переходного режима в трехфазном коротком замыкании. Для определения i_{s1} и i_{s2} в момент $t=0$ построение проводится так же, как в случае включения машины в сеть, но величины берутся с обратным знаком. Установившийся ток i_{s0} в этом случае равен нулю.

Общие потокосцепления статора при трехфазном к. з. будут равны ψ_{s1} и представятся в момент $t=0$ единичным горизонтальным вектором. В дальнейшем этот вектор будет на векторной диаграмме вращаться по часовой стрелке со скоростью $\omega_1 = 1 - \omega_c$, затухая с коэффициентом затухания α_1 .

Переменная скорость вращения. Помимо векторной диаграммы могут быть также рассмотрены переходные режимы при переменной скорости вращения. Если скольжение переменное, то для случая относительно малых ускорений что соответствует большинству практических задач, можно пользоваться теми же методами формулами, что и для случая постоянной скорости. В этом случае s и ω становятся переменными параметрами. Установившийся ток определится как конец вектора, скользящего по деформирующейся кривой. Разбивая изменение скольжения на ряд малых участков, строим для каждого скольжения свою окружность и делаем поворот радиуса вектора по окружности, учитывая его скорость вращения, равную $2\pi s$. Это представлено на рис. 6.

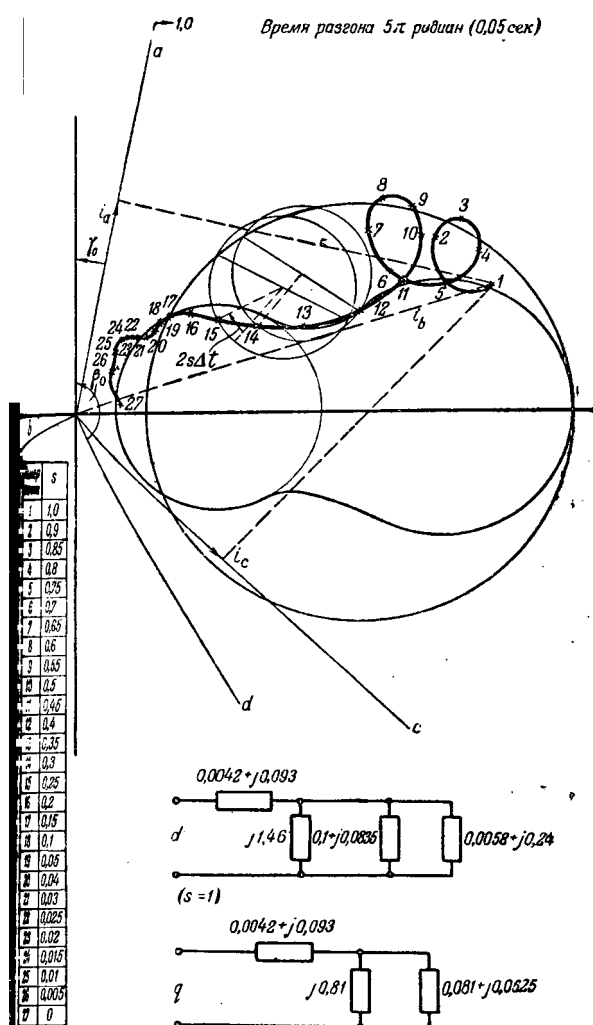


Рис. 6. Установившаяся составляющая тока статора i_{s0} в разгоне двигателя, имеющего асимметрию ротора. Время разгона 5π радиан — 0,05 сек $s = 1,00 - \frac{t}{5\pi}$. (Время разгона рассматриваемой машины под действием номинального вращающего момента порядка 25 сек).

Переходный режим, связанный с внезапным изменением скорости, либо с внезапным изменением приложенного вращающего момента (что эквивалентно изменению скорости по некоторому закону), можно также рассматривать помощью векторной диаграммы. При переходном режиме, связанном изменением скорости, будет иметь место при малом активном сопротивлении в цепи статора только переходный ток i_{s2} . Значения установившегося тока i_{s0} при разных скольжениях известны и определение начального переходного тока, равного разности начального и конечного установившихся токов для взятой разности скольжений, не вызывает затруднений. Этот ток должен быть разложен на свои составляющие по продольной и поперечной осям. Составляющие по продольной оси в свою очередь должны быть разбиты на части, число которых равно числу обмоток данной оси ротора. Все эти составляющие уходят с разными в общем случае коэффициентами затухания и вращаются на векторной

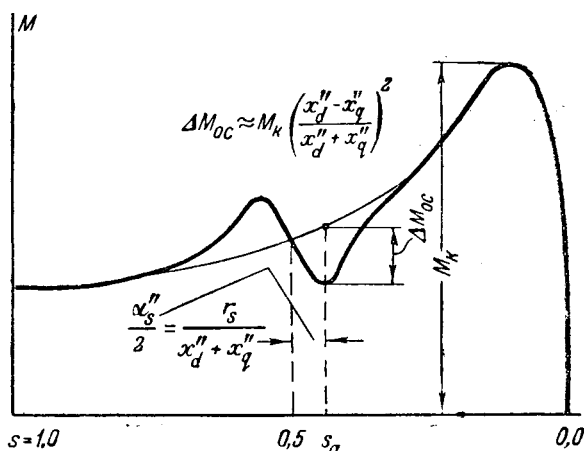


Рис. 7. Зависимость электромагнитного вращающего момента от скольжения с учетом одноосного эффекта.

диаграмме при практически имеющих место соотношениях с одинаковой скоростью, равной s , оставаясь неподвижными по отношению к осям d и q .

Закключение. Переходные режимы асинхронной машины с асимметричным ротором при приближенном учете активного сопротивления в цепи статора могут быть наглядно представлены помощью векторной диаграммы, аналогичной круговой диаграмме асинхронной машины для установившихся процессов. Из этой диаграммы, зная активное сопротивление статора, определяются также коэффициенты затухания и собственные частоты переходных процессов.

Мгновенные величины в фазовых обмотках статора определяются весьма просто, как проекции полученных комплексов на три вращающиеся оси, расположенные под углами в 120° .

Представленные методы рассмотрения пригодны как для случая неизменной скорости вращения, так и для большинства переходных процессов, сопровождающихся изменением скорости, так как механическая инерция машины, как правило, значительно больше ее электромагнитной инерции при замкнутых обмотках.

Приложение 1. Влияние активного сопротивления в цепи статора на одноосный эффект. При скольжении s , близком к половине, величина $\omega - s$ близка к нулю и соизмерима с величиной активного сопротивления в цепи статора r_s даже при весьма малом r_s . Это сказывается в первую очередь на величине установившегося тока $i_{s0} = i_{s0x} + \Delta i_{s0}$, как это видно из формул (10).

Если величина r_s мала, то установившиеся токи

$$i_{s0x} \approx \frac{r_s' - jx_s(js)}{x_s(js) + 2jsr_s'} \frac{e_s}{x_s(js)};$$

$$\Delta i_{s0} = \frac{-jy_s(-js)}{x_s(-js) - 2jsr_s'} \frac{e_s^*}{x_s(-js)}, \quad (31)$$

где

$$r_s' = \frac{r_s}{\omega - s}.$$

Установившиеся потокосцепления

$$\psi_{s0x} \approx \frac{r_s' - jx_s(js)}{x_s(js) + 2jsr_s'} e_s;$$

$$\Delta\phi_{s0} \approx \frac{r'_s y_s (-js)}{x_s (-js) - 2jsr'_s} \frac{e_s^*}{x_s (-js)}. \quad (32)$$

Установившийся момент вращения

$$M = \operatorname{Re} [j(\psi_{s0x} + \Delta\psi_{s0x}) (i_{s0x}^* + \Delta i_{s0x}^*)] = \\ = M_{0cx} + \Delta M_{0c} + M_{0p}, \quad (33)$$

где M_{0cx} и ΔM_{0c} — составляющие среднего установившегося момента, равные

$$\left. \begin{aligned} M_{0cx} &= \operatorname{Re} [j\psi_{s0} i_{s0}^*] = \\ &= e_{sm}^2 \left| \frac{r'_s - jx_s(js)}{x_s(js) + 2jsr'_s} \right|^2 \operatorname{Re} \left[\frac{1}{jx_s(js)} \right], \\ \Delta M_{0c} &= \operatorname{Re} [j\Delta\psi_{s0} \Delta i_{s0}^*] = \\ &= -e_{sm}^2 r'_s \left| \frac{1}{x_s(js) + 2jsr'_s} \frac{y_s(js)}{x_s(js)} \right|^2, \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

а M_{0p} — пульсирующая составляющая момента вращения. Прямыми тонкими скобками здесь обозначены модули комплексных.

Как видно из (34), ΔM_{0c} становится отрицательным при $s < \omega$.

При очень большом r'_s ($s \approx \omega$)

$$M_{0cx} \approx \frac{e_{sm}^2}{4s^2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{jx_s(js)} \right\}; \quad \Delta M_{0c} = 0. \quad (35)$$

Если $x_s(js) = \frac{x_d + x_q}{2} = x_s$ (замкнутые контуры в роторе отсутствуют), то при любом r_s

$$M_{0c} = M_{0cx} + \Delta M_{0c} = \frac{-2e_{sm}^2 r'_s y_s^2}{[x_d x_q + r'_s r_s]^2 + 4s^2 r_s'^2 x_s^2}, \quad (36)$$

где

$$y_s = \frac{x_d - x_q}{2}.$$

Часто требуется оценить величину скольжения s_a , при котором имеет место минимум вращающего момента в районе $\omega \approx 0,5$ и величину минимального вращающего момента при этом скольжении. Скольжение s_a определяется условием $\frac{s_a - \omega_a}{2s_a} \approx \frac{r_s}{x_s(js)}$.

Приближенно

$$s_a = \frac{1}{2(1 - x_s'')}; \quad s_a - \omega_a \approx x_s'', \quad (37)$$

где

$$x_s'' = \frac{r_s}{x_s}; \quad x_s'' = \frac{x_d'' + x_q''}{2}; \quad \omega_a = 1 - s_a.$$

Составляющая среднего вращающего момента M_{0cx} , как видно из (34), (35), мало зависит от асимметрии ротора. Составляющая ΔM_{0c} определяется этой асимметрией и характеризует одноосный эффект.

Максимальный дополнительный момент ΔM_{0c} , вызванный одноосным эффектом, будет иметь место при скольжении $s \approx 0,5 \mp \frac{x_s''}{2} = 0,5 \mp \frac{r_s}{x_d'' + x_q''}$ и будет равен при

ближенно

$$(\Delta M_{0c})_{\max} \approx \frac{e_{sm}^2}{2x_s(js_a)} \left| \frac{y_s(is_a)}{x_s(js_a)} \right|^2 \approx M_k \left(\frac{x_d'' - x_q''}{x_d'' + x_q''} \right)^2, \quad (38)$$

где M_k — максимальный статический электромагнитный вращающий момент.

При желательности более точного расчета в формулы (37), (38) вместо x_d'' и x_q'' подставлять высокие значения реактивностей, соответствующие скольжению $s_a \approx 0,5$. Приближенные значения этих реактивностей можно без труда найти по упрощенным круговым диаграммам. Они равны обратным значениям величин токов статора при скольжении $s = 0,5$ в относительных единицах.

Приложение II. О решении характеристического уравнения $D(p) = 0$. Формула (8). При $r_s = 0$, $D(p) = D_0(p)$ распадается на множители

$$D_0(p) = (p + \alpha_r')(p^2 + \omega^2).$$

Корни этого уравнения: $p_{20} = -\alpha_r'$; $p_{30} = j\omega$; $p_{10} = -j\omega$.

Для получения уточненных корней p_{11} , p_{21} и p_{31} при $r_s \neq 0$ используем метод Ньютона.

Уточненные значения корней выражаются через p_{20} и p_{30} приближенно в виде:

$$p_{n1} = p_{n0} - \frac{D(p_{n0})}{D'(p_{n0})} \quad (n = 1, 2, 3),$$

где

$$D'(p) = \frac{dD(p)}{dp} = 3p^2 + 2(\alpha_r' + \alpha_q + \alpha_d')p + (\omega^2 + \alpha_r'\alpha_q + \alpha_d'\alpha_r + \alpha_d'\alpha_q).$$

Если требуется второе уточнение, то

$$p_{n2} = p_{n1} - \frac{D(p_{n1})}{D'(p_{n1})} \quad (n = 1, 2, 3) \text{ и т. д.}$$

Пользуясь этим правилом, получаем первое приближение p_{20} в виде:

$$p_{21} = p_{20} = -\alpha_r' - \frac{\alpha_d'(\alpha_r' - \alpha_q)(\alpha_r' - \alpha_r)}{\omega^2 + \alpha_r'^2 - \alpha_q\alpha_r' - \alpha_d'(2\alpha_r' - \alpha_r - \alpha_q)}.$$

Корни p_{11} и p_{31} можно представить в виде:

$$p_{31} = -\alpha_{11} + j(\omega - \omega_c); \quad p_{11} = -\alpha_{11} - j(\omega - \omega_c).$$

Нетрудно видеть, что $2\alpha_{11} + \alpha_{21} = \alpha_r' + \alpha_q + \alpha_d'$,

откуда

$$\alpha_{11} = \frac{\alpha_r' + \alpha_q + \alpha_d' - \alpha_{21}}{2}.$$

Имеем также

$$\alpha_{21} [\alpha_{11}^2 + (\omega - \omega_c)^2] = \omega^2 \alpha_r' + \alpha_d' \alpha_q \alpha_r,$$

и, следовательно,

$$\omega_c = \left[1 - \sqrt{\frac{\alpha_r'}{\alpha_{21}}} \left(1 + \frac{\alpha_d' \alpha_q \alpha_r - \alpha_{11}^2 \alpha_{21}}{2\alpha_r' \omega^2} \right) \right] \omega.$$

При произвольном числе цепей в роторе характеристическое уравнение может быть представлено в виде

$$(p^2 + \omega^2) x_d(p) x_q(p) + r_s^2 + 2r_s p x_s(p) = \\ = x_d(p) x_q(p) \left\{ (p^2 + \omega^2) + \frac{r_s^2}{x_d(p) x_q(p)} + \right. \\ \left. + r_s p \left[\frac{1}{x_d(p)} + \frac{1}{x_q(p)} \right] \right\} = 0.$$

Таким образом, характеристическое уравнение может быть представлено:

$$(p^2 + \omega^2) + \frac{r_s^2}{x_d(p) x_q(p)} + r_s p \left[\frac{1}{x_d(p)} + \frac{1}{x_q(p)} \right] = 0; \quad x_d(p) = 0; \quad x_q(p) = 0.$$

Применяя метод Ньютона, имеем в этом случае:

$$D_0(p) = p^2 + \omega^2; \quad \frac{dD_0(p)}{dp} = D'_0(p) \approx 2p;$$

$$p_{10} = -j\omega; \quad p_{30} = j\omega,$$

$$p_{11} = -j\omega - \frac{1}{2p} \left[\frac{r_s^2}{x_d(-j\omega)x_q(-j\omega)} \right] - \frac{r_s}{2} \left[\frac{1}{x_d(-j\omega)} + \frac{1}{x_q(-j\omega)} \right] \approx -j\omega - \alpha_{s\omega}^*, \quad (47)$$

$$\alpha_{s\omega}^* = \frac{r_s}{x_s(-j\omega)}. \quad (48)$$

$$v_{31} \approx j\omega - \alpha_{s\omega}^*. \quad (49)$$

Аналогично

Корень p_{11} будет характеризовать затухание и собственную частоту переходных составляющих, почти неподвижных по отношению к статору, часто называемых симметричными в теории к. з. синхронной машины. Корень p_{31} характеризует затухание и собственную частоту малых переходных составляющих, вызванных асимметрией ротора. Вместо корня p_{21} , определяемого формулой (41), имеем в общем случае несколько корней, связанных в основном с условиями $x_d(p) = 0$ и $x_q(p) = 0$. Число их соответствует числу обмоток в роторе. Приближенный расчет их рассмотрен в приложении III.

Предложенным выражением корня $p_{11} = -j\omega - \alpha_{s\omega}^*$ можно, как правило, пользоваться при скорости вращения $\omega > \omega_s$. При меньших скоростях вращения может оказываться, что корни p_{11} и p_{31} имеют мнимую часть, равную $\mp j\omega$. В этом случае скорость вращения ротора как бы оказывается недостаточной для увлечения затухающих потокоцеплений и тока ϕ_{s1} и i_{s1} , энергетически связанных с обмоткой статора.

При наличии одной обмотки в роторе по продольной оси и отсутствии обмотки ротора по поперечной оси критерием возможности отсутствия увлечения затухающих потокоцеплений ϕ_{s1} , энергетически связанных со статором, является условие

$$\alpha_d^2 + \alpha_r^2 + \alpha_q^2 - \frac{(\alpha_r' + \alpha_d') \alpha_q - (2-3\sigma_d) \alpha_d' \alpha_r'}{3} \leq 0, \quad (50)$$

$$\sigma_d = \frac{x_d}{x_d'}.$$

В рассматриваемом случае при наличии асимметрии ротора затухающие потокоцепления и ток статора ϕ_{s2} и энергетически связанные с ротором, имеют затухание, определяемое реальным коэффициентом p_{21} по формуле (49) и, следовательно, неподвижны по отношению к ротору. Как известно, при симметричном роторе эти переходные составляющие как бы увлекаются неподвижным статором и медленно движутся по отношению к вращающемуся ротору, отставая от него [Л. 3,5]. Отставание прекращается при определенной степени несимметрии.

Исследование соответствующего уравнения четвертой степени показывает, что при практических соотношениях параметров при наличии несимметрии ротора эти составляющие ϕ_{s2} и i_{s2} будут, как правило, неподвижны по отношению к ротору, т. е. действие асимметрии оказывается сильнее тормозящего действия, вызванного наличием активного сопротивления в цепи статора.

Приложение III. Приближенный расчет коэффициентов затухания и собственной частоты ω_c . Коэффициент затухания α_1 для составляющих ϕ_{s1} и i_{s1} , соответствующих волнам потокоцеплений и м. д. с., почти неподвижным по отношению к статору, определяется при малых r_s в виде $\alpha_1 = \text{Re } \alpha_{s\omega}^*$, где

$$\alpha_{s\omega}^* = \frac{r_s}{x_s(-j\omega)}.$$

Собственная скорость ω_c , с которой ϕ_{s1} и i_{s1} вращаются по отношению к неподвижному статору, равна по величине коэффициенту при мнимой части комплекса $\alpha_{s\omega}^*$.

Составляющие α_1 и ω_c комплекса $\alpha_{s\omega}^*$ легко находят-ся из векторной диаграммы, как показано на рис. 1. Для этого достаточно определить координаты центра круга, построенного для определения i_{s1} в момент $t=0$. Если подведенное напряжение в относительных единицах равно единице, то абсцисса центра круга будет равна α_1/r_s , а ордината — величине ω_c/r_s . Таким образом, достаточно умножить величины указанных координатных отрезков, взятых в таком масштабе, при котором $|e_s| = 1$, на r_s , чтобы получить значения α_1 и ω_c для любой скорости вращения ротора (приложение II).

Коэффициенты α'_{2d} и α'_{2q} определяются из условий $x_d(p) = 0$ и $x_q(p) = 0$. При отсутствии демпферной системы в роторе для тока i_{s2d} по продольной оси коэффициент $\alpha'_{2d} = \frac{1}{T_d'}$, где T_d' — постоянная обмотки возбуждения при замкнутой обмотке статора. Ток i_{s2q} в этом случае равно нулю.

При наличии демпферной обмотки может существовать несколько корней уравнений $x_d(p) = 0$ и $x_q(p) = 0$. Эти корни определяются из уравнений $|z'_{rd}| = 0$ и $|z'_{rq}| = 0$, где $|z'_{rd}|$ и $|z'_{rq}|$ — определители, составленные из операторных сопротивлений обмоток ротора по продольной и поперечной оси, вычисленных при замкнутой накоротко обмотке ротора [Л. 1].

Пусть, например, ротор имеет по продольной оси k обмоток. Тогда собственные операторные сопротивления обмоток ротора по продольной оси при разомкнутой обмотке статора $z_{mn} = r_{mn} + p x_{mn}$ ($m = 1, 2 \dots k$) и операторные сопротивления взаимной индукции обмоток ротора по продольной оси $z_{mn} = p x_{mn}$ ($m, n = 1, 2 \dots k$). Соответствующие операторные сопротивления при замкнутой обмотке статора будут:

$$z_{mn} = z_{mn}^* - \frac{x_{dn} x_{md}}{x_d} p \quad (m, n = 1, 2 \dots k),$$

где x_{dn} и x_{md} — реактивности взаимной индукции обмотки статора и обмоток n и m ротора соответственно по продольной оси.

Ток по продольной оси

$$i_{s2d} \approx (i_{s2d})_{t=0} \left[\frac{\{x_d^{(k)}\}}{\{x_d(p)\}} - \frac{1}{x_d} \right], \quad (51)$$

где $x_d^{(k)}$ — сверхпереходная реактивность обмотки статора по продольной оси, равная x_d'' для случая двух обмоток в роторе по продольной оси.

В общем случае операторная реактивность [Л. 1]

$$x_d(p) = x_d \frac{|z'_{mn}|}{|z_{mn}|}. \quad (52)$$

При наличии одной продольной и одной поперечной демпферных обмоток и при обычных соотношениях

$$i_{s2d} = (i_{s2d})_{t=0} \left\{ \left(1 - \frac{x_d''}{x_d'} \right) e^{-\alpha_{2d}'' t} + \frac{x_d''}{x_d'} e^{-\alpha_{2d}' t} \right\} = i_{s2d}'' + i_{s2d}', \quad (53)$$

где

$$\alpha_{2d}'' = \frac{1}{T_d''}; \quad \alpha_{2d}' = \frac{1}{T_d' + T_c'} \approx \frac{1}{T_d'};$$

T_d'' — сверхпереходная постоянная времени и T_d' — переходная постоянная времени, хорошо известные как по-

* В относительных единицах скорость вращения численно равна частоте.

стоянные времени затухания симметричной составляющей тока статора при к. з. синхронной машины. Постоянная

$$T_{d0}'' \approx T_d'' \frac{x_d}{x_d''}.$$

Разложение тока i_{s2d} на составляющие i_{s2d}'' и i_{s2d}' трудно произвести графически, пользуясь круговой диаграммой. Для этого достаточно соединить конец вектора i_{s2} с горизонтальным вектором, равным по величине $\frac{1}{x_d''}$. Если провести параллельную линию из конца горизонтального вектора, равного по величине $\frac{1}{x_d'}$, то она разделит вектор i_{s2} в нужном отношении, как представлено на рис. 2. Концы горизонтальных векторов с длинами $\frac{1}{x_d''}$ и $\frac{1}{x_d'}$ определяются пересечением с осью ординат „круговых“ диаграмм для продольной оси, построенных с учетом и без учета демпферной обмотки.



Выбор числа трансформаторных подстанций

Инж. Е. Н. ПРИКЛОНСКИЙ

Научно-исследовательский институт Министерства химической промышленности

Определение числа подстанций при проектировании производилось методом сравнения различных вариантов. Этот метод сложен и требовал большой затраты времени. В дальнейшем стали пользоваться заранее выведенными формулами, диаграммами или таблицами.

Рассмотрение применявшихся методов дает возможность сделать следующие выводы. 1. Разработанные методы различно подходят к решению вопроса о минимуме эксплуатационных расходов, капитальных затрат, расхода цветного металла. Число подстанций определяется различными величинами: непосредственно цифрой — через длину фидеров, через мощность трансформаторов. 2. Все стремления к учету специфических особенностей каждой установки приводили к неизменному усложнению конечной формулы до такого вида, что ее практическое применение становилось невозможным. 3. Каждый метод базировался на определенных, заранее заданные условия в части схемы распределительной сети, способа передачи тока, типа распределительного устройства и т. д. Для этих очень ограниченных условий, несмотря на некоторые неточности в части выявления характера зависимости стоимости оборудования, они дают решения с достаточной для практики точностью. Однако, эти ограниченные пределы допустимого применения каждой формулы никем не выявлены. Поэтому все они мало приемлемы для использования и дают различные решения, которые к тому же часто могут

Предложен новый математический метод определения числа подстанций. Этот метод обеспечивает учет особенностей каждого района, обслуживаемого подстанцией, и отвечает требованиям снижения капитальных вложений, эксплуатационных расходов и затрат цветного металла. Критически рассмотрены существующие математические методы, базирующиеся на узко определенных условиях.

быть далеки от действительно правильного решения. Этими способами возможно в обобщенной форме учесть всю массу факторов, влияющих на окончательный результат. Необходимо бы-

коренным образом изменить аналитический метод так, чтобы полностью избавиться от массы коэффициентов, обеспечив в месте с тем учет всех специфических особенностей каждой установки, но более простым способом.

При решении данного вопроса необходимо разбить общие расходы на электрическую установку на отдельные составляющие, зависящие от искомого числа подстанций, а именно, — на распределительные сети, трансформаторы, распределительные устройства, питательные сети.

Известно, что расходы на распределительные сети пропорциональны протяженности этой сети и в случае питания каждого распределительного пункта самостоятельной линией средняя длина линии L_{cp} зависит от размеров площади района, обслуживаемого одной подстанцией,

$$L_{cp} = 0,5 k_1 \sqrt{S_0},$$

где S_0 — площадь района, обслуживаемого одной подстанцией, в квадратных метрах;
 k_1 — коэффициент, учитывающий способ трассировки линий питания, смещение по-

Литература

1. Е. Я. Казовский. Большие качания синхронных машин. Сборник „Электросила“, стр. 6, № 1, 1945.
2. Е. Я. Казовский. Обобщенное рассмотрение переходных режимов в асинхронных и синхронных машинах. Сборник „Электросила“, стр. 28, № 2—3, 1945.
3. Е. Я. Казовский. Переходные режимы в асинхронных машинах при включениях и коротких замыканиях. Электричество, стр. 19, № 6, 1947.
4. Дискуссия по [Л. 3]. Электричество, стр. 3, № 10, 1948.
5. Е. Я. Казовский. Переходные процессы в асинхронных машинах при включении и набросе нагрузки. ВЭП, стр. 5, № 2, 1949.
6. Р. А. Лютер. Теория переходных режимов синхронной машины с применением операторного анализа, стр. 1, № 10, 1947.
7. Р. А. Лютер. Моменты вращения синхронной машины в асинхронном режиме. ВЭП, стр. 1, № 10, 1947.
8. А. А. Горев. Явнополюсная синхронная машина с успокоительными обмотками в переходном режиме. ЛПИ, стр. 14, № 2, 1947.

(в. 7. 2)

станции от центра нагрузки и центра площадки, наличие, формы площадки от строго квадратной, неравномерность размещения нагрузок по площадке.

Предположим, что пункты нагрузки в какой-то мере смещены с точками поверхности района подстанции и рассмотрим симметричную четвертую часть общего квадрата площадки $ABCD$ (рис. 1). Предположим, что трасса питания, как это обычно принято, прокладывается в двух взаимно перпендикулярных направлениях, т. е. по оси X и оси Y . Тогда для какой-либо точки m , расположенной на произвольной прямой MN , удаленной на расстояние x и y , имеем длину питательной линии, равную

$$L_1 = y + x.$$

Средняя длина всех питательных линий, проложенных к пунктам нагрузки на прямой MN длиной, равной a , находится интегрированием всех длин и делением результата на общую длину этой прямой

$$L_{cp\ x} = \frac{1}{a} \int_0^a (y + x) dx = y + \frac{a}{2}.$$

Средняя длина питательных линий меняется по мере смещения прямой MN от $y=0$ до $y=a$. Среднее значение длины питательных линий по всей площади $ABCD$ находится повторным интегрированием средних длин по Y и делением результата на длину, равную a ,

$$L_{cp\ xy} = \frac{1}{a} \int_0^a \left(y + \frac{a}{2}\right) dy = a.$$

Площадь, обслуживаемая одной подстанцией, имеет величину $S_0 = (2a)^2$, следовательно,

$$L_{cp\ xy} = 0,5 \sqrt{S_0}.$$

Подобное решение соответствует идеальному случаю. Фактически необходимо введение дополнительного коэффициента k_1 .

Общая площадь объекта при числе подстанций N будет:

$$S = S_0 N.$$

Таким образом, для средней длины питательных линий получаем следующую зависимость:

$$L_{cp} = 0,5 k_1 \sqrt{S} N^{-0,5}.$$

В случае транзитного питания распределительных пунктов имеем неизменность общей длины питательных линий от числа подстанций, следовательно,

$$L_{cp} = 0,5 k_1' \sqrt{S} N^{-1,0}.$$

Стоимость 1 м распределительной сети обычно определяется по формуле

$$A_n = k_2 + k_3 q,$$

где k_2 — постоянная часть стоимости проводки, не зависящая от сечения.

k_3 — переменная зависящая от сечения часть стоимости проводки.

Коэффициенты k_2 и k_3 должны учитывать тип используемого кабеля или линий передачи, напряжение сети, способ прокладки и т. д.

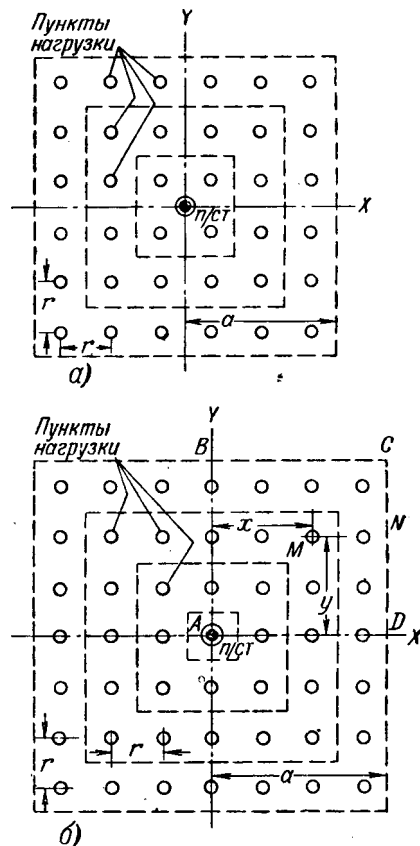


Рис. 1.

Для сечения проводов можем иметь следующую зависимость от средней длины питательных линий

$$q = k_4 L_{cp}^{k_5},$$

где k_4 — постоянный коэффициент;

k_5 — степень зависимости сечения от длины питательной линии.

Степень зависимости сечения от длины может иметь следующие величины:

1. При самостоятельном питании каждого пункта нагрузки непосредственно от подстанции, когда сечение проводов выбирается: а) независимо от потери напряжения $k_5 = 0,0$; б) по потере напряжения $k_5 = 1,0$.

2. При транзитном питании каждого пункта нагрузки, когда сечение проводов выбирается по: а) механическим усилиям (также коронированию или по токам короткого замыкания) $k_5 = 0,0$; б) экономической плотности тока $k_5 = 1,0$; в) нагреву $k_5 = 1,75$ (с точностью $\pm 10\%$); г) потере напряжения $k_5 = 2,0$.

Общее число питательных линий Z в зависимости от схемы питания пропорционально числу подстанций или не зависит от него

$$Z = k_6 N^{k_7},$$

где k_6 — постоянный коэффициент, зависящий от плотности нагрузки, напряжения, величины рассматриваемого объекта и т. д.;

k_7 — степень зависимости, равная 0,0 при самостоятельном питании и 1,0 при транзитном питании пунктов нагрузки.

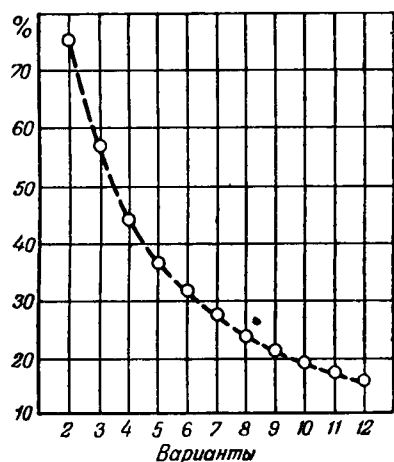


Рис. 2. Разность между числом подстанций двух смежных вариантов, отнесенная к варианту с большим их числом, выраженная в процентах.

На основании изложенного имеем возможность определить общую зависимость расходов на распределительную сеть от числа подстанций. Для этого найдем произведение средней длины питательной линии на их число и на стоимость 1 м сети

$$Q_{p.c} = k_8 N^{-k_{10}} + k_9 N^{-k_{11}},$$

где k_8 и k_9 — постоянные коэффициенты, распределяющие расходы на две составляющие, различно зависящие от искомого числа подстанций;

k_{10} и k_{11} — степени зависимости, величины которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения степеней зависимости составляющих стоимостей распределительной сети от числа подстанций

Способ выбора сечений проводов по:	питание			
	Самостоятельное		Транзитное	
	k_{10}	k_{11}	k_{10}	k_{11}
потере напряжения	0,5	1,0	0,0	2,0
нагреву	0,5	0,5	0,0	1,75
экономической плотности тока	0,5	0,5	0,0	1,0
механическим усилиям	0,5	0,5	0,0	0,0

Полученные итоги показывают многостороннюю зависимость величин расходов на распределительные сети. Практически задача усложняется тем обстоятельством, что выбор сечения проводов и канализации тока зависит от искомого числа подстанций. Обычно решения принимаются различные для каждой из питательных линий. Поэтому следует ориентироваться на какие-то средние зависимости.

Анализ практически возможных вариантов в части выбора числа подстанций показывает, что каждый из них находится на сравнительно далеком расстоянии один от другого. Так, максимально возможное дробление может заключаться в том, что общее число подстанций совпадает с общим числом распределительных пунктов. Второе же решение, а затем и третье должно

исходить из условия, что подстанция питает самый ближайший ряд распределительных пунктов. При идеально-равномерном размещении нагрузок на площадке каждая подстанция в этом случае будет питать 4 или 9, или 16, или 25 и т. д. ряд распределительных пунктов. Такая ступенчатость теоретически возможных решений показана на рис. 2. Практические условия компоновки, а также же размещение зданий и подземных коммуникаций на генеральном плане еще больше ограничивают число возможных вариантов, выявляя необходимость лишь приближенной ориентировки в вопросе целесообразного числа подстанций. В частности, допустима приближенная оценка стоимости распределительной сети. Для этого рекомендуем пользоваться общей стоимостью распределительной сети и средней степенью зависимости от числа подстанций

$$Q_{p.c} = k_{n.c} N^{-k_{12}}.$$

Подобные упрощения обосновываются такими конечными выводами нашей работы, которые показывают, что суммарные расходы на электрической установке при различных, близких к оптимальным, значениях меняются от неточности выбора числа подстанций. Сильное повышение расходов может наблюдаться лишь при значительных удалениях от этих оптимальных решений. Кроме того, табл. 2, дающая величину средних степеней зависимости изменения общих расходов, показывает, что эти степени мало меняются и сохраняют неизменность своих величин для больших диапазонов сечений проводов.

Таблица 2

Значения средних степеней зависимости расходов на распределительные сети от числа подстанций

Схема питания и способ выбора проводов	Среднее сечение проводов в мм ²			
	16	35	70	120
Самостоятельное питание при выборе сечения по:				
потере напряжения	0,67	0,83	0,88	0,91
другим способам	0,50	0,50	0,50	0,50
Транзитное питание при выбо- ре сечения по:				
потере напряжения	0,69	1,26	1,52	1,60
нагреву	0,60	1,10	1,33	1,45
экономической плотности тока	0,34	0,63	0,76	0,83
механическим усилиям . .	0,00	0,00	0,00	0,00

Расходы на трансформаторы в их функциональной зависимости от искомого числа подстанций могут быть определены по формуле

$$A_{mp} = k_{13} P_{mp}^{0.75},$$

где A_{mp} — стоимость трансформаторов с их монтажом и строительной частью;

P_{mp} — мощность трансформатора;

k_{13} — постоянный коэффициент.

Единичная мощность трансформатора, установленного на подстанции, равна:

$$P_{mp} = \frac{P}{Nk_{14}k_{15}},$$

где P — общая мощность нагрузок по объекту;
 k_{14} — коэффициент резерва;
 k_{15} — число трансформаторных единиц.

Следовательно, полные расходы по трансформаторам имеют величину

$$Q_{mp} = k_{mp} N^{0,25},$$

где k_{mp} — постоянный коэффициент, соответствующий стоимости трансформаторов.

Расходы на распределительные устройства подстанций зависят от принятой схемы, типа используемого оборудования, напряжения, токов короткого замыкания и т. д. При постоянстве принятой схемы питания отдельных подстанций расходы на распределительное устройство точно пропорциональны числу этих подстанций и, следовательно, мы имеем простую зависимость

$$Q_{p,y} = k_{p,y} N,$$

где $k_{p,y}$ — коэффициент, учитывающий полную стоимость части распределительного устройства, увеличивающегося с ростом числа подстанций (питательные линии, вводы, трансформаторы напряжения, шиносоединительные линии и собственные нужды).

Расходы на питательную сеть, так же как расходы на распределительную сеть, зависят от принятой схемы электроснабжения и способа выбора сечений проводов. В случае транзитного питания подстанций общая длина и сечение проводов, а следовательно, и стоимость почти не зависят от искомого числа подстанций. При схеме с индивидуальным, самостоятельным питанием каждой подстанции средняя длина питательных линий не зависит от искомого числа подстанций, а число питательных линий пропорционально общему числу подстанций. Поэтому общая длина питательной сети пропорциональна числу подстанций

$$\Sigma L_n = k_{14} N^{1,0}.$$

Характер изменения стоимости питательной сети, которая в большинстве случаев высокочувствительна, аналогичен характеру изменения стоимости низковольтной распределительной сети

$$A_s = k_{15} + k_{16} q \approx k_{17} q^{k_{18}},$$

где k_{18} — средняя степень зависимости стоимости сети питания от сечения, которая при определенных пределах его изменения может считаться постоянной.

Сечение питательных линий может быть независимым от числа подстанций, в том случае, если оно выбирается по токам короткого замыкания, механическим усилиям или коронированию. В случае выбора сечения по экономической плотности тока или по потере напряжения оно обратно пропорционально числу подстанций. Наконец, при выборе сечения по нагреву током характер

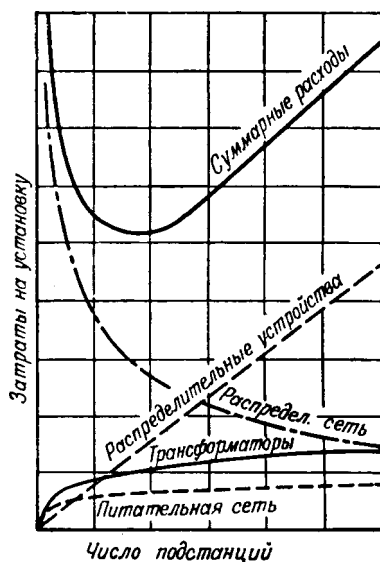


Рис. 3. Зависимость суммарных расходов на установку от отдельных факторов.

его зависимости более сложен. В этом случае приближенно имеем:

$$q = k_{19} N^{-1,75}.$$

Таким образом, стоимость питательной сети равна:

$$Q_{n.c} = k_{n.c} N^{k_{20}},$$

где $k_{n.c}$ — стоимость питательной сети;

k_{20} — степень зависимости стоимости питательной сети от числа подстанций, величины которой приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значение средних степеней зависимости расходов на питательные сети от числа подстанций k_{20}

Схема питания и способ выбора проводов	Среднее сечение проводов в мм²				
	16	35	70	120	185
Самостоятельное питание при выборе сечения по					
нагреву	+0,37	+0,07	-0,11	-0,32	-0,40
механическим усилиям	+1,00	+1,00	+1,00	+1,00	+1,00
остальным способам	+0,64	+0,47	+0,37	+0,25	+0,20
Транзитное питание для всех случаев выбора сечений	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Отсюда получаем суммарные расходы на всю электрическую установку

$$Q = Q_{p.c} + Q_{mp} + Q_{p,y} + Q_{n.c}.$$

Графическое суммирование расходов в зависимости от различного числа подстанций, дано на рис. 3. На основании анализа этого графика устанавливаем следующее:

1. С увеличением числа подстанций сильно растут расходы на распределительные устройства

при незначительном снижении расходов на распределительные сети. Наоборот, при чрезмерном уменьшении числа подстанций сильно растут расходы на распределительные сети при незначительном снижении расходов на распределительные устройства.

2. Кривые суммарных расходов в зоне минимума имеют явно выраженную пологую форму, допускающую с точки зрения капитальных затрат практическое отклонение в решениях от идеального теоретического, без существенного увеличения общей стоимости электрической установки.

Поскольку результирующие расходы имеют один минимум, то для его определения достаточно однократного дифференцирования уравнения суммы расходов по переменной величине — числу подстанций и приравнивание производной к нулю:

$$\frac{dQ}{dN} = -k_{12}k_{p.c}N^{-(k_{12}+1)} + 0,25k_{mp}N^{-0,75} + k_{p.y} + k_{20}k_{n.c}N^{-(k_{20}-1)} = 0.$$

Отсюда легко получить:

$$k_{12}\frac{Q_{p.c}}{N} = 0,25\frac{Q_{mp}}{N} + \frac{Q_{p.y}}{N} + k_{20}\frac{Q_{n.c}}{N}.$$

Как видим, все составляющие расходов после дифференцирования приводятся к расходам по одной подстанции, поэтому математический метод дает большое упрощение, допуская оценку решения для каждой подстанции отдельно, по формуле

$$k_{12}Q_{p.c0} = 0,25Q_{mp0} + Q_{p.y0} + k_{20}Q_{n.c0}.$$

Следовательно, идеально-теоретическое решение, обеспечивающее минимум капитальных затрат, имеет место в том случае, если часть расходов на низковольтную распределительную сеть района данной подстанции равна сумме частей по затратам на установку трансформаторов, распределительное устройство и питательную сеть, приходящуюся на одну подстанцию.

Для произвольного случая, не совпадающего с условием минимума, имеем нарушение равенства расходов, поэтому

$$B_k k_{12}Q_{p.cx} = 0,25Q_{mpx} + Q_{p.yx} + k_{20}Q_{n.cx},$$

где B_k — коэффициент соотношения между расходами, равный:

$$B_k = \frac{0,25Q_{mpx} + Q_{p.yx} + k_{20}Q_{n.cx}}{k_{12}Q_{p.cx}}.$$

Тогда при $B_k = 1,0$ мы имеем условие, обеспечивающее теоретический минимум капитальных затрат. Когда $B_k < 1,0$, мы имеем излишне большой район обслуживания для подстанций, при котором расходы на распределительные сети велики. Наоборот, когда $B_k > 1,0$, мы имеем излишнее дробление подстанций и чрезмерные расходы на распределительные устройства.

Такие выводы дают возможность утверждать, что совершенно нецелесообразно общее определение желательного числа под-

станций, которое рекомендовалось некоторыми авторами старых математических методов. Целесообразно определение каких-то других факторов, связанных лишь с каждой подстанцией отдельно. В качестве наиболее удобного фактора следует считать радиус снабжения района подстанций R .

Поскольку площадь района обслуживания одной подстанцией пропорциональна квадрату этого радиуса, то можно получить:

$$N = k_s R^{-2}.$$

Следовательно, имеем условие минимума зависимости от радиуса обслуживания района подстанции

$$k_{12}k_{p.c.s}R^{2k_{12}} = 0,25k_{mp.s}R_0^{-2,0,25} + 1,0k_{p.y.s}R_0^{-2} + k_{20}k_{n.c.s}R_0^{-2 \cdot k_{20}} \approx k_{21}k_{n/cm.s}R_0^{-2 \cdot k_{21}},$$

где k_{21} — средняя степень зависимости расходов на подстанционное хозяйство от числа подстанций;

$k_{n/cm.s} = k_{mp.s} + k_{p.y.s} + k_{n.c.s}$ — общие затраты подстанционное хозяйство, зависящие от радиуса обслуживания.

При принятом решении, не обеспечивающем минимум капитальных затрат, имеем:

$$k_{12}k_{p.c.s}R_x^{2k_{12}}B_k \approx k_{21} \cdot k_{n/cm.s}R^{-2 \cdot k_{21}}.$$

Тогда после деления левой и правой частей обоих последних уравнений получим:

$$B_k \left(\frac{R_x}{R_0}\right)^{2 \cdot k_{12}} = \left(\frac{R_x}{R_0}\right)^{-2 \cdot k_{21}}.$$

Отсюда имеем решение

$$R_0 = R_x \sqrt[k_{22}]{B_k},$$

где $k_{22} = 2 \cdot (k_{12} + k_{21})$ — величина корня, приведенная в табл. 4.

Данный математический анализ показывает, что достаточно иметь одно проектно намеченное решение (или аналогичный объект) в части выбора числа подстанций, по которому можно было бы сразу для каждой подстанции выявить правильность решения данного вопроса и найти другое, более удачное, при котором обеспечивался бы минимум капитальных затрат.

Анализ условий, обеспечивающих минимум эксплуатационных расходов, показывает, что в данном отношении получаем аналогичные зависимости от соотношения расходов по подстанциям и по распределительной сети, но лишь выраженных в годовых расходах. При этом годовые расходы окажутся равными сумме следующих составляющих.

1. Ежегодные отчисления на ремонт и амортизацию.
2. Потери электроэнергии в распределительной сети.
3. Обслуживание подстанций и сетей.
4. Потери электроэнергии в трансформаторах и ошиновке распределительного устройства в пе-

Таблица 4

Значения корня от соотношения расходов на подстанционное хозяйство и распределительные сети при определении радиуса для района обслуживания подстанции, обеспечивающего минимум капитальных затрат k_{23}

Схема питания и способ выбора проводов	Среднее сечение проводов в мм ²				
	16	35	70	120	185
Самостоятельное питание при выборе сечения по:					
потере напряжения от . .	3,34	3,66	3,76	3,82	3,86
до . .	2,70	2,80	2,89	2,97	2,88
нагреву от . .	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
до . .	2,23	1,93	1,90	1,82	1,80
экономической плотности тока					
от . .	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
до . .	2,37	2,23	2,22	2,13	2,01
механическим усилениям					
от . .	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
до . .	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
Транзитное питание при выборе сечения по:					
потере напряжения от . .	3,38	4,52	5,04	5,32	5,48
до . .	2,10	3,18	3,58	4,10	4,22
нагреву от . .	3,20	4,40	4,66	4,90	5,06
до . .	1,93	2,90	3,20	3,70	3,90
экономической плотности тока					
от . .	2,68	3,26	3,52	3,66	3,72
до . .	1,50	2,04	2,24	2,50	2,60
механическим усилениям					
от . .	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
до . .	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90

их защиты и измерения, в цепях сигнализации освещения, а также в питательной сети.

Все эти расходы приблизительно можно считать пропорциональными капитальным затратам. Следовательно, в итоге имеем для них ту же степень зависимости, что и для составляющих капитальных затрат:

$$B_g = \frac{P_{n,cm} Q_{n,cm}}{P_{p,c} Q_{p,c}} = k_{23} B_k,$$

где $P_{n,cm}$ — ежегодные отчисления с капитальных затрат по подстанции на ремонт, амортизацию, обслуживание и на потери электроэнергии;

$P_{p,c}$ — то же, но для распределительной сети.

Практические условия показывают, что коэффициент k_{23} может иметь величины:

1. Для трансформаторных подстанций от 0,3 до 3,0.
2. Для распределительных подстанций от 1,6 до 6,5.

Учет требований обеспечения минимума расхода цветного металла показывает, что и они сохраняют пропорциональность составляющим капитальных затрат, следовательно,

$$B_m = \frac{k_{m,n/cm} Q_{n,cm}}{k_{m,p,c} Q_{p,c}} = k_{24} B_k,$$

где $k_{m,n/cm}$ — доля расхода меди в капитальных затратах на подстанцию;

$k_{m,p,c}$ — доля расхода меди в капитальных затратах на распределительную сеть.

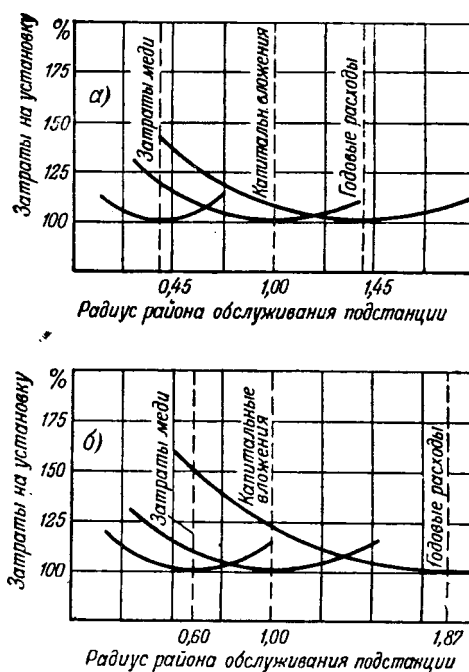


Рис. 4. Затраты на установку.
а — трансформаторных и б — распределительных подстанций.

Практически всегда коэффициент k_{24} меньше единицы. Объясняется это тем, что основная масса меди приходится на распределительные сети. Расходы меди в распределительном устройстве, трансформаторах и высоковольтной питательной сети относительно малы. Обычно величина коэффициента k_{24} может доходить до 0,1 для трансформаторных подстанций и до 0,2 для распределительных.

На основании вышеизложенного легко находим по минимуму капитальных затрат условие минимума эксплуатационных расходов и условие минимума расхода цветного металла для трансформаторных подстанций

$$L_g = (0,67 \div 1,45) L_k,$$

$$L_m = \text{до } 0,45 L_k.$$

Соответственно для распределительных подстанций

$$L_g = (0,85 \div 1,87) L_k,$$

$$L_m = \text{до } 0,60 L_k.$$

Если графически изобразить зависимость капитальных затрат, эксплуатационных расходов и затраты меди от числа подстанций, то получим график рис. 4. Эти графические данные показывают, что капитальные затраты могут рассматриваться как средние для различных практически возможных случаев. Далее следует, что были ошибочны все те ранее существующие методы определения числа подстанций, которые исходили из односторонней ориентировки на обеспечение минимума расхода меди или минимума эксплуатационных расходов. Первые случаи могут приводить к неоправданному удвоению эксплуатационных расходов и даже к существенному увеличению капитальных затрат, а вторые к удвоению затрат меди на установку.

Наконец, рассмотрение кривых показывает, что невозможно одновременное обеспечение теоретического минимума для затрат меди, капитальных вложений и эксплуатационных расходов. Однако, вполне возможно обеспечение приближенного минимума для всех этих величин. При этом следует ориентироваться на среднюю кривую, обеспечивающую минимум капитальных затрат, так как при этом лучше обеспечивается приближенный минимум для эксплуатационных расходов и для затрат меди. В этом случае обеспечивается точность минимума капитальных затрат в пределах 7%, а для эксплуатационных расходов и затрат меди обеспечивается точность в пределах 20%.

Следовательно, необходимо стремиться к таким решениям, чтобы B_k было равным 1,0 (или в пределах 0,75—1,25) для распределительных подстанций и равным 2,0 (или в пределах 1,5—2,5) для трансформаторных подстанций.

Пример. По намеченному варианту размещения подстанций для одного участка приходится подстанция с 14 питательными линиями. Распределительная сеть состоит из кабелей разных сечений на общую сумму $Q_{p.c0} = 40\,000$ руб.

На подстанции намечена установка двух трансформаторов. Стоимость их установки равна:

$$Q_{mp0} = 85\,000 \text{ руб.}$$

При оценке величины капитальных затрат на распределительное устройство следует учитывать лишь ту ее часть, которая изменяется в соответствии с ростом числа данных подстанций. Следует учитывать расходы на все ячейки масляных выключателей питательных линий, вводные камеры, шинносоединительные устройства, камеры трансформаторов напряжения и собственные нужды. Остальные отходящие питательные линии к соседним подстанциям или к высоковольтным электродвигателям учитывать не следует, так как эти капитальные затраты при изменении числа трансформаторных подстанций не изменяются.

В данном случае распределительное устройство выполнено по простой схеме «блок-питательная линия-трансформатор» с двумя ячейками масляных выключателей с вводными разъединителями стоимостью

$$Q_{p.y0} = 36\,000 \text{ руб.}$$

Питательная сеть состоит из двух кабелей сечением по $3 \times 50 \text{ мм}^2$, контрольного кабеля для газовой защиты и сигнализации стоимостью

$$Q_{n.c0} = 20\,000 \text{ руб.}$$

Поскольку сечение высоковольтного питательного кабеля принято по токам короткого замыкания, то при схеме самостоятельного питания отдельных подстанций из табл. 3 имеем:

$$k_{20} = 1,0.$$

Соответственно при самостоятельном питании низковольтных распределительных щитовых сборок и при выборе сечения по нагреву током нагрузки из табл. 2 имеем

$$k_{12} = 0,5.$$

Следовательно, для соотношения расходов получим:

$$B_k = \frac{0,25 \cdot 85\,000 + 36\,000 + 1,0 \cdot 20\,000}{0,5 \cdot 40\,000} = 3,85.$$

Для оптимального решения в части выбора числа трансформаторных подстанций желательно иметь данное соотношение расходов равным 2,0, поэтому согласно табл. 4

требуется увеличение радиуса снабжения района подстанций примерно на $24 \div 40\%$

$$R_x = R_0 \sqrt[3+1,9]{\frac{3,85}{2,00}} = (1,24 \div 1,40) R_0.$$

Анализ практических условий показывает, что в случае укрупнения подстанций ближайший вариант для увеличения радиуса обслуживания на 80%, поэтому мы сохраняем принятое решение, тем более что в дальнейшем намечается некоторое увеличение нагрузок на подстанцию, при котором мы ближе подойдем к оптимальному решению.

Практика использования нового метода показывает его удобство, простоту и ясность. Даваемые новой формулой итоги внушают полную уверенность в правильности решения задачи. Формула учитывает влияние всех специфических особенностей каждого района подстанции самым простым наглядным способом, связанным с конкретным подсчетом ориентировочных величин составляющих капитальные затраты, на отдельные элементы электрической установки.

Новый способ, позволяющий учитывать особенности каждой установки, применим не только для определения числа подстанций для городских условий, но также и для фабрично-заводских. По этому методу допустимо определение не только числа трансформаторных, но и распределительных подстанций. Вполне допустимо использование его для определения числа силовых и осветительных распределительных пунктов в цехах.

С теми или иными коррективами методология данного способа может быть использована для разработки теории определения числа преобразовательных или районных понизительных подстанций. Далее, новая формула допускает такое определение числа подстанций для тех случаев, когда в районе используется несколько систем распределительных напряжений (например, 380/220 в для электрического освещения и 500 в для силовой нагрузки). В этом случае достаточно лишь суммирование расходов на распределительное и трансформаторное устройство и сопоставление его с расходами на силовые и осветительные распределительные сети. Существующие способы не давали в этом отношении решения вопроса.

Наконец, формула может быть использована не только для проверки готовых технических решений, но также для начальной стадии проектирования. В последнем случае необходимо ориентироваться либо на предыдущие решения, либо на предварительные прикидки.

Данный метод указывает, что даже общесметные данные по объекту могут служить характеристикой правильности выбора числа подстанций. Необходимо, чтобы суммарные расходы по подстанциям были примерно равными двойным величинам расходов на кабельные сети электроснабжению. В противном случае решение вопроса выбора числа подстанций неудачно.

Блочная передача электрической энергии

Кандидат техн. наук, доц. Н. Н. КРАЧКОВСКИЙ

Гидроэнергoproject

Сооружение по пяти-летнему плану ряда весьма крупных тепловых и гидроэлектрических станций связано с передачей мощностей порядка 100—300 тыс. кВт на расстояние 250—400 км.

В ближайшем будущем предстоит передача еще больших мощностей на 500—1 000 км. Сооружение мощных и длинных электропередач требует затраты весьма крупных средств и большого количества оборудования. В некоторых случаях экономические показатели электропередачи могут иметь решающее значение для определения целесообразности строительства сверхмощной электростанции. Предвоенный опыт проектирования передачи 800 тыс. кВт на расстояние 900 км действительно выявил ряд трудных и серьезных технических задач, возникающих при этом. Тогда открылись два пути решения вопроса. В первом варианте намечалась так называемая связанная передача, т. е. параллельная работа всех генераторов на отправном конце и параллельная работа всех линий и трансформаторов на приемном кольце при напряжении 380—400 кв. Во втором варианте предполагалась блочная передача, а именно раздельная работа мощных генераторов на отдельные линии электропередачи при напряжении порядка 350 кв, связанные на приемном конце в блок с понижающими трансформаторами, присоединенными к отдельным линиям сети 110 кв.

Сооружение мощных и протяженных линий электропередачи требует освещения вопроса о передаче энергии трехфазным переменным током и выяснения, какое практическое распространение, в частности за рубежом, получила блочная передача энергии, проблема которой, как вполне реальная конкретная задача, была впервые поставлена в СССР в 1936 г. в применении сверхмощной и сверхдальней электропередаче. Схемы передачи электрической энергии и их характеристики. В отличие от связанной передачи характерным свойством блочной передачи является то, что практически исключается взаимное влияние друг на друга отдельных блочных линий при аварии на любом из

Рассматриваются две основные схемы передачи электрической энергии: связанная и блочная. Даются наиболее существенные их характеристики и анализируется их поведение в аварийных режимах. Приводятся некоторые данные о работе связанных и блочных передач. Рассматриваются преимущества блочных передач перед связанными и целесообразность их применения, в частности, для сверхдальних электропередач с напряжением порядка 400 кв.

звеньев блока, в частности, на самой линии электропередачи. Таким образом, отсутствует проблема динамической устойчивости для самой линии, однако она полностью сохраняется при ава-

риях в приемной сети. Что касается статической устойчивости, то эта проблема одинакова для обоих видов передач.

При аварии на блочной линии под действием релейной защиты происходит выпадение блока целиком, а следовательно, и его генераторной мощности. Если этот блок составляет большую долю мощности системы, произойдет очень глубокая посадка частоты, чрезмерная перегрузка генераторов и их торможение, выпадение и отключение большого числа потребителей и в конце концов распад системы. Поэтому максимальная мощность, передаваемая блоком, должна быть координирована с мощностью системы.

Практика эксплуатации линии электропередачи, работавшей как блочная и передававшей до 120 тыс. кВт на 240 км, показала, что в тех случаях, когда передаваемая по линии мощность составляла до 17% нагрузки системы, распада последней не происходило. В большинстве случаев дефицит мощности, образовавшийся при выпадении линии, компенсировался за счет естественного снижения активной нагрузки потребителей из-за понижения частоты и за счет увеличения мощности других станций системы; часть же нагрузки отключалась, повидимому, от действия нулевой защиты вследствие толчка, имевшего место при выпадении линии. Благоприятное влияние на ускорение процесса ликвидации аварии оказывала пиковая гидростанция, очень быстро набиравшая нагрузку. В момент грозových аварий нагрузка линии нередко достигала 50—85 тыс. кВт при общей нагрузке системы в 300—400 тыс. кВт. Обратное включение линии электропередачи и набор нагрузки гидростанцией не были вообще длительными и в ряде случаев не превышали 2—3 мин.; автоматической синхронизации на станции и аппаратуры повторного включения на линии не имелось. Таким об-

разом, можно констатировать, что система относительно благополучно справлялась с авариями на линии электропередачи, несмотря на недостаточность резерва мощности и отсутствие специальных автоматических устройств разгрузки по частоте, применение которых в наших системах оказалось вполне благоприятным.

При аварии в режиме короткого замыкания генераторы передающей станции почти всегда разгружаются от активной мощности и вследствие этого ускоряются, тогда как генераторы приемной системы воспринимают дополнительную нагрузку, а потому тормозятся.

В результате генераторы отправного конца начинают опережать по фазе генераторы остальной части системы и при затяжном коротком замыкании могут выйти из синхронизма. Применение быстродействующей релейной защиты и выключателей является основным методом повышения устойчивости связанных передач.

Отключение одной из параллельных линий значительно снижает пропускную способность электропередачи, вследствие чего в послеаварийном режиме происходит посадка напряжения в районе приемной подстанции и некоторое снижение потребляемой мощности. Так как в течение рассматриваемого весьма короткого периода регуляторы гидротурбины не успевают подействовать и гидрогенераторы продолжают развивать ту же активную мощность, что и до момента аварии, то имеет место избыток генерации над потреблением и качания одних генераторов по отношению к другим. В некоторых случаях при значительном избытке генерации над потреблением простым средством сохранения устойчивости является отключение части генераторов передающей станции, что будет компенсировать снижение нагрузки и автоматически приведет к равновесию генерацию и потребление, что и устранит расхождение фаз.

Опыт работы американской гидроэлектростанции Боулдер-дэм показывает, что при связанной передаче возможны случаи одновременного отключения обеих параллельных цепей. Так, электропередача, идущая на Лос-Анжелос, длиной около 400 км имела две параллельные цепи и передавала суммарную мощность до 300 тыс. кВт при напряжении 287 в. Линия была оборудована двумя переключательными постами и новейшей быстродействующей релейной защитой. За первые два года было 5 случаев одновременного выпадения обеих цепей; один — из-за аварии мачты, остальные по вине релейной защиты. Сбросы нагрузки составляли до 200—230 тыс. кВт.

При связанной передаче следует считаться с возможностью выпадения обеих параллельных цепей, и следовательно, необходимо иметь в приемной системе соответствующий резерв мощности, значительно больший, чем при блочной передаче. Если такой резерв отсутствует, то при наличии неблагоприятных условий возможен полный распад системы.

Результаты эксплуатации вышеуказанной связанной передачи интересно сопоставить с ре-

зультатами эксплуатации блочной линии передачи 220 кВ от той же гидроэлектростанции Боулдер-дэм подстанции Чайна и Берр [Л. 1, 2]. Эта линия введена в работу в 1939 г. и сооружена как одна цепная вследствие наличия резерва в приемной сети. Общая длина линии также около 400 км, по ней передавалось до 165 тыс. кВт (по открытому концу), что составляет около 90% от статического предела мощности, равного 180 тыс. кВт. Практика эксплуатации показала, что короткие замыкания в приемной сети 66 кВ могут привести генераторы станции к выпадению из синхронизма. Во избежание этого сеть 66 кВ была секционирована в некоторых пунктах так, что часть нагрузки обеих приемных подстанций отключалась от общей сети при опасных с точки зрения устойчивости авариях (помощью реагирующего на качания) и питались от другой гидроэлектростанции. В начальный период работы (около 7 мес.) в двух случаях гидроэлектростанция была отключена от остальной системы и работала на выделенную часть, причем обратное включение после предварительной синхронизации было произведено в течение 1 мин.

Эти данные показывают, что сама по себе блочная линия обеспечивает высокую надежность передачи, но во избежание распада системы при авариях в сети приемная сеть должна быть подготовлена и реконструирована соответствующим образом.

Блочная передача обладает еще следующими преимуществами перед связанной: а) значительно меньшая мощность короткого замыкания, следовательно, более слабое воздействие на систему; б) облегченные требования к выключателям; в) более простое и дешевое регулирование напряжения и отсутствие необходимости в установке специальных «аварийных» синхронных компенсаторов; г) существенное уменьшение количества выключателей и возможность даже полного отказа от их установки; последнее уже нашло практическое применение на ряде электропередач; д) повышение удельной нагрузки линии, что значительно повышает экономичность электропередачи.

Эти факторы технического и экономического характера явились стимулом к внедрению блочной передачи энергии, причем интересно отметить, что блочные схемы передачи были применены не только на новых линиях (например, трех гидроэлектростанций на р. Скэджит мощностью 240, 240 и 360 тыс. кВт осуществлена передача в г. Снетль на 200 км по 6 блочным 220-кВ линиям), но некоторые существующие электропередачи были переведены со связанной на блочную работу, а именно: Повертон—Чикаго — три блочных цепи — 132 кВ, 320 км, 3×50 тыс. кВт; Кониовинго—Плимут — две 220-кВ линии длиной по 93 км, передающие суммарно 252 тыс. кВт [Л. 3].

В СССР некоторые линии 110—220 кВ были запроектированы как двухцепные, но вследствие сооружения в первую очередь лишь одной цепи они ряд лет работали, а некоторые и сейчас продолжают работать, как блочные.

Область применения и перспективы развития блочных электропередач. Из сказанного ранее следует, что блочные линии вполне применимы для передачи энергии в систему, обладающую достаточным резервом мощности.

Мощность агрегатов тепловых конденсационных станций достигает в настоящее время 50—100 тыс. кВт (намечается повышение до 150 тыс. кВт), а гидроагрегатов 72 тыс. кВт. В соответствии с этим величина резерва в системе во всяком случае должна быть не менее 30—100 тыс. кВт. Известный резерв создается тем потому, что тепловые станции должны работать на своей экономической мощности, равной в среднем 85% от номинальной.

С указанными выше величинами должна быть сопоставлена пропускная способность линий электропередачи. Их пропускную способность удобно оценивать на базе натуральной мощности линии в функции от ее протяженности.

Как известно, натуральные мощности линии пропорциональны ее длине:

Напряжение, кВ	110	154	220	310	430
Мощность, тыс. кВт	30	60	120	240	400

Как показано в одной из работ автора [Л. 4], в зависимости от длины линии могут быть назначены переданы следующие мощности в долях натуральной:

Протяженность, км	100	150	200	300	400	500
Передаваемая мощность в долях натуральной мощности	2	1,75	1,5	1,25	1,0	0,8

Из этих данных, а также исходя из приведенных выше величины допустимого соотношения между мощностью блока и мощностью системы (25%), можно сделать вывод, что уже и сейчас ряд энергосистем, имеющих мощность свыше 500 тыс. кВт, применимы блочные передачи, вплоть до напряжения 220 кВ. Линии с напряжением свыше 220 кВ могут быть в самое ближайшее время применены для двух-трех наших наиболее мощных энергосистем.

С точки зрения экономики во всех случаях, когда нет надобности в резервировании, всегда выгоднее применять одну цепь соответствующего напряжения, чем две цепи более низкого напряжения. Следовательно, в таких случаях работа блока вытекает из требований экономики. Некоторые наши мощные электропередачи, как в настоящее время работают именно так. В тех случаях, когда с точки зрения пропускной способности необходимо сооружение двух цепей, то до сего времени обычно стремятся работать по связанной схеме по тем соображениям, что при выпадении одной из линий не остается связанная с ней генераторная мощность. Однако это может быть обеспечено и при работе линий блоками. Дело в том, что в большинстве случаев аварии на линии передачи

имеют кратковременный характер (обычно грозового происхождения), при наличии же пофазного устройства повторного включения (АПВ) или компенсирующей катушки и трехфазного АПВ перерыва либо совсем не происходит, либо имеет место очень кратковременный перерыв на время действия АПВ, причем потребители практически могут даже не почувствовать, что имела место авария.

Если авария имеет устойчивый характер и поврежденная линия длительно выводится из работы, то можно избежать потери генераторной мощности, если генераторы и трансформаторы выпавшей линии подключить к здоровой. Это может быть достигнуто, применяя, например, схему *Н* (мостика) с нормально разомкнутым выключателем в перемычке, включая его после отключения линейных выключателей. В результате, получаем обычную схему связанной передачи. Время подключения генераторов выпавшего блока к здоровому с учетом предварительной синхронизации требует приблизительно около 1 мин.

Применяя указанный способ подключения для двух блочных линий, необходимо, однако, проверить допустимость подключения генераторов выпавшего блока к здоровому с точки зрения устойчивости. При линиях не очень большой длины и не сильно нагруженных, т. е. там, где имеется значительный запас по устойчивости, такое подключение вполне допустимо. Для длинных же, сильно нагруженных линий подключение всех генераторов выпавшего блока к здоровому оказывается невозможным.

Как показали расчеты, произведенные в свое время автором для электропередачи длиной 900 км, путем подключения генераторов и повышающего трансформатора можно повысить передаваемую мощность приблизительно на 17%, а при подключении понижающих трансформаторов — на 25%. Это справедливо при сохранении того же запаса устойчивости, как в нормальном режиме, если же пойти на временное его снижение, то передаваемую мощность можно повысить приблизительно на 35—40% по сравнению с мощностью, нормально передаваемой по одной цепи. При более коротких линиях, где относительное влияние реактивности генераторов и трансформаторов больше, возможно еще большее повышение передаваемой мощности.

Само собой разумеется, что вышеуказанное условие сохраняется в полной мере и для связанной передачи.

Ранее было отмечено, что для длинных, сильно нагруженных линий необходимо отключение части генераторов при аварийном выпадении одной из параллельных линий. На основании изложенного можно сделать определенное заключение, что при наличии двух блочных линий, применяя соответствующую, автоматически действующую схему связи между ними, вполне возможно сохранить значительную часть генераторной мощности, следовательно, в этом отношении связанная передача по сравнению с блочной никаких преимуществ не имеет.

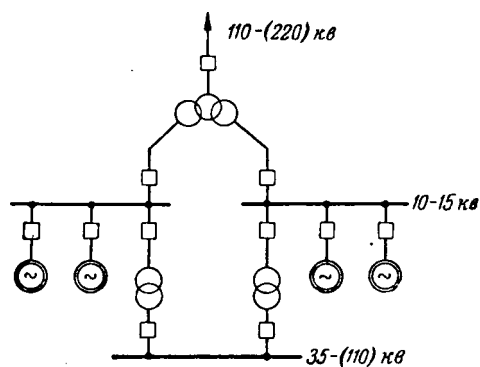


Рис. 1.

В рассмотренном выше случае предполагалась передача в систему всей мощности станции. Однако бывает, что часть мощности станции потребляется в местном районе либо на генераторном напряжении, либо на напряжении более низком, чем напряжение линий дальней передачи. В этом случае для гидростанций при одной блочной линии может быть применена схема по рис. 1, а при двух линиях — по рис. 2.

Таким образом, и в тех случаях, когда имеется отбор мощности для местного района, также могут быть применены блочные линии передачи при наличии на станции соответствующей схемы соединений.

Рассмотрим теперь, в какой мере может быть применен принцип блочной передачи для крупной электрической системы. Некоторые наши энергосистемы отличаются сосредоточением большей части нагрузки в центре системы на относительно небольшой площади. Эта центральная часть опоясывается полукольцом или кольцом 110 кВ, одиночным или двойным, а также полукольцом 220 кВ, а в перспективе и кольцом 220 кВ. Внутри этого кольца имеются тепловые станции средней и крупной мощности, на которых частично сосредоточен общий резерв мощности системы. Извне на это кольцо работают более или менее удаленные мощные тэс и гэс на напряжениях 110—220 кВ. Рост нагрузки системы требует, с одной стороны, сооружения тэс в центре системы, а с другой стороны, передачи энергии в центр системы от удаленных тэс и гэс. Передачу мощности этих станций в центр системы можно осуществить как по связанной, так и блочной схеме. Как указывалось выше, по экономическим соображениям следует стремиться применять одну цепь, подбирая наиболее оптимальное напряжение линии. При полном блоке, т. е. когда в него входят все элементы вплоть до понижающего трансформатора, можно применить для линии любое напряжение независимо от имеющихся в системе. Введение такого напряжения в пределах блока не нарушает стройности электрической системы, но оно, конечно, должно быть экономически оправдано.

Для станций, передачу мощности которых в систему целесообразно или необходимо производить по двум цепям, следует применять схему, которая дает возможность работать как по блочной, так и связанной схеме (например Н). Суще-

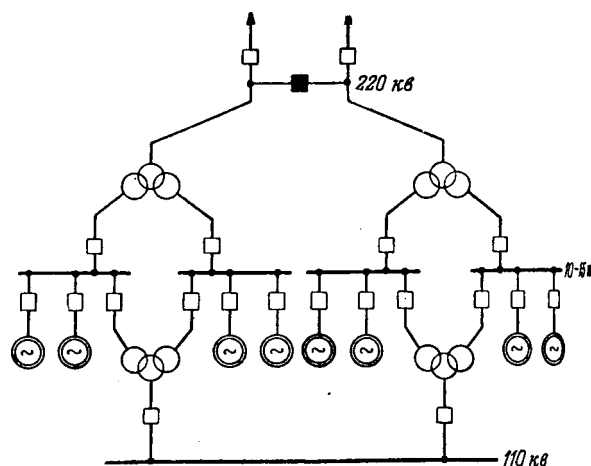


Рис. 2.

ствующие электропередачи также целесообразно по возможности, перевести на блочную работу, что не составит, по видимому, особых затруднений, так как на повышающих подстанциях, как правило, имеются двойные системы шин, что и позволяет осуществить раздельную работу линий¹.

В заключение остановимся на вопросе о применении в наших энергосистемах напряжения, более высокого, чем 220 кВ. В качестве такового как известно, намечается напряжение 380—400 кВ.

В Швеции в ближайшее время будет сооружаться 400-кВ линия для передачи 300 тыс. кВт от гидростанции, расположенной на севере страны, на юг Швеции на расстояние почти в 1000 км. Для этой передачи намечено применить на повышающей подстанции при гэс один трансформатор с тремя расщепленными на генераторном напряжении обмотками, к каждой из которых присоединяется генератор в 100 тыс. кВт. Из этого следует, что применение одного столь мощного блока признается допустимым для энергетической системы Швеции (точнее южной части). По этому принципу может быть начато введение и в наших системах мощных электропередач напряжением 400 кВ, т. е. первоначально в виде одной блочной цепи. Тенденция вводить для передачи мощности от тепловых станций на расстояние 250—300 км напряжение 400 кВ в виде одновременно сооружаемых двух линий, работающих по связанной схеме, представляется неоправданной, так как это приведет к значительному недоиспользованию их пропускной способности и к установке большого количества выключателей. Капитальные затраты на электропередачу 400 кВ в этом случае оказываются более высокими, чем для электропередачи 220 кВ, а экономия потерь энергии для передачи 400 кВ не столь существенной.

Что касается сверхдальних электропередач с напряжением 400 кВ, то применение связанной схемы встречает значительные затруднения, и

¹ Не случайно, конечно, некоторые существующие связанные электропередачи в США переведены на работу блоками, как это уже было отмечено выше.

о следует из статьи П. С. Жданова [1], В. А. Вежова и Г. М. Розанова (Электричество, № 11, 1949). Для связанной электропередачи напряжением 400 кВ для линии длиной 400 км с одним переключательным постом в середине линии при линиях с улучшенными параметрами при передаче натуральной мощности коэффициент запаса статической устойчивости в нормальном режиме равен 15%, а в аварийном режиме — отрицателен (—7,5%). Соотношение предельных мощностей в нормальном и аварийном режимах $k=1,25$. При блочной линии аварийный режим отсутствует, предельная мощность определяется по нормальному режиму и равна 1,15 натуральной; следовательно, с одинаковым коэффициентом запаса, имея блочную линию, можно передать приблизительно на 25% большую мощность, чем при связанной, и не потребуется устройства промежуточного переключательного поста.

С увеличением длины до 600 км для передачи натуральной мощности необходимо применение специальных мероприятий, как-то: компенсирования, электронных регуляторов и питающих реакторов (насыщенных); при расстояниях же свыше 600 км требуется серьезная компенсация с помощью статических конденсаторов.

Из сказанного следует, что при передаче энергии на расстояния, близкие к 1 000 км, блочная схема обеспечивает более высокую удельную нагрузку, не требует применения переключательных постов с большим количеством выключателей и серьезной компенсации, в результате чего достигается значительно большая экономичность. Простота схемы и большая надежность работы являются несомненными достоинствами блочных линий, поэтому при разрешении проблемы передачи больших мощностей на далекие расстояния следует ориентироваться именно на блочную передачу.

В заключение следует отметить один фактор, использование которого позволит, повидимому, обеспечить практически полную бесперебойность работы блочных линий. Автоматическое пофазное

повторное включение, как известно, является весьма эффективным лишь при кратковременных однополюсных коротких замыканиях переходящего характера. При устойчивых же заземлениях, вызванных повреждением изоляторов, обрывом проводов и т. п., для ремонта поврежденной фазы требуется вывод линии из работы.

Произведенные в 1949 г. ТНЕСГЭИ исследования работы гидрогенераторов при несимметричных режимах (несимметрия до 0,5) показали, что нагрев активных частей и вибрация генераторов не выходили за допускаемые пределы. Это позволяет на линиях передачи, питаемых от гидростанций, осуществить пофазную локализацию однополюсных аварий и пофазный ремонт без перерыва работы линии по остальным двум здоровым фазам. Намечаемые Техническим отделом МЭС в 1950 г. дальнейшие исследования в большом масштабе работы как гидрогенераторов, так и турбогенераторов при несимметричной нагрузке фаз на линиях различных напряжений, вплоть до 220 кВ, должны дать конкретный материал о величине длительно допустимой нагрузки генераторов при работе на двух фазах, а также допустимости таких режимов работы с точки зрения влияния на провода связи и т. п.

Однако, уже и сейчас на основании испытаний 1949 г. можно считать доказанной возможность длительной работы одиночных линий, питаемых от гидростанций, на двух фазах с передачей по ним 60—70% нормальной нагрузки. Этим самым практически снимается вопрос о необходимости иметь специальный резерв мощности в энергосистемах при применении блочных линий передачи.

Литература

1. Опыт эксплуатации линии электропередачи 220 кВ „Булдер-дэм—Чайна-Берр“. El. Engineering, № 11, 1939.
2. Реферат статьи из El. Light and Power, Электрические станции, № 2, стр. 46, 1941.
3. ASME, т. 62, № 3, 1940.
4. К вопросу о построении рациональных электрических систем. Энергетический сборник, вып. VII-VIII, Ленинград, 1948.

[24. 8. 1949]



Схема синхронизации для испытания высоковольтных выключателей в искусственном режиме

Кандидат техн. наук Н. М. ЧЕРНЫШЕВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Еще не существует такого метода расчета дугогасящих устройств, который позволил бы спроектировать аппарат с гарантией заданной отключающей способности. Поэтому разработка новых и усовершенствование существующих высоковольтных выключающих аппаратов связаны с необходимостью проводить их испытания на отключающую способность. При таких испытаниях в цепи создается короткое замыкание, которое отключается испытуемым аппаратом. Для получения требуемой разрывной мощности испытательная установка должна иметь соответствующий источник питания.

При испытаниях на генераторном напряжении номинальная мощность источника питания составляет приблизительно 5—10% от предельной разрывной мощности установки. Если же испытания производятся на повышенном напряжении (110—220 кВ и выше), то в силу необходимости применять повысительные трансформаторы реактивность цепи увеличивается и требуемая номинальная мощность источников питания возрастает до 10—15% и выше.

Отношение между предельной разрывной мощностью установки и номинальной мощностью ее генератора уменьшается по мере повышения номинального напряжения испытуемого аппарата¹. Таким образом, проблема испытаний на отключающую способность особенно обостряется при переходе на высокие напряжения.

Происходящее в последнее время укрупнение энергосистем вызывает увеличение значений возможных токов короткого замыкания в отдельных точках сети, а также требует перехода к высоким и сверхвысоким напряжениям (400—500 кВ). Появляется необходимость в выключателях на эти напряжения с высокой отключающей способ-

Показывается необходимость применения искусственных схем при испытании на отключающую способность выключающих аппаратов на высокие и сверхвысокие напряжения. Подчеркивается важность получения точной синхронизации в приложении восстанавливающегося напряжения к дуговому промежутку. Предлагается новый принцип построения синхронизирующих устройств, позволяющих получить высокую точность синхронизации. Описывается искусственная схема с таким синхронизирующим устройством. Приведены осциллограммы, иллюстрирующие работу схемы.

ностью. Выключатели этих параметров не могут испытываться в обычных испытательных установках. В последние 10—15 лет было произведено много исследований, ставящих своей задачей разработать такие искусственные методы испытаний на отключающую

способность, которые позволили бы произвести полноценные испытания выключателей в испытательных установках, обладающих относительно малой мощностью.

Все разработанные искусственные методы испытаний могут быть разбиты на три группы.

1. Выключатель испытывается по отдельным разрывам. Способ особенно эффективен, если выключатель имеет много разрывов на фазу. Применение его может быть обосновано только в том случае, если будет доказана полная идентичность условий работы отдельных разрывов испытуемого выключателя как отдельно взятых, так и в последовательном соединении.

2. Испытание производится при пониженном напряжении. Результаты затем экстраполируются до номинальных значений напряжения. Применение этого метода испытаний ограничивается небольшим числом типов выключателей. В частности, такой тип выключателя, как воздушный, вообще не допускает испытаний по этому методу.

3. Испытания, при которых ток короткого замыкания получается от одного источника питания, а восстанавливающееся напряжение — от другого. Возможность испытаний по такому методу основывается на том, что пока в выключателе горит дуга — напряжение на нем относительно невелико. После же погасания дуги в выключателе восстанавливается высокое напряжение. Возникла идея создания испытательной установки, работающей по такой схеме, в которой ток через выключатель течет от сильного источника, а после гашения дуги на выключателе восстанавливается напряжение высокого

¹ Исключение составляет испытательная установка А. А. Горева [Л. 1], работающая по принципу колебательного контура.

высокого источника. Такие схемы для испытаний выключателей называют синтетическими. Синтетические схемы позволяют существенно повысить разрывную мощность установки без больших материальных затрат.

Качество этой схемы будет определяться тем, насколько точно она воспроизводит естественные условия работы выключателя в процессе отключения.

Вопросу разработки и исследования синтетических схем уделялось много внимания. В Советском Союзе такие схемы предложили А. Я. Буйлов [Л. 2] и М. М. Акодис [Л. 3]. Синтетические схемы исследовались и в других странах [Л. 4]. Наиболее интенсивно велись работы теми фирмами, которые не имели соответствующих лабораторий разрывных мощностей.

Несмотря на большое разнообразие предложенных схем, большинство их по характеру своей работы соответствуют одной из приведенных на рис. 1 скелетных схем.

Испытательная установка по схеме а рис. 1 работает следующим образом. Испытуемый выключатель ИВ размыкает цепь, в которую кроме самого выключателя и источника отключаемого тока ИТ входит еще и так называемое отделяющее устройство ОУ. После погасания дуги в испытуемому выключателю через искровой промежуток П прикладывается напряжение высоковольтного источника ИН. Устройство ОУ служит для разделения цепей отключаемого тока и восстанавливающего напряжения, чем представляется как замыкание высоковольтного источника на силовоточный источник, так и повышение изоляции силовоточного источника за счет подачи на него высокого напряжения.

В большинстве схем пробой промежутка П происходит под воздействием специального синхронизирующего устройства. К синхронизирующему устройству предъявляется требование обеспечить начало процесса восстановления напряжения на испытуемом выключателе немедленно после погасания дуги. В качестве источника восстанавливающего напряжения могут быть использованы либо высоковольтный трансформатор соответствующей мощности, либо импульсный генератор напряжения.

Отделяющее устройство в некоторых схемах представляет собой фильтр, состоящий из емкости и индуктивности. В этом случае в качестве источника напряжения (ИН) может быть использован только импульсный генератор. В других схемах устройством ОУ является выключатель, работающий синхронно с испытуемым. Такие схемы позволяют применять в качестве источника восстанавливающего напряжения как импульсный генератор, так и повысительный трансформатор.

При выполнении схем с синхронизирующим устройством основные трудности связаны с созданием самого синхронизирующего устройства. Они заключаются в противоречии между требованием точной синхронизации момента пробоя промежутка П с моментом погасания дуги в выключателе и тем обстоятельством, что момент

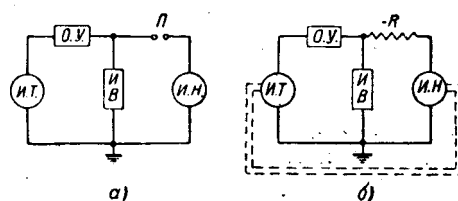


Рис. 1. Схемы соединений источников питания при синтетических испытаниях.

погасания дуги не может быть заранее точно предсказан ввиду того, что величина отключаемого тока и форма его кривой зависят от ряда случайных факторов и изменяются от опыта к опыту (даже при неизменных параметрах токовой цепи).

Можно считать экспериментально доказанным, что как запаздывание в приложении восстанавливающегося напряжения, так и его преждевременная подача сильно искажают условия опыта и во многих случаях вообще сводят на-нет результаты эксперимента. Поэтому при создании искусственных схем вида рис. 1, а первостепенное значение приобретает обеспечение надежной и точной синхронизации момента подключения источника напряжения к испытуемому выключателю. Тем не менее синхронизирующее устройство в опубликованных схемах является наиболее слабым местом.

Ряд авторов для того, чтобы обойти трудности синхронизации работы искрового промежутка, предлагают производить испытания по схемам, которым соответствует скелетная схема б, рис. 1. Источником восстанавливающегося напряжения является повысительный трансформатор, питаемый от источника тока или другого источника с синхронным напряжением. Через испытуемый выключатель протекает суммарный ток от цепи большого тока и цепи восстанавливающегося напряжения. Ток в цепи восстанавливающегося напряжения ограничивается активным сопротивлением R (в некоторых схемах сопротивление отсутствует).

Анализ схемы рис. 1, б показывает [Л. 5], что с ее помощью не может быть получен большой выигрыш в разрывной мощности испытательной установки по сравнению с суммарной разрывной мощностью источников питания, если при этом требуется получение высокой скорости восстанавливающегося напряжения и приемлемой формы кривой отключаемого тока.

В статье описывается синхронизирующее устройство, позволяющее построить искусственную схему для испытания выключателей на отключающую способность и обеспечивающее достаточную точность синхронизации момента приложения высокого напряжения к испытуемому объекту с моментом гашения дуги в нем. Применение этого устройства допускает использование в качестве источника восстанавливающегося напряжения импульсного генератора, что сильно снижает стоимость установки и в то же время открывает широкие возможности к дости-

жению различных скоростей восстанавливающегося напряжения, в том числе и самых высоких.

Схема синхронизации должна позволять:

1. Подвергнуть испытуемый объект воздействию высокого напряжения немедленно после гашения дуги в нем (при этом испытуемый аппарат оказывается в условиях, наиболее близких к естественным).

2. Подвергнуть испытуемый объект воздействию высокого напряжения через определенный, наперед заданный, промежуток времени до или после момента обрыва дуги (такая синхронизация может понадобиться при специальных экспериментах по исследованию процессов гашения дуги).

В обоих случаях схема должна работать четко вне зависимости от величины отключаемого тока и наличия в нем апериодической составляющей. Оценка того или иного синхронизирующего устройства должна производиться по степени выполнения этих условий.

Возможны три пути осуществления синхронизации работы цепей большого тока и восстанавливающегося напряжения. Если срабатывание синхронизирующего устройства происходит:

1) в момент достижения током нулевого значения (в силовую цепь вводится нулевое реле);

2) за счет резкого повышения напряжения на контактах испытуемого объекта в момент обрыва тока;

3) с опережением момента прохода отключаемого тока через нуль на заданный промежуток времени.

Первые два типа синхронизирующих устройств срабатывают тогда, когда отключаемый ток уже достиг нулевого значения, иначе говоря, тогда, когда дуга в испытуемом объекте погасла. Схема синхронизации и высоковольтный источник, на который она воздействует, имеют собственные времена срабатывания, и при использовании синхронизирующих устройств, срабатывающих в момент гашения дуги, неминуемо появляется запаздывание в приложении высокого напряжения. Пауза между моментом гашения дуги в испытуемом объекте и моментом приложения к нему высокого напряжения может быть сведена к нулю, если импульс на подачу высокого напряжения к испытуемому объекту посылается с опережением, равным собственному времени работы высоковольтного источника плюс собственное время работы цепи управления им.

Если бы ток короткого замыкания в процессе отключения в точности выражался бы тригонометрической функцией синуса или косинуса, то задача создания синхронизирующего устройства, срабатывающего с нужным опережением по отношению к нулю тока, решалась бы просто: можно было бы вычислить, какой ток протекает через выключатель в момент времени, когда должно сработать устройство, а затем в цепь тока ввести реле, срабатывающее при данном значении тока. Однако, в действительности ток короткого замыкания во время отключения может очень сильно и различно в зависимости от

обстановки опыта отличаться от чисто синусоидального тока.

На форму кривой отключаемого тока будут влиять: 1) величина тока короткого замыкания; 2) тип дугогасящего устройства; 3) наличие или отсутствие в токе апериодической составляющей; 4) фаза тока во время начала размыкания контактов и т. д.²

Но, с другой стороны, можно утверждать, что резких обрывов тока у нуля при отключении выключателями больших токов не наблюдается. В пользу такого утверждения говорит тот факт, что если при отключении малых токов на осциллограммах напряжения наблюдаются большие «пики гашения», свидетельствующие о резком обрыве тока, то при отключении больших токов пики незначительны или вовсе отсутствуют³.

Это может быть объяснено тем, что благодаря сильной ионизации дугового промежутка при горении в нем дуги большого тока пространство между контактами ко времени подхода тока к нулю обладает еще большой проводимостью, которая препятствует резкому обрыву тока.

Команда на подключение высоковольтного источника к испытуемому объекту должна подаваться с опережением по отношению к моменту погасания дуги, поэтому синхронизирующее устройство должно каким-то образом учесть характер изменения тока при подходе к нулю. Принимая во внимание, что момент срабатывания синхронизирующего устройства t_0 должен опережать момент прохождения тока через нуль τ на достаточно малый промежуток времени τ , равный собственному времени работы схемы синхронизации и цепи управления высоковольтным источником—функцию, аналитически выражающую закон изменения тока в интервале $(t_0, t_0 + \tau)$, с достаточной точностью можно заменить линейной функцией.

Тогда можно построить синхронизирующее устройство, которое срабатывало бы в заданное число микросекунд до нуля тока, в предположении, что после его срабатывания закон изменения тока во времени является линейным.

В этом заключается основной принцип разработанного синхронизирующего устройства.

На рис. 2 показана прямая AB , по которой отключаемый ток подходит к нулю. Срабатывание синхронизирующего устройства должно происходить в момент времени t_0 , опережающий на время τ —момент достижения током нулевого значения.

² Некоторые авторы осуществляют синхронизацию работы цепей отключаемого тока и восстанавливающегося напряжения с помощью пик-трансформатора, вводного в токовую цепь. Однако, четкой расогы от такой схемы нельзя ожидать, так как резкий подъем напряжения в вторичной обмотке пик-трансформатора будет начинаться при каком-то определенном значении тока. Следовательно, момент появления пика напряжения на пик-трансформаторе будет отстоять от момента прохождения тока через нуль на интервалы времени, меняющиеся от опыта к опыту.

³ Поэтому, между прочим, при отключении больших токов нельзя ожидать четкой работы также и от синхронизирующего устройства, срабатывающего под воздействием напряжения пика гашения.

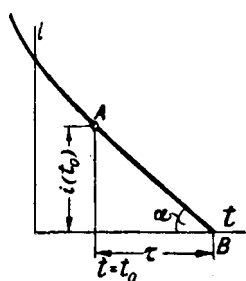


Рис. 2. Кривая подхода
отключаемого тока к нулю.

Из простых геометрических соображений следует, что

$$\frac{i(t_0)}{\tau} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

но

$$\operatorname{tg} \alpha = - \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_0},$$

поэтому

$$i(t_0) + \tau \cdot \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_0} = 0. \quad (2)$$

Следовательно, если создать схему, которая реагировала бы на сумму

$$i(t) + \tau \frac{di}{dt} \quad (3)$$

срабатывала бы при нулевом значении суммы, то это срабатывание происходило бы за время τ до наступления нуля тока при условии, что подход тока к нулю происходил бы по прямой линии.

Важное достоинство схемы, работающей по описываемому принципу, заключается в том, что опережение τ не зависит от значения тока и формы его кривой. Необходимо только, чтобы интервал времени $(t_0, t_0 + \tau)$ был настолько мал, чтобы кривая тока с достаточной точностью аппроксимировалась бы прямой. Независимость опережения τ от кривой тока объясняется тем, что синхронизирующее устройство, реагируя не только на величину тока, но и на скорость его изменения, срабатывает тогда, когда соотношение между током и скоростью его изменения такое, что через время τ ток должен обратиться в нуль.

Здесь описан принцип построения синхронизирующего устройства, работа которого основывается на предположении, что после срабатывания схемы отключаемый ток подходит к нулю по закону прямой линии.

Это является частным случаем разработанного автором более общего принципа построения синхронизирующих устройств, на основании которого можно выполнить схемы, срабатывающие с опережением τ по отношению к нулю тока с аппроксимацией кривой тока в интервале $(t_0 + \tau)$ многочленом данной степени [Л. 5]. Точность работы схемы повышается с ростом степени многочлена. Однако, как показали расчеты и эксперименты, вполне достаточная для практики точность получается при аппроксимации кривой тока в интервале $(t_0, t_0 + \tau)$ прямой. Запаздывание в приложении восстанавливающего напряжения, которое имело место в опубликованных ранее искусственных схемах для испытания выключателей, доходило до 100 мксек [2]. Для компенсации этого запаздывания опережение в срабатывании синхронизирующего устройства τ должно быть такого же порядка, причем величина опережения должна быть регулируемой, чтобы иметь возможность точно ком-

пенсировать собственное время работы цепи управления источником восстанавливающего напряжения.

Проведенные расчеты [Л. 5] показали, что допущение того, что отключаемый ток в интервале 100 мксек до подхода к нулю изменяется по линейному закону, вносит погрешность не выше 0,06% при отсутствии в токе апериодической составляющей и меньше 1,85% при максимальном ее значении, если величину погрешности относить к значению тока в момент срабатывания синхронизирующего устройства.

Точность работы описываемого синхронизирующего устройства будет сильно повышаться по мере уменьшения времени опережения. С этой точки зрения необходимо стремиться, чтобы собственное время цепи управления источником восстанавливающего напряжения было как можно меньше.

Для ориентировочных расчетов принималось $\tau = 100$ мксек. В действительности путем рационального конструирования схемы это время может быть уменьшено до 30—50 мксек. Если бы даже внутри этого промежутка времени и произошел бы обрыв отключаемого тока, то запаздывание в приложении высокого напряжения вряд ли было бы больше половины τ , так как преждевременный обрыв тока может быть в некоторой степени учтен при установке опережения.

Скелетная схема синхронизирующего устройства, дающего опережающий импульс. На рис. 3 изображена скелетная схема синхронизирующего устройства, реагирующего на величину отключаемого тока и скорость его изменения. В цепь тока короткого замыкания введен активный шунт R и индуктивный шунт L . Падение напряжения на первом шунте U_R пропорционально току, а на втором шунте U_L — скорости изменения тока. Напряжения, снимаемые с шунтов, подаются на потенциометры с коэффициентами деления k_1 и k_2 . Напряжения, снимаемые с потенциометров⁴, суммируются и подаются на вход электронного нулевого реле.

Напряжение на его входе

$$U_{mn} = k_1 U_R + k_2 U_L = k_1 R \left(i + \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{L}{R} \frac{di}{dt} \right).$$

Срабатывание нулевого реле произойдет в тот момент, когда $U_{mn} = 0$, т. е. тогда, когда

$$i + \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{L}{R} \cdot \frac{di}{dt} = 0. \quad (4)$$

Сравнивая выражение (4) с суммой (3), легко видеть, что срабатывание нулевого реле произойдет за время τ до момента достижения током нулевого значения, при чем τ может быть выражено в виде:

$$\tau = \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{L}{R} [\text{сек}]. \quad (5)$$

⁴ Если падение напряжений на шунтах малы и не могут обеспечить четкую работу нулевого реле, то потенциометры могут быть заменены усилителями. В этом случае k_1 и k_2 будут коэффициентами усиления усилителей.

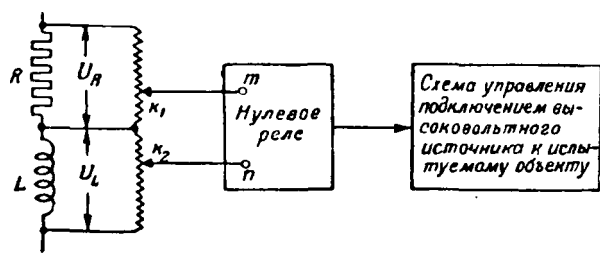


Рис. 3. Схема синхронизирующего устройства.

Это равенство показывает, что при данном активном и индуктивном шунтах опережение τ может регулироваться в широких пределах путем изменения коэффициентов k_1 и k_2 .

При срабатывании электронное реле дает импульс напряжения, который в дальнейшем используется для приведения в действие источника восстанавливающегося напряжения.

Заметим, что синхронизирующее устройство, работающее по схеме рис. 3, не предъявляет жестких требований к шунтам в смысле безиндуктивности активного шунта R и исчезающе малого активного сопротивления индуктивного шунта L . В схеме падения напряжений на шунтах складываются, и в конечном счете важна сумма активного и реактивного падений напряжений на обоих шунтах, а не на каком из шунтов эти падения напряжений имеют место.

Если индуктивность шунта R равна L_R , а активное сопротивление шунта L равно R_L , то

$$\tau = \frac{k_2 L + k_1 L_R}{k_1 R + k_2 R_L}. \quad (5')$$

Однако удобнее, чтобы величины L_R и R_L были малы по сравнению с L и R , так как в этом случае опережение τ в процессе испытаний на отключающую способность очень легко регулируется изменением коэффициента k_2 при постоянном коэффициенте k_1 (5').

Если коэффициент k_2 регулируется путем перемещения движка потенциометра, то τ оказывается пропорциональным перемещению движка и, следовательно, градуированная в микросекундах шкала потенциометра будет линейной.

Искусственная схема с отдельными источниками питания и синхронизирующим устройством. Описанное синхронизирующее устройство может быть использовано в различных искусственных схемах для испытания на отключающую способность. В качестве примера на рис. 4 изображена искусственная схема, в которой применено синхронизирующее устройство, изображенное на рис. 3. Источником тока является синхронный генератор, к которому через разделительный трансформатор подключается испытуемый ИП и вспомогательный ВП дуговые промежутки. При прохождении тока короткого замыкания через нуль дуга гаснет в обоих промежутках. В этот момент срабатывает источник восстанавливающегося напряжения (импульсный генератор), напряжение которого прикладывается к испытуемому промежутку.

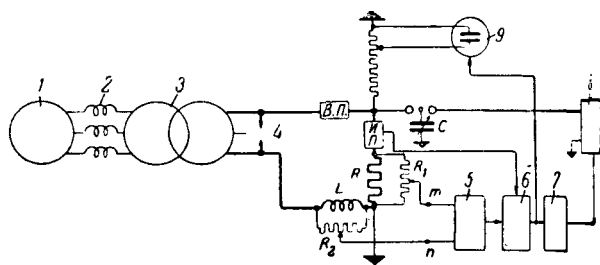


Рис. 4. Искусственная схема с синхронизирующим устройством, изображенным на рис. 3.

1 — генератор 15 000 квт, 6 кв; 2 — реактор; 3 — разделительный трансформатор; 4 — защитный промежуток; 5 — нулевое реле; 6 — элемент блокировки; 7 — элемент выдержки времени; 8 — высоковольтный ударный контур; 9 — катодный осциллограф; ИП — испытуемый промежуток; ВП — вспомогательный промежуток; С — емкость для регулирования скорости восстанавливающегося напряжения.

Вспомогательный промежуток препятствует попаданию высокого напряжения на источник тока. Для предупреждения повреждения изоляции источника тока при случайных пробоях вспомогательного промежутка в схеме предусмотрена специальная защита разделительного трансформатора от перенапряжений (на рис. 4 защита устройства условно показано в виде искрового промежутка). В качестве вспомогательного промежутка может быть использована одна из свободных фаз выключателя (имеются в виду одноклапанные фазные испытания). Кроме того, если фаза выключателя состоит из нескольких разрывов, то одна часть из них может быть использована в качестве вспомогательного промежутка, а другая часть — испытываться.

Активный и индуктивный шунты и нулевое реле образуют синхронизирующее устройство, работа которого ясна из предыдущего.

Зажигание ударного контура должно происходить не при любом прохождении тока через нуль, а только при том нуле тока, в котором обрывается дуга. Для выполнения этого условия в схему введен элемент блокировки, который преграждает путь импульсу напряжения, поступающему от нулевого реле. Под воздействием напряжения на дуге испытуемого промежутка схема деблокируется и импульс напряжения свободно проходит через элемент блокировки. Таким образом, срабатывание ударного контура становится возможным только после возникновения дуги в испытуемом объекте.

Элемент блокировки устроен так, что путем соответствующей его регулировки можно обеспечить деблокировку синхронизирующего устройства либо немедленно после возникновения дуги, либо спустя определенный промежуток времени. В последнем случае, если размыкание контактов происходит незадолго до момента естественного прохождения тока через нуль, высокое напряжение будет прикладываться к испытуемому промежутку только после второго полупериода горения дуги (дуга горит более одного полупериода).

При испытаниях по искусственной схеме α бое значение приобретает осциллографирование процесса отключения на катодном осциллографе с электрической временной разверткой, так как по осциллограммам определяются результаты опыта.

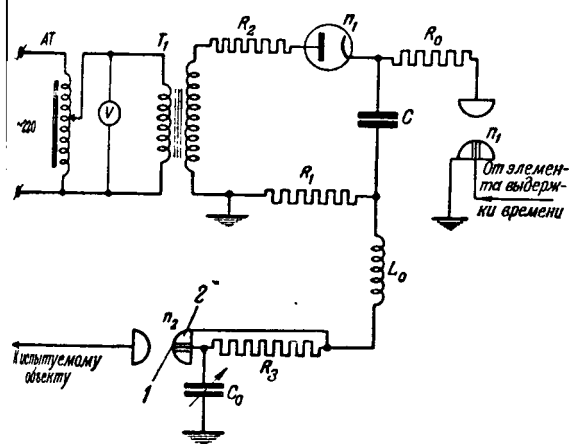


Рис. 5. Схема импульсного генератора.

Для синхронизации катодного осциллографа исследуемым явлением в схеме, изображенной на рис. 4, использовано то же устройство, которое осуществляет синхронизацию цепей тока и восстанавливающегося напряжения.

Очередность работы отдельных элементов схемы следующая: импульс напряжения, возникающий на нулевом реле при его срабатывании, приводит в действие катодный осциллограф. Одновременно с этим срабатывает элемент выдержки времени (электронное реле времени). Через определенную выдержку времени после срабатывания нулевого реле происходит поджигание высоковольтного контура.

Благодаря наличию элемента выдержки времени имеется возможность производить открытие дуги катодного осциллографа еще тогда, когда в дуговом промежутке горит дуга, и видеть на катодной осциллограмме процессы гашения дуги и восстановления напряжения. Опережение τ на синхронизирующем устройстве при этом устанавливается таким, чтобы приложение восстанавливающегося напряжения к дуговому промежутку происходило в желаемый момент времени, в частности, в момент погасания дуги. Такое объединение в одном устройстве функции управления работой высоковольтного источника и работой катодного осциллографа приводит к необходимости некоторого увеличения опережения τ . Это обусловлено желанием видеть на катодной осциллограмме картину, предшествующую моменту погасания дуги.

Согласно изложенному выше увеличение τ снижает точность работы схемы синхронизации. Поэтому в тех случаях, когда при подходе к нулю скорость спада тока резко меняется, катодный осциллограф необходимо синхронизировать с исследуемым явлением при помощи отдельной схемы.

Описанная искусственная схема была смонтирована и испытана в лаборатории выключающей аппаратуры ВЭИ. Ток получается от стенда разрывных мощностей лаборатории [Л. 6]. Источником напряжения являлся импульсный генератор на 70 кВ с рабочей емкостью 2,4 мкФ.

Схема импульсного генератора изображена на рис. 5. Рабочей емкостью является конденса-

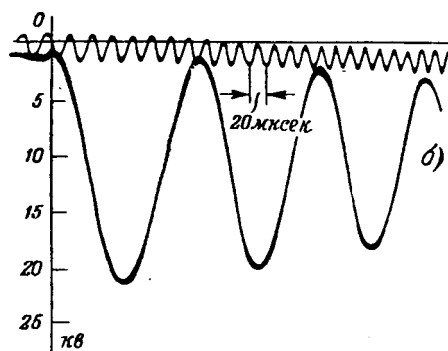
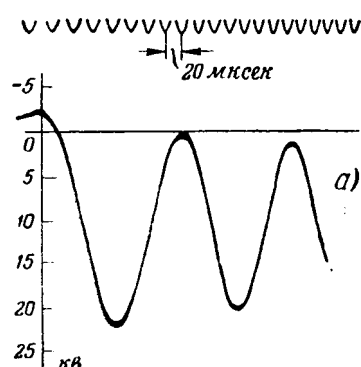


Рис. 6. Осциллограммы напряжения на испытуемом промежутке (успешное отключение).

тор C . При срабатывании промежутка P_1 конденсатор C через сопротивление R_0 и индуктивность L_0 разряжается на испытуемый объект. Емкость C_0 служит для регулирования скорости восстанавливающегося напряжения.

Испытуемый объект подключается к импульсному генератору через искровое реле P_2 . Такое подсоединение исключает влияние постоянных схем импульсного генератора на процесс горения дуги в испытуемом аппарате. При срабатывании генератора промежутки P_2 легко пробиваются при относительно низком напряжении на емкости C_0 , так как благодаря соответствующему соединению электродов искрового реле (рис. 5) промежутки P_2 быстро ионизируются за счет пробоя пространства между электродами 1 и 2.

В виде примера на рис. 6—8 показаны катодные осциллограммы, снятые при испытании воздушного выключателя на 10 кВ. В качестве вспомогательного промежутка использовалась вторая фаза выключателя. Испытания велись при токах 2 000—10 000 А. Скорость восстанавливающегося напряжения была понижена для того, чтобы осуществить моделирование определенной точки сети.

На рис. 6 показаны осциллограммы, снятые в тех опытах, которые оканчивались успешным отключением короткого замыкания. На рис. 7 изображены осциллограммы, полученные в опытах, при которых наступал повторный пробой дугового промежутка. Осциллограммы a соответствуют опытам, когда полярность напряжения импульсного генератора была противоположна полярности напряжения на дуге выключателя.

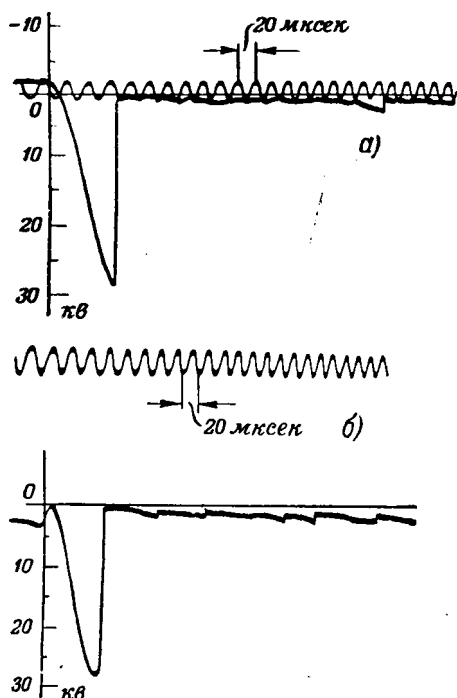


Рис. 7. Осциллограммы напряжения на испытуемом промежутке (отказ в отключении).

Осциллограммы б соответствуют опытам, в которых полярности совпадают⁵.

В некоторых опытах опережение на синхронизирующем устройстве устанавливалось таким, чтобы приложение восстанавливающего напряжения происходило с запаздыванием (рис. 8).

Освещение результатов испытания выключателя выходит за рамки статьи. С точки же зрения работы синхронизирующего устройства проведенные испытания показали, что с его помощью имеется возможность получить вполне удовлетворительную синхронизацию работы цепей отключаемого тока и восстанавливающего напряжения⁶.

⁵ Применяя два импульсных генератора, можно было бы всегда получить правильную полярность восстанавливающего напряжения [Л. 3].

⁶ В то время, когда работа была уже подготовлена к печати, по описанной схеме были проведены успешные испытания воздушных выключателей при различных напряжениях и отключаемых мощностях, достигающих до 3 000 000 кВА.

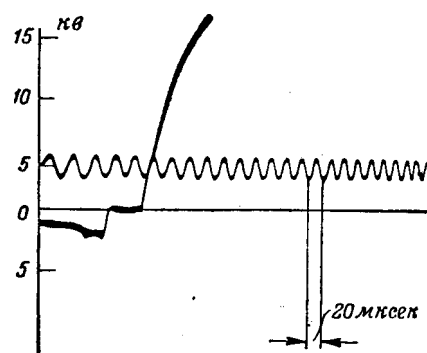


Рис. 8. Осциллограммы напряжения на испытуемом промежутке (опыты с запаздыванием в приложении восстанавливающего напряжения).

В заключение отметим, что обеспечение надежной синхронизации источников тока и устанавливающегося напряжения существенно улучшает качество искусственной схемы в смысле создания эквивалентных условий при испытании аппаратуры на отключающую способность. Можно считать, что при правильном выборе параметров источников тока и источника восстанавливающего напряжения [Л. 5] испытываемая в искусственной схеме с описанным синхронизирующим устройством могут дать достаточно надежные результаты.

При проведении настоящей работы автор широко пользовался ценными указаниями и активной поддержкой своего научного руководителя Ю. В. Буткевича,

Литература

1. В. Ю. Гессен. О специальной схеме для испытаний высоковольтных выключателей на разрывную мощность. Электричество, стр. 31, № 12, 1939.
2. А. Я. Булюнов. Искусственные методы испытания выключателей. Труды ВЭИ, вып. 37, стр. 17, 1940.
3. М. М. Аколос. Искусственное увеличение разрывной мощности установок для испытания выключателей. Электричество, стр. 47, № 5, 1940.
4. Ю. В. Буткевич. Отключение цепей высокого напряжения. Электричество, стр. 80, № 2, 1949.
5. Н. М. Чернышев. Диссертация, ВЭИ, 1948.
6. Ю. В. Буткевич. Лаборатория разрывных мощностей ВЭИ. Электричество, стр. 40, № 11, 1946.

[Э. 11. 1946]



Импульсный дроссельный каскад

Инж. В. Б. ЗАЛМАНЗОН

Завод МПСС

В ряде отраслей радиотехники все чаще находят применение импульсный дроссельный каскад (рис. 1). В этой

схеме к сетке лампы приложено напряжение определенной формы, что до некоторого времени лампа максимально открыта. В определенный момент лампа быстро закрывается. В анодной цепи, в зависимости от нагрузки появляются или затухающие колебания, или апериодически спадающий импульс напряжения. Интересен второй режим. В этом случае при небольшом питающем анодном напряжении E_a схема позволяет получить импульсы напряжения значительной величины и определенной длительности. Схема находит разностороннее применение: для создания линии задержки, указания острым пиком напряжения в определенный момент времени на экране электронно-лучевой трубки, отпираания на определенном промежутке времени лампового генератора и т. п. Названные и другие задачи данная схема решает просто и экономично.

Здесь приведен анализ работы схемы и ее расчет для апериодического случая. Схема рассматривалась раньше [Л. 1, 2], но при этом вводились упрощения, которые не давали возможности считать амплитуду и длительность импульса анодного напряжения $e(t)$.

Рассмотрен каскад с индуктивностью в анодной цепи, создающий кратковременные импульсы напряжения значительной величины и определенной длительности. Даны расчетные формулы и обоснован выбор лампы и управляющего напряжения.

Анализ. Устанавливающийся в схеме процесс удобно рассматривать, разбив его на два цикла: $0 \leq t \leq \tau$ и $t > \tau$, где τ —

время запираания лампы по сетке (рис. 1). За время τ анодный ток лампы меняется от $i_a = I$ при $t = 0$ до $i_a = 0$ при $t = \tau$. Сеточное напряжение, создаваемое пистонным источником, должно иметь весьма крутой фронт. С достаточной для практики точностью можно положить, что используемый участок этого напряжения линейный. Зависимость $i_a = f(e_g)$ также можно аппроксимировать как линейную. Тогда для цикла $0 \leq t \leq \tau$ получим $i_a = I \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)$. Для второго цикла $t > \tau$, $i_a = 0$. Рассмотрим два случая: постепенное запираание лампы, когда $\tau > 0$, и мгновенное запираание лампы, когда можно положить $\tau = 0$.

Постепенное запираание лампы ($\tau > 0$). Рассмотрим цикл $0 \leq t \leq \tau$, $i_a = I \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)$. Введем обозначения:

$$\alpha_0 = \frac{1}{RC_0}; \quad \alpha = \frac{1}{RC}; \quad \beta = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC_0};$$

$$\omega_1^2 = \frac{1}{LC}; \quad p_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad p_1 = \sqrt{\frac{L}{C_0}}. \quad (1)$$

где C_0 — сумма распределенных емкостей (всегда выполняется условие $C \gg C_0$).

Положим процесс, существовавший до начала цикла ($t \leq 0$, $i_a = I$), установившимся. Начиная от момента $t = 0$, процесс обусловлен током $i_\varphi = I \frac{t}{\tau}$, который вызовет в цепи RC ток

$$i_c = -i_\varphi \frac{z}{z_1}, \quad \text{где}$$

$$z_1 = \frac{1}{pC} + R, \quad \frac{1}{z} = \frac{1}{pL} + pC_0 + \frac{pC}{1 + pCR}.$$

Обозначив интересующее нас напряжение на сопротивлении через e и учитывая, что $C \gg C_0$, получим:

$$e = \frac{I}{\tau C_0} \frac{p}{p^3 + \alpha_0 p^2 + \omega_0^2 p + \omega_0^2 \alpha}. \quad (2)$$

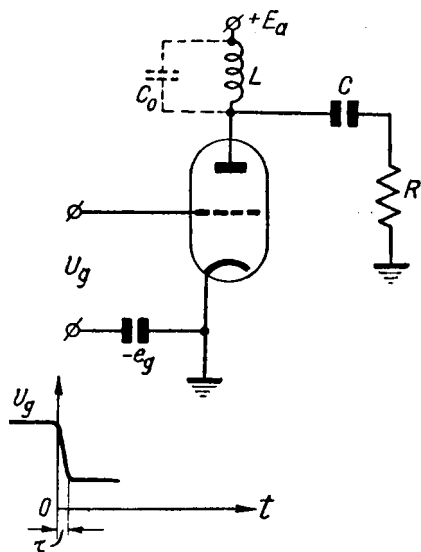


Рис. 1.

В схеме не будет колебаний, если отсутствуют сопряженные корни уравнения $Z(p)=0$, где $Z(p)$ — знаменатель выражения (2). Для этого необходимо выполнение неравенства

$$\left(\frac{p}{R}\right)^2 + \left(\frac{R}{\tau_0}\right)^2 < 0,25 + 4,5 \frac{C_0}{C}; \quad (3)$$

при $C \rightarrow \infty$ отсутствуют колебания, если

$$R < 0,5\rho_0; \quad (4')$$

при $C_0 \rightarrow 0$ процесс апериодичен при условии

$$\rho < 0,5R. \quad (4'')$$

Таким образом, первый член неравенства (3) характеризует цепь из последовательно соединенных L и C , второй член — цепь из параллельно соединенных L и C_0 .

В дальнейшем рассматривается случай отсутствия колебаний в схеме. Уравнение $Z(p)=0$ и согласно правилу Декарта положительных корней не имеет, поэтому все три корня уравнения, которые обозначим $-x$, $-y$, $-z$, — вещественны и отрицательны.

Тогда можем написать:

$$Z(p) = (p+x)(p+y)(p+z).$$

Решая уравнение (2), получим:

$$e = \frac{I}{\tau C_0} \frac{(z-y)e^{-xt} + (x-z)e^{-yt} + (y-x)e^{-zt}}{(x-y)(y-z)(z-x)}. \quad (5)$$

Можно показать, что функция $e(t)$ имеет одну экстремальную точку (максимум) и лишь при $t=0$ и $t=\infty$ оказывается равной нулю.

Рассмотрим теперь цикл $t > \tau$, $i_a = 0$. Переходной процесс во время второго цикла обусловлен, как и для первого цикла,

$$i_\phi = -I \frac{t}{\tau} + I \frac{t_2}{\tau},$$

где $t_2 = t - \tau$. Аналогично получим:

$$e = \frac{I}{\tau C_0} \times \frac{(z-y)(e^{-xt} - e^{-xt_2}) + (x-z)(e^{-yt} - e^{-yt_2}) + (y-x)(e^{-zt} - e^{-zt_2})}{(x-y)(y-z)(z-x)}. \quad (6)$$

Очевидно, при $t=\tau$ формулы (5) и (6) тождественны. Напряжение $e=0$ при $t=\infty$ и, как можно показать, при некотором $t=t_0$. Однако значение t_0 алгебраическим путем не может быть определено, так как получаемое при этом трансцендентное уравнение неразрешимо. Кривая выходного напряжения за оба цикла приведена на рис. 2. На выходе появляется положительный импульс напряжения, вполне определенной длительности t_0 .

Мгновенное запирание лампы ($\tau=0$). В этом случае первого цикла не существует. Действительно, полагая в формуле (5) $\tau=0$ и $t=0$, получим $e=0$. Выражение (6) при условии $\tau=0$ дает формулу, которая также может быть получена непосредственно, если, рассматривая работу

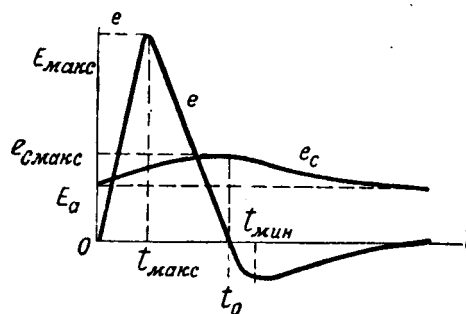


Рис. 2.

схемы, учесть, что с момента $t=0$ процесс обусловлен током $i_\phi = -I$:

$$e = \frac{I}{C_0} \frac{p^2}{p^3 + \alpha_0 p^2 + \omega_0^2 p + \omega_0^2};$$

$$e = \frac{I}{C_0} \frac{x(y-z)e^{-xt} + y(z-x)e^{-yt} + z(x-y)e^{-zt}}{(x-y)(y-z)(z-x)}.$$

Условием отсутствия в схеме колебаний является то же, как и ранее, неравенство (3). Выходное напряжение $e=0$ при $t=0$, $t=\infty$ также, как можно показать, при некотором $t=t_0$. Однако значение t_0 , равно как и значения экстремальных точек, не могут быть определены ввиду трансцендентности уравнений. Характер функции, описываемой выражением (7), может быть найден, руководствуясь следующими соображениями. Если напряжение по формуле (5) представить в виде $e = A\varphi(t)$, а напряжение по формуле (5) $e_\tau = B\psi(t)$, то легко заметить, что $\varphi(t) = \frac{d\psi(t)}{dt}$. Из рассмотренной выше кривой

напряжения $e_\tau(t)$ можно заключить, что кривая $e(t)$ при мгновенном запуске лампы имеет вид, аналогичный кривой $e(t)$ в случае постепенного запуска лампы (рис. 2). Таким образом, в обоих случаях на нагрузке R появляется импульс положительного напряжения определенной длительности t_0 , достигающий максимальной величины E_m при $t=t_m$. Как следует из формулы (5), ясно физически, увеличение τ и C_0 приводит к уменьшению E_m . Напряжение на емкости

$$e_c = E_a + \frac{e}{pCR}.$$

Этому процессу можно дать такое объяснение.

Повышение анодного напряжения происходит весьма быстро, но с конечной скоростью вследствие наличия распределенной емкости. Это напряжение вызывает появление тока i_c через емкость C и сопротивление R . Ток i_c постепенно заряжает емкость C , к началу процесса имевшей потенциал E_a . По мере спада э.д.с. самоиндукции и увеличения заряда емкости уменьшается ток i_c . Наконец, э.д.с. самоиндукции становится меньше потенциала емкости C , тогда емкость начинает разряжаться через дроссель и сопротивление. Конечно, при этом меняется i_c , меняется знак (в момент t_0). В определен-

мент величина обратного тока i_c достигает максимума, после чего он спадает до тех пор, пока потенциал емкости не станет равным потенциалу источника питания E_a . Напряжение e по мере повторяет ток i_c .

Расчетные формулы. Полученные формулы определяют качественную и количественную сторону исследуемого процесса, но не позволяют рассчитать t_0 , t_m и E_m . Чтобы найти эти величины и выбрать параметры схемы, упростим полученные формулы, наложив два условия. В начале процесса при $t \leq t_m$ можно пренебречь последним членом $\omega_0^2 \alpha$ знаменателя формул (2) и (7).

Для этого достаточным условием будет $\frac{\omega_0^2 \alpha}{p} \ll$

$\frac{1}{RC}$ или $t \ll RC$. Так как в данном случае максимальное значение $t = t_m$, то для того, чтобы пренебречь величиной $\omega_0^2 \alpha$, будем считать достаточным выполнение неравенства

$$t_m \leq 0,1RC. \quad (9)$$

Практически это условие всегда выполняется. При $t \geq t_0$ можно пренебречь первым членом знаменателя формул (2) и (7). Для этого достаточным условием будем считать наличие негашения

$$RC_0 \leq 0,1 \cdot t_0. \quad (10)$$

Наложим на схему условия (9) и (10) и опустим знаменателе формул (2) и (7) член $\omega_0^2 \alpha$ при $t \leq t_m$ и член p^3 при $t \geq t_0$. Это равнозначно тому, что в первом случае рассматривается схема при $C = \infty$, а во втором схема при $C_0 = 0$. При этом получим следующие выражения для E_m и t_0 .

Постепенное запирание лампы:

$$t_m = \frac{1}{q-r} \ln \frac{\varepsilon^{qr} - 1}{\varepsilon^{rt} - 1}, \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\alpha_0}{2} + \sqrt{\frac{\alpha_0^2}{4} - \omega_0^2}, \quad r = \frac{\alpha_0}{2} - \sqrt{\frac{\alpha_0^2}{4} - \omega_0^2}, \quad (12)$$

$$E_m = \frac{IL}{\tau(q-r)} [r(\varepsilon^{-qt_m} - \varepsilon^{-q(t_m-\tau)}) - q(\varepsilon^{-rt_m} - \varepsilon^{-r(t_m-\tau)})], \quad (13)$$

$$t_0 = \frac{1}{v-s} \ln \frac{\varepsilon^{vt} - 1}{\varepsilon^{st} - 1}, \quad (14)$$

$$v = \beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_1^2}, \quad s = \beta - \sqrt{\beta^2 - \omega_1^2}. \quad (15)$$

Мгновенное запирание лампы:

$$t_m = \frac{1}{q-r} \ln \frac{q}{r}, \quad (16)$$

$$E_m = \frac{I}{(q-r)C_0} (\varepsilon^{-rt_m} - \varepsilon^{-qt_m}), \quad (17)$$

$$t_0 = \frac{1}{v-s} \ln \frac{v}{s}. \quad (18)$$

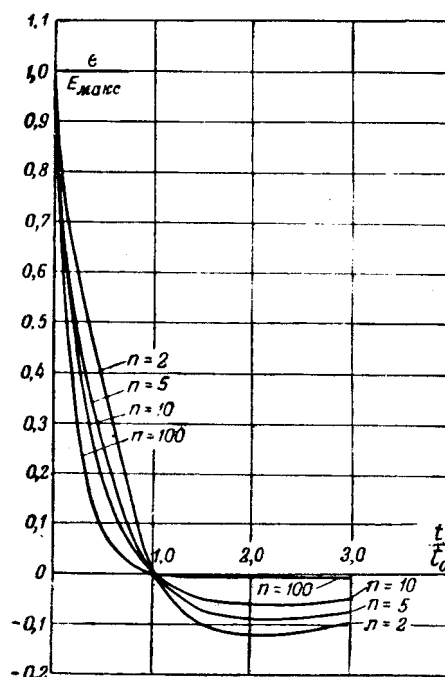


Рис. 3.

Расчет схемы и выбор лампы. Отношение

$$\frac{\varepsilon^{vt} - 1}{\varepsilon^{st} - 1} = m \text{ при постепенном запырании лампы и}$$

$\frac{v}{s} = n$ при мгновенном запырании характеризуют форму импульса. На рис. 3 показаны импульсы при различном n для случая мгновенной отсечки и $C_0 = 0$. Видно, что при $n > 10-20$ импульс приобретает форму, близкую к экспоненциальной и определение его длительности практически затруднено из-за большой полсгости спадающего фронта. Поэтому целесообразно, чтобы n или m не превышало 10-20.

Постепенное запырание лампы. Обычно при расчете схемы заданы R , C_0 , τ , E_m и t_0 и необходимо определить L , C и выбрать тип лампы.

Расчет ведем в следующем порядке: проверяем выполнение условия $RC_0 \leq 0,1 \cdot t_0$, задаемся величиной m ($1 < m < 10-20$), определяем:

$$s = \frac{1}{\tau} \ln \frac{m-1}{m-m^{\tau/t_0}}, \quad (19)$$

$$v = s + \frac{1}{t_0} \ln m, \quad (20)$$

и находим:

$$L = \frac{R}{v+s}, \quad (21)$$

$$C = \frac{1}{Lvs}. \quad (22)$$

Затем проверяем выполнение неравенства (3). Для того чтобы корни q и r были вещественны, необходимо также выполнить неравенство (4').

По формулам (12) и (11) находим q , r и t_m . Проверяем выполнение условия $t_m \leq 0,1RC$. Из формулы (13) определяем I . По найденной величине I выбираем лампу.

Величина	$C_0 = 40 \text{ мккф}, L = 25 \text{ мГ}$								$C_0 = 40 \text{ мккф}, I = 0,21 \text{ а}$			
	$R = 10 \text{ т-ом}, C = 2600 \text{ мккф}$				$R = 4,7 \text{ т-ом}, C = 8400 \text{ мккф}$				$R = 4 \text{ т-ом}$		$R = 10 \text{ т-ом}$	
	$I = 0,155 \text{ а}, \tau = 4 \text{ мксек}$		$I = 0,21 \text{ а}, \tau = 0,75 \text{ мксек}$		$I = 0,155 \text{ а}, \tau = 4 \text{ мксек}$		$I = 0,21 \text{ а}, \tau = 0,75 \text{ мксек}$		$L = 12 \text{ мГ}, \tau = 0,75 \text{ мксек}, C = 1500 \text{ мккф}$		$L = 68 \text{ мГ}, \tau = 4 \text{ мксек}, C = 6700 \text{ мккф}$	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
$t_0 \text{ мксек}$	10	9	8	7,5	17	15,2	16	13,5	3	3	24	24
$t_m \text{ мксек}$	5	4,1	2	1,5	5	4,1	1,5	1,2	1,0	0,85	5,5	4,5
$E_m \text{ в}$	700	770	1500	1600	400	480	840	880	560	540	1600	1500

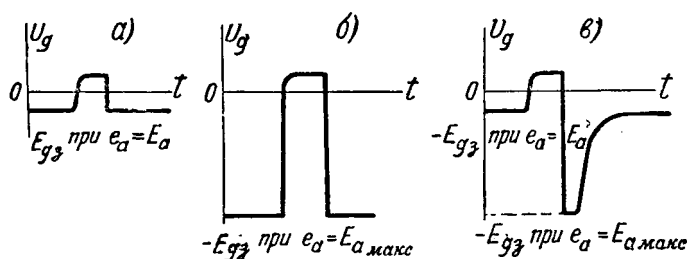


Рис. 4.

Мгновенное запирающее лампы. Задаются обычно те же величины, что и в предыдущем случае. Несложно показать, что для использования формул мгновенного запирающего лампы с необходимой для практики точностью достаточно удовлетворить условию $t_0 \geq 100\tau$. Расчет ведем в следующем порядке.

Проверяем выполнение условия $RC_0 \leq 0,1t_0$. Задаемся n ($1 < n < 10 - 20$). Затем определяем:

$$s = \frac{1}{(n-1)t_0} \ln n, \quad (23)$$

$$v = ns. \quad (24)$$

Находим $L = \frac{R}{v+s}$ и $C = \frac{1}{Lv}$. Проверяем выполнение неравенств (3) и (4') и по формулам (12) и (16) находим q , r и t_m . Проверяем выполнение условия $t_m \leq 0,1RC$. Из формулы (17) определяем I , после чего выбираем лампу.

Выбор лампы. Очевидно желательно, чтобы ток I при данном типе лампы был максимальным. Для установления этого тока при приложении к сетке положительного импульса напряжения будет достаточным время $T = 3 \frac{LI}{E_a}$.

В целях снижения анодного тока, экономии энергии источника сеточного напряжения и уменьшения рассеяния на электродах целесообразно, чтобы сетка лампы была под необходимым положительным потенциалом лишь этот промежуток времени. Форма необходимого импульса сеточного напряжения определяется типом используемой лампы. В случае тетрода или пентода значительное повышение напряжения на аноде лампы не влияет существенно на ее проводимость — лампа останется запертой при том же сеточном напряжении, при каком она заперта в

случае $e_a = E_a$. Необходимый при этом импульс напряжения дан на рис. 4,а. В случае же триода для того, чтобы лампа была заперта при E_a , необходимо иметь значительное отрицательное напряжение на сетке. Требуемое в этом случае сеточное напряжение может быть формы, показанной на рис. 4,б или 4,в. Как видно, падающий фронт сеточного напряжения, который вызывает положительный бросок напряжения на аноде в случае триода должен иметь намного большую амплитуду, чем при тетроде или пентоде. Из-за этого в случае использования триода выполнение условия крутого спада заднего фронта сеточного импульса напряжения значительно труднее, чем в случае тетрода. Выбор лампы должен также определяться допустимым пробивным напряжением, главным образом, между анодом и катодом или экранной сетками.

Эксперимент. Пригодность полученных формул для расчета была проверена на специально собранной схеме. Оконечным звеном были импульсный дроссельный каскад на лампе УТ 127, включенной тетродом при $E_a = 300 \text{ в}$ и $E_{(r)} = 300$. При проведении эксперимента не ставилась цель получить максимально возможное в данной схеме напряжение импульса. Данные приведены в таблице. В первых четырех опытах проводился проверочный расчет предварительно собранных схем, в пятом и шестом — схема заранее рассчитывалась для создания определенных импульсов. Для определения t_0 , t_m и τ использовался измерительный осциллограф со ждущей разверткой и задерживающей искусственной длительности.

Длительность импульса t_0 несколько превышает расчетную величину, что объясняется влиянием, сделанным при выводе формулы.

Сравнение опытных и расчетных данных показывает, что приведенные выше расчеты формулы практически пригодны.

Литература

1. В. Г. Карпов. Некоторые вопросы модуляции импульсных генераторов радиочастоты. Труды ЛВВА, вып. 6, 1944.
2. А. М. Бонч-Бруевич. Реактивный трансформатор напряжения. Труды ВЭТАС, вып. 7, 1944.
3. Л. Е. Машкиллейсон. Переходные процессы и перенапряжения в электрических цепях. ОНТИ, 1938.

К расчету сердечников

Кандидат техн. наук В. А. ГОВОРКОВ

Московский электротехнический институт связи

Основные уравнения зазора перекрытия. Длина магнитного поля в листах показана в нижней части рис. 1. Примем начало координат O в точку, лежащую в центре стыкового зазора. Величина потока в элементе dx зазора (между листами P и Q)

$$d\Phi = \frac{S}{2} \cdot dB_P = -\frac{S}{2} dB_Q, \quad (1)$$

$S = nd$ — площадь поперечного сечения листа;

n — ширина листа (в направлении, перпендикулярном чертежу);

dB_P — приращение магнитной индукции в листе P ;

dB_Q — убывание магнитной индукции в листе Q .

Другой стороны,

$$d\Phi = (U_{nQ} - U_{mP}) \cdot G_m \cdot dx, \quad (2)$$

U_{mQ} и U_{mP} — скалярные магнитные потенциалы листов Q и P в элементе dx ;

G_m — магнитная проводимость зазора перекрытия на единицу длины листа;

$$G_m = \mu_0 \frac{n}{\delta}, \quad (3)$$

μ_0 — магнитная проницаемость воздуха.

Приравниваем правые части уравнений (1) и (2) и дифференцируем их:

$$\frac{d^2 B_Q}{dx^2} = 2 \cdot \frac{G_m}{S} (H_Q - H_P), \quad (4)$$

$$H_Q = -\frac{dU_{mQ}}{dx} \quad \text{и} \quad H_P = -\frac{dU_{mP}}{dx} \quad \text{— значения}$$

плотности магнитного поля в материале листов Q и P в элементе dx .

Введем новую переменную:

$$v = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{G_m}} \cdot \frac{dB_Q}{dx} = \sqrt{\frac{G_m}{S}} (U_{mQ} - U_{mP}). \quad (5)$$

Приведение уравнений магнитной цепи к виду, содержащему функцию удельной энергии $W(B) = \int H dB$, однозначно определяемую по кривой намагничивания материала, позволяет решить ряд задач по практическому расчету магнитных цепей. Одной из таких задач является расчет шихтованных сердечников. Расчет ведется при постоянном намагничивании материала. Результаты пригодны и для случаев переменного намагничивания при невысокой частоте. Даются приближенные расчетные формулы, основанные на замене кривой намагничивания прямыми отрезками.

После подстановки и интегрирования уравнение (4) приобретает вид:

$$v^2 = \int_{B_1}^{B_Q} H_Q \cdot dB_Q - \int_{B_1}^{B_Q} H_P \cdot dB_Q + C; \quad (6)$$

здесь B_1 — значение магнитной индукции в листе Q при $x = \frac{\lambda}{2}$ (т. е. в пункте O_1).

Из уравнения (1) видно, что $dB_P = -dB_Q$. Сумма значений магнитной индукции в материале соседних листов в любом сечении сердечника постоянна и равна $2B_{cp}$, где B_{cp} — среднее значение индукции в стали сердечника. Поэтому верхний предел второго интеграла после замены переменной интегрирования будет $2B_{cp} - B_Q$, его нижним пределом будет величина $2B_{cp} - B_1$. Материал листов обычно одинаков; поэтому знаки Q и P можно отбросить.

В результате уравнение (6) записывается так:

$$v^2 = \int_{B_1}^{B_Q} H dB + \int_{2B_{cp}-B_1}^{2B_{cp}-B_Q} H dB + C.$$

$\int H dB$ является функцией, однозначно определяемой из кривой намагничивания материала листов (рис. 2). Обозначим ее через $W(B)$.

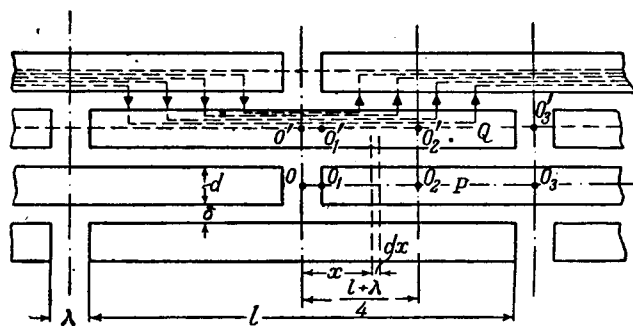


Рис. 1.

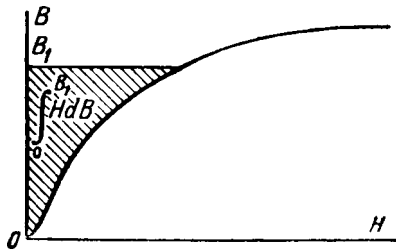


Рис. 2.

Теперь

$$v^2 = W(B) - W(B_1) + W(2B_{cp} - B) - W(2B_{cp} - B_1) + C.$$

При $x = \frac{l+\lambda}{4}$ (в пунктах O_2 и O'_2) величина индукции в обоих листах P и Q одинакова и равна B_{cp} . Это позволяет определить постоянную интегрирования C . Подставляя значение C , получаем:

$$v^2 = v_m^2 - 2W(B_{cp}) + W(B) + W(2B_{cp} - B). \quad (7)$$

Возвращаемся к переменной x , используя (5):

$$dx = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{G_m}} \cdot \frac{dB}{v}. \quad (8)$$

Интегрируя в пределах от $\frac{\lambda}{2}$ до $\frac{l+\lambda}{4}$, получим:

$$\frac{l-\lambda}{2} = -\sqrt{\frac{S}{G_m}} \cdot \int_{B_1}^{B_{cp}} \frac{dB}{v}. \quad (9)$$

Уравнение (9) связывает геометрические размеры листов с магнитными величинами.

Основные уравнения для стыкового зазора. В стыковом зазоре, в центре которого O помещено начало координат,

$$H_P = \frac{B_P}{\mu_0} = \frac{2B_{cp} - B_Q}{\mu_0}, \quad (10)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость воздуха.

Уравнение (6) принимает вид (значок Q опущен):

$$v_\lambda = \int_{B_0}^B H dB + \frac{1}{2\mu_0} [(2B_{cp} - B)^2 - (2B_{cp} - B_0)^2] + C_1,$$

где B_0 — значение магнитной индукции в пункте O' листа Q , иначе говоря, против середины стыкового зазора соседнего листа P .

Заменяем, как и прежде,

$$\int_0^B H dB = W(B).$$

Определяем постоянную C_1 . В центре стыкового зазора величина v_{λ_0} равна нулю, так как значение индукции в листе Q в пункте O' переходит через максимум [см. (5)]. Таким образом, убеждаемся, что $C_1 = 0$.

Возвращаемся к начальной переменной x и интегрируем в пределах от 0 до $\frac{\lambda}{2}$:

$$dx = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{G_m}} \cdot \frac{dB}{v_\lambda}, \quad (11)$$

$$\lambda = -\sqrt{\frac{S}{G_m}} \int_{B_0}^{B_1} \frac{dB}{v_\lambda},$$

где

$$v_\lambda^2 = W(B) - W(B_0) + \frac{1}{2\mu_0} \times \\ \times [(2B_{cp} - B)^2 - (2B_{cp} - B_0)^2].$$

Увеличение м. д. с. в шихтованном магнитном проводе. Магнитное падение напряжения на участке $O' - O'_1 - O'_2$ листа Q (рис. 1):

$$\frac{1}{2} F'_1 = \int_0^{\lambda/2} H_Q \cdot dx + \int_{\lambda/2}^{\frac{l+\lambda}{4}} H_Q \cdot dx.$$

В силу симметрии такой же величины достигнет магнитное падение напряжения на участке $O_2 - O_3$ листа P .

Магнитное падение напряжения $\frac{1}{2} F'_1$ на

участке типа $O - O_1 - O_2$ можно найти, исходя из равенства нулю линейного интеграла напряженности поля, взятого по замкнутому контуру $O - O_1 - O_2 - O'_2 - O'_1 - O' - O$. При этом следует иметь в виду, что разность скалярных магнитных потенциалов пунктов O' и O равна нулю, так как в этом месте не происходит выхода потока из листа Q .

Разность же магнитных потенциалов пунктов O'_2 и O_2 согласно (5)

$$(U_{mQ} - U_{mP})_{x=\frac{l+\lambda}{4}} = \sqrt{\frac{S}{G_m}} \cdot v_m,$$

поэтому

$$\frac{1}{2} F''_1 = \sqrt{\frac{S}{G_m}} \cdot v_m + \int_0^{\lambda/2} H_Q dx + \int_{\lambda/2}^{\frac{l+\lambda}{4}} H_Q dx.$$

Магнитное падение напряжения, приходящееся на целый лист и прилегающие к нему с обеих сторон половины стыковых зазоров (стык $l+\lambda$ магнитопровода), равно удвоенной сумме выражений (14) и (15):

$$F_1 = 4 \int_0^{\lambda/2} H_Q dx + 4 \int_{\lambda/2}^{\frac{l+\lambda}{4}} H_Q dx + 2 \sqrt{\frac{S}{G_m}} \cdot v_m.$$

Если бы магнитопровод был сделан без стыков, то магнитное падение напряжения на длине $l+\lambda$ было бы

$$F_0 = H_{cp}(l+\lambda) = 2H_{cp}\lambda + H_{cp}(l-\lambda).$$

Увеличение м. д. с., обусловленное наличием стыка,

$$F_1 - F_0 = 4 \int_0^{\lambda/2} H_Q dx - 2H_{cp}\lambda +$$

$$+ 4 \int_{\lambda/2}^{\frac{l+\lambda}{4}} H_Q \cdot dx - H_{cp}(l-\lambda) + 2 \sqrt{\frac{S}{G_m}} \cdot v_m.$$

Сделаем следующие подстановки: в первый интеграл правой части подставим значение dx из (11); во второй член подставим значение λ из (12); в третий член — значение dx из (8) и в четвертый член — значение $l - \lambda$ из (9).

Окончательный вид расчетной формулы для значения м. д. с. будет:

$$F_1 - F_0 = 2 \sqrt{\frac{S}{G_m}} \left(\int_{B_1}^{B_0} \frac{H - H_{cp}}{v_\lambda} dB + \int_{B_{cp}}^{B_1} \frac{H - H_{cp}}{v} dB + v_m \right); \quad (19)$$

— значение напряженности магнитного поля стали, соответствующее среднему значению магнитной индукции B_{cp} ; значения v_λ и v подставляются из (13) и (7).

Физический смысл слагаемых в уравнении (19) следующий.

Первое слагаемое — увеличение м. д. с. в листе, лежащей против стыкового зазора соседнего листа. Второе слагаемое — увеличение м. д. с. в прочих частях листа; оба увеличения происходят потому, что значение индукции в листе стало больше B_{cp} . Третье слагаемое — разность магнитных потенциалов между листами зазора перекрытия при $x = \frac{l + \lambda}{4}$ (рис. 1). Эта разность магнитных потенциалов существует потому, что оба предыдущих слагаемых не компенсируют полностью магнитного падения напряжения в стыковом зазоре и начальной части O_2 листа P .

Порядок проведения расчета. Для расчета используются уравнения (19), (7), (9), (12) и (13). Укажем порядок проведения расчета. Вычисляется из кривой намагничивания материала функция $W(B) = \int_0^B H dB$ и вычерчи-

вается в виде кривой (рис. 3). При заданном B_{cp} подсчитываются функции $v^2 = f_1(B)$ и $v_\lambda^2 = f_2(B)$, пользуясь значениями (7) и (13). Функция $v_2 = f_1(B)$ определяется для нескольких значений неизвестной пока величины v_m^2 ; этот расчет делается в диапазоне $B_{cp} \div 2B_{cp}$. Функция $f_3(B)$ вычисляется также для нескольких значений неизвестной пока величины B_0 , лежащей поблизости от B_{cp} ; подсчет делается в диапазоне примерно $(0,9 \div 1) \times B_{cp}$. Затем определяются функции $\frac{1}{v} = f_3(B)$ и $\frac{1}{v_\lambda} = f_4(B)$ и вычерчиваются в виде системы кривых (рис. 4). Одна из точек пересечения кривых будет решением задачи. Предположим, что точка a является таким решением. В таком случае абсцисса точек a и b (рис. 4) выражает величину магнитной индукции B_1 в пункте O_1 на рис. 1, а абсцисса точки c на рис. 4, лежащей на асимптоте кривой $\frac{1}{v_\lambda} = f_4(B)$, выражает максимальное значение индукции в листе B_0 , соответствующее пункту O' на рис. 1. Положение точки a определяет также расчетную величину v_m^2 . Заштрихованная площадь $abfg$ на рис. 4

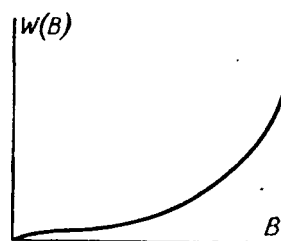


Рис. 3.

представляет, согласно уравнению (9), величину $\sqrt{\frac{G_m}{S}} \times \frac{l - \lambda}{2}$, где l — длина листа, а λ — длина стыкового зазора.

Заштрихованная площадь $abcd$ на рис. 4 выражает согласно уравнению (12) величину $\lambda \sqrt{\frac{G_m}{S}}$.

Из изложенного следует, что при проведении расчета нужно заранее вычислить величины $\sqrt{\frac{G_m}{S}} \cdot \frac{l - \lambda}{2}$ и $\lambda \sqrt{\frac{G_m}{S}}$ и затем выбрать такую точку пересечения кривых, которой соответствовали бы площади (типа заштрихованных), равные этим величинам. Отсутствие подходящей точки пересечения укажет на необходимость проведения дополнительных кривых для иных значений v_m^2 и B_0 .

Найдя указанным образом значения B_0 , B_1 и v_m^2 , вычерчивают кривые $\frac{H - H_{cp}}{v_\lambda} = f_5(B)$ и $\frac{H - H_{cp}}{v} = f_6(B)$,

где H — значение напряженности магнитного поля, соответствующее по кривой намагничивания материала данному значению индукции B , а H_{cp} — значение напряженности магнитного поля, соответствующее среднему значению индукции в сердечнике B_{cp} . Ординаты этих кривых вычисляются путем умножения на значения $H - H_{cp}$

ординат тех кривых $\frac{1}{v} = f_3(B)$ и $\frac{1}{v_\lambda} = f_4(B)$ на рис. 4,

точка пересечения которых была, как указано выше, решением задачи. Такие кривые показаны на рис. 5.

Сумма площадей A_1 и A_2 с прибавлением ранее найденной величины v_m и умноженная на $2 \sqrt{\frac{S}{G_m}}$ выразит согласно уравнению (19) увеличение м. д. с., приходящееся на один стык в нахлестку.

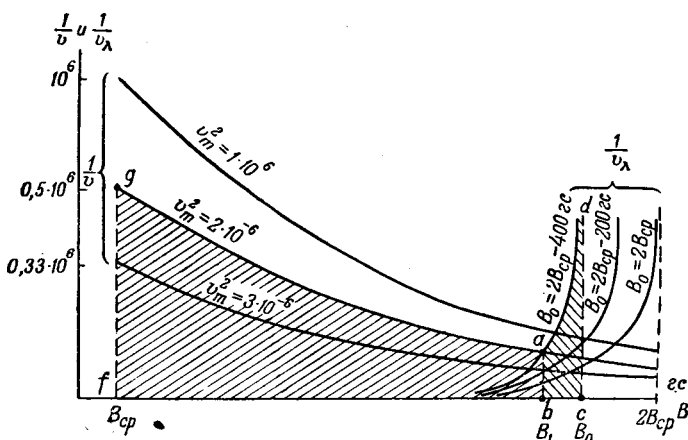


Рис. 4.

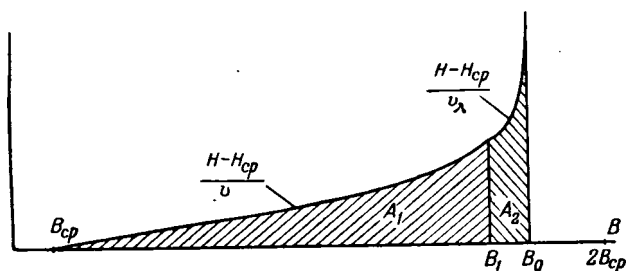


Рис. 5.

Полный расчет требует аккуратного выполнения графической работы. Особенно тщательно и в крупном масштабе следует вычерчивать кривые рис. 4, так как при малых величинах стыкового зазора, обычно встречающихся в практике, интересные расчетки точки пересечения склонны к скупиванию в одной небольшой области чертежа.

Приближенный расчет. Приближенный расчет требует выбора такого способа приближения кривой намагничивания, при котором вносимая в расчет погрешность была бы примерно одного порядка как при малых, так и при больших средних значениях индукции в магнитопроводе. Расчетные уравнения не должны получаться чрезмерно громоздкими. Поэтому целесообразно остановиться на замене кривой намагничивания ломаной линией. Первым приближением будет замена кривой двумя прямолинейными отрезками Oa и ab (рис. 6) с точкой перелома, соответствующей среднему значению индукции B_{cp} . Тангенсы углов наклона отрезков к оси абсцисс α_1 и α_2 имеют размерность проницаемости и определяются, например, в $гн/см$. Вторым приближением будет замена кривой намагничивания четырьмя прямолинейными отрезками Oa, ab, bc, cd (рис. 7) с точками перелома, соответствующими значениям индукции $0,5 B_{cp}, B_{cp}$ и $1,5 B_{cp}$.

В практических случаях расчета величина индукции в стыковом зазоре значительно меньше величины индукции в соседнем листе. Поэтому значения индукции B_1 и B_0 лежат поблизости от $2B_{cp}$, т. е. на последнем отрезке аппроксимирующей ломаной линии.

Расчет увеличения м. д. с., приходящегося на один стык, делается по следующим формулам (приложения 1, 2): в первом приближении

$$F_1 - F_0 = \left(2B_{cp} + \frac{H_2}{\gamma^2} \right) \lambda \operatorname{ctg} \alpha_2 + 2 \sqrt{\frac{S}{G_m}} (a_1 v_1 + a_m v_m);$$

во втором приближении

$$F_1 - F_0 = H_3 \lambda + 2 \sqrt{\frac{S}{G_m}} \times [b_1 v_1 + b_{1,5} (v_{1,5} + W'') + b_m v_m].$$

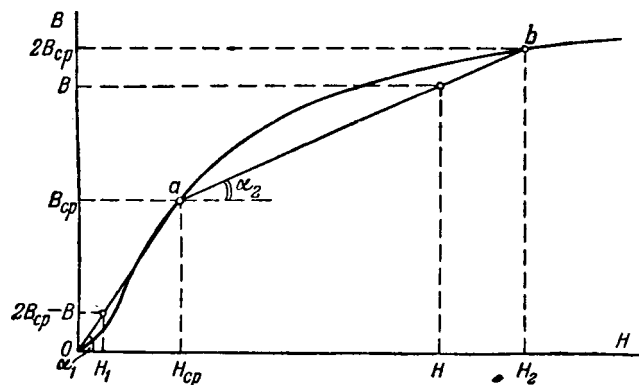


Рис. 6.

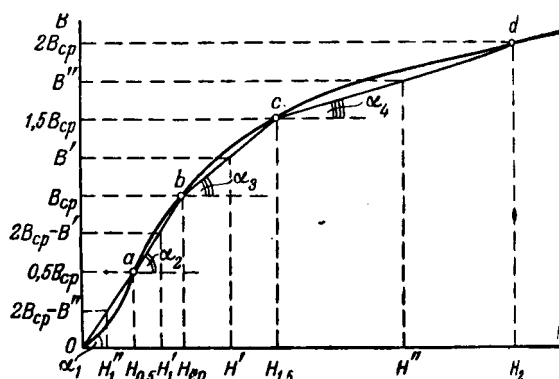


Рис. 7.

Выводы этих выражений и значения входящих в них коэффициентов приведены в приложениях 1, 2. Порядок проведения числовых расчетов виден из примеров, приведенных в приложении 3.

Опытная проверка. Проверка производилась на двух кольцеобразных сердечниках, собранных из стальных листов толщиной $0,032$ см и покрытых с обеих сторон шеллаком. Кривая намагничивания материала показана на рис. 8. Один сердечник был собран из 19 цельных колец, другой — внахлестку из такого же числа колец, разрубленных пополам по диаметру. На оба сердечника наклеивались по две более или менее равномерно распределенные обмотки: одна — обмотка возбуждения, вторая — измерительная обмотка. С обоих сердечников снимались малые характеристики помощью баллистического гальванометра. Из сравнения их определялось увеличение м. д. с., приходящееся на один стык при различных средних значениях индукции в обоих сердечниках. После проведения измерений обмотки были сняты, оба сердечника разобраны и собраны вновь, но с увеличенным зазором перекрытия; для этого между листами прокладывалась бумага. Затем обмотки были восстановлены и измерения повторены. На рис. 9 показаны опытные и расчетные кривые. По оси абсцисс отложено среднее значение индукции, по оси ординат — абсолютное увеличение м. д. с. в ампервитках, приходящееся на один стык. Видно из рис. 9, опытные и расчетные кривые в общем удовлетворительно согласуются друг с другом. Расхождение порядка 30% при средних насыщениях ($B_{cp} = 4000 - 7000$ гс) объясняется неточностями в определении действительной длины стыкового зазора, так как рубка стыков была сделана недостаточно тщательно.

Влияние качества сборки сердечников. Сравнение стыков. Для целей сравнения удобно пользоваться значениями увеличения м. д. с., определяемого наличием стыков в магнитопроводе. Относительные значения исчисляются в процентах от величины м. д. с., требующейся для проведения потока в стали листов.

На рис. 10 представлено несколько характерных кривых. Кривая I' построена по опытным данным для шихтованного сердечника при среднем стыковом зазоре $\lambda \approx 0,005$ см; кривая I построена для такого же нешихтованного сердечника.

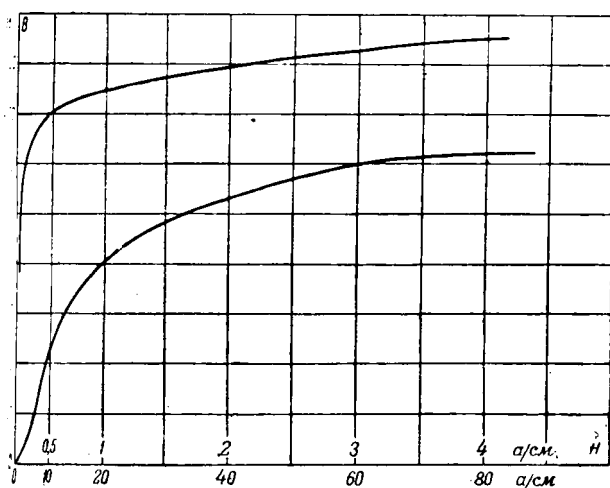


Рис. 8.

тем сердечник был разобран и собран заново с заведомо увеличенным значением длины стыкового зазора, порядка 0,05 см; кривая 2 построена по результатам измерений, сделанных после второй сборки сердечника. Кривая 2' получена расчетом для нешлифованного стыка того же размера (0,05 см). Далее, сердечник был разобран и собран вновь с увеличенным углом перекрытия, для чего, как указано выше, между листами прокладывалась бумага. В сборке в этом случае был установлен стыковой зазор около 0,1 см. Опытная характеристика сердечника в этом случае представлена кривой 3.

Наконец, кривые 4 и 4' получены расчетом в случае высокого качества сборки сердечника (стыковой зазор принят равным 0,001 см). Кривая 4' соответствует шлифованному сердечнику, а кривая 4 — нешлифованному.

Сравнение кривых рис. 10 показывает, что процентное увеличение м. д. с., приходящееся на один стык, имеет заметный максимум. В шлифованном сердечнике при стальных листах максимум соответствует среднему значению индукции порядка 11 000—12 000 гс; при этом действительное значение индукции в листах, участках типа O' на рис. 1, т. е. лежащих про стыков соседних листов, имеет почти удвоенное значение, порядка 22 000—23 000 гс. При дальнейшем увеличении среднего значения индукции процентное увеличение м. д. с. становится меньше. Причина та, что местное насыщение становится настолько большим, что м. д. с., обуславливаемая для проведения потока через сталь, растет с увеличением индукции гораздо быстрее, чем м. д. с., необходимая для проведения этого же потока через стыковые зазоры. Значения м. д. с., разумеется, продолжают возрастать по их абсолютным величинам. Максимум процентного увеличения м. д. с. в нешлифованных стыках приходится на среднее значения индукции в стали порядка 6 000 гс: цифра в два раза меньше упомянутого выше значения для сборки внахлестку. Этого следова-

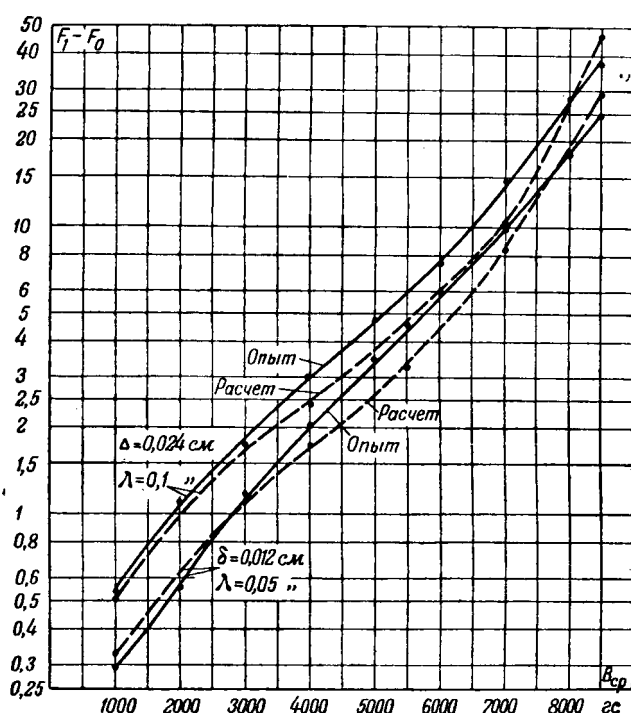


Рис. 9.

ло ожидать, если принять во внимание более или менее равномерное намагничивание стали при нешлифованном стыке и отсутствие удвоения индукции в отдельных местах листов, характерного при сборке сердечника внахлестку.

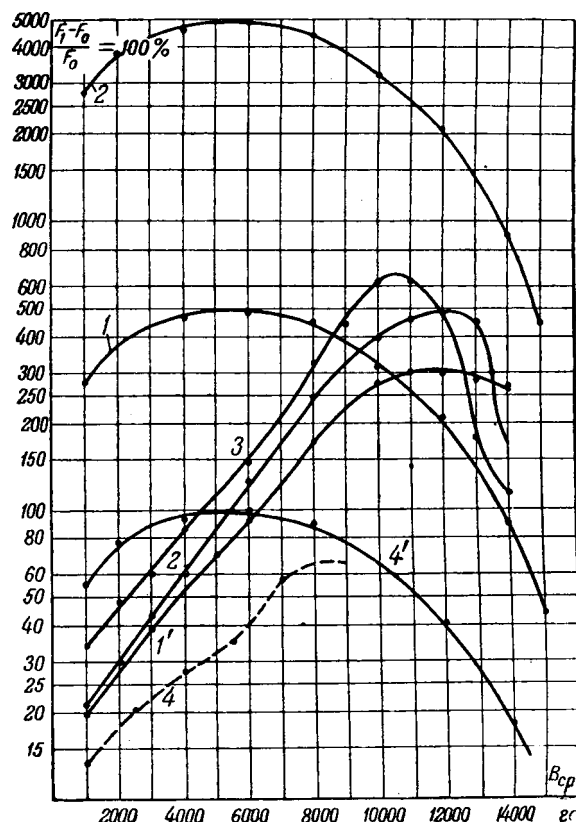


Рис. 10.

Следует, по возможности, избегать вообще устройства стыков в магнитопроводе, особенно при малых его размерах. Штамповка цельных листов, а не частей их вызывает удорожание стоимости сердечника, но дает существенный выигрыш в меди обмотки, не считая экономии в эксплуатации электроэнергии на возбуждение.

Если устройство стыков неизбежно, то весьма важна тщательная регулировка штампа в отношении точности и тщательности вырубки краев: после рубки те края, между которыми будет существовать стыковой зазор, следует подвергнуть выравниванию и удалить с них заусенец с тем, чтобы при последующей сборке сердечника можно было получить минимальные стыковые зазоры.

При малых и средних насыщениях шихтовка сердечника выгоднее, чем сборка встык. Например, при $B_{cp} = 4000$ гс по кривым 2 и 2' имеем, что шихтовка потребует увеличения м. д. с. примерно на 62% на каждый стык, в то время как сборка встык потребовала бы увеличения м. д. с. на 4700%. Другими словами, в этом случае при шихтовке получаем снижение намагничивающего тока в 30 раз по сравнению со сборкой встык. При этом желательно обеспечить как можно более плотное прилегание листов друг к другу для уменьшения зазора перекрытия.

Если в целях снижения веса желательны очень большие насыщения материала, сборка встык может оказаться более выгодной, особенно при тщательном выполнении, когда стыковые зазоры доводятся до минимума. Это объясняется тем обстоятельством, что при высоких средних значениях индукции в материале листов наступает при шихтовке весьма сильное местное насыщение, сердечник перестает работать так, как это ожидается, т. е. с переходом потока из данного листа в соседний для обхода стыкового зазора. Работа сердечника все более и более приближается к случаю сборки встык с удвоенным количеством зазоров.

Выводы справедливы для рассмотренных условий работы сердечника на низкой частоте.

Приложение 1. Вывод формул для аналитического расчета в первом приближении. При замене кривой намагничивания ломаной Oab (рис. 6) функция $W(B)$ для какого-либо значения индукции B , лежащего в пределах $B_{cp} \div 2B_{cp}$,

$$W(B) = W(B_{cp}) + (B - B_{cp})^2 \frac{\text{ctg } \alpha_2}{2} + (B - B_{cp}) \cdot H_{cp}.$$

Функция

$$W(2B_{cp} - B) = W(B_{cp}) + (B - B_{cp})^2 \frac{\text{ctg } \alpha_1}{2} - (B - B_{cp}) \cdot H_{cp}.$$

Подставляя эти выражения в уравнение (7), получаем приближенное значение функции v^2 :

$$v^2 = v_m^2 + (B - B_{cp})^2 \beta^2, \quad (20)$$

где

$$\beta^2 = \frac{\text{ctg } \alpha_1 + \text{ctg } \alpha_2}{2}. \quad (21)$$

Подставляем (20) в (9) и интегрируем:

$$\begin{aligned} \frac{l - \lambda}{2} \sqrt{\frac{G_m}{S}} &= - \int_{B_1}^{B_{cp}} \frac{dB}{v_m^2 + \beta^2 (B - B_{cp})^2} = \\ &= \frac{1}{\beta} \text{Arsh} \frac{\beta}{v_m} (B_1 - B_{cp}), \\ B_1 - B_{cp} &= \frac{v_m}{\beta} \text{sh } \delta, \end{aligned}$$

где

$$\delta = \frac{l - \lambda}{2} \sqrt{\frac{G_m}{S}} \beta.$$

Для области листа, лежащей против стыкового зазора выражение для функции $W(B)$ можно написать в виде (рис. 6):

$$W(B) = W(2B_{cp}) + (2B_{cp} - B)^2 \frac{\text{ctg } \alpha_2}{2} - H_2 (2B_{cp} - B).$$

Подставим это выражение в (13):

$$\begin{aligned} v_\lambda^2 &= \gamma^2 [(2B_{cp} - B)^2 - (2B_{cp} - B_0)^2] - \\ &- H_2 [(2B_{cp} - B) - (2B_{cp} - B_0)], \end{aligned}$$

где

$$\gamma^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} + \text{ctg } \alpha_2 \right).$$

Для определения пограничного значения v_1 и величины индукции в листе против края листа $2B_{cp} - B_1$ подставим (24) в (12) и проинтегрируем:

$$\lambda \sqrt{\frac{G_m}{S}} = - \int_{B_0}^{B_1} \frac{dB}{v_\lambda} = - \frac{1}{\gamma} \text{Arch} \frac{(2B_{cp} - B_1) - H_2}{(2B_{cp} - B_0) - H_2}.$$

Отсюда следует:

$$2B_{cp} - B_1 - \frac{H_2}{2\gamma^2} = \left(2B_{cp} - B_0 - \frac{H_2}{2\gamma^2} \right) \text{ch } \mu,$$

где

$$\mu = \lambda \sqrt{\frac{G_m}{S}} \gamma.$$

Определим неизвестные величины v_m и B_0 . В центре листа Q (рис. 7), лежащем против границы между седним листом и стыковым зазором, значения v_1 и v_λ , определяемые по (20) и (24), должны быть равны. Кроме того, должны быть равны и значения индукции в этом пункте B_1 , определяемые уравнениями (22) и (24). Таким образом, путем подстановок (22) в (20) и (24) при $B = B_1$ и приравнивания правых частей полученных уравнений придем к выражению:

$$v_1 = v_m \text{ch } \delta = \gamma \left(2B_{cp} - B_0 - \frac{H_2}{2\gamma^2} \right) \text{sh } \mu.$$

Приравняв же значения B_1 , определяемые уравнениями (22) и (26), получаем:

$$B_{cp} - \frac{H_2}{2\gamma^2} - \frac{v_m}{\beta} \text{sh } \delta = \left(2B_{cp} - B_0 - \frac{H_2}{2\gamma^2} \right) \text{ch } \mu.$$

Совместное решение (28) и (29) дает следующие:

$$v_m = \left(B_{cp} - \frac{H_2}{2\gamma^2} \right) \frac{\gamma \text{sh } \mu}{A},$$

$$\left(2B_{cp} - B_0 - \frac{H_2}{2\gamma^2} \right) = \left(B_{cp} - \frac{H_2}{2\gamma^2} \right) \frac{\text{ch } \delta}{A},$$

где

$$A = \text{ch } \delta \text{ch } \mu + \frac{\gamma}{\beta} \text{sh } \delta \cdot \text{sh } \mu.$$

Для вычисления увеличения м. д. с., приходящегося на один шихтованный стык, подставляем выведенные для нас выражения (20) и (24) в уравнение (19), имея в виду, что, как это видно из рис. 6, величина $H = H_{cp}$, входящая в числитель первого подинтегрального выражения, может быть заменена через $[B_{cp}(2B_{cp} - B)] \operatorname{ctg} \alpha_2$; величина во втором подинтегральном выражении заменяется через

$$(B - B_{cp}) \operatorname{ctg} \alpha_2.$$

Таким образом,

$$F_1 - F_0 = 2 \sqrt{\frac{S}{G_m}} \left\{ \int_{B_1}^{B_0} \frac{[B_{cp} - (2B_{cp} - B)] \operatorname{ctg} \alpha_2}{v_\lambda} dB + \int_{B_{cp}}^{B_1} \frac{(B - B_{cp}) \operatorname{ctg} \alpha_2}{v} dB + v_m \right\}.$$

После интегрирования, подстановки пределов и упрощений получаем расчетную формулу:

$$F_1 - F_0 = \left(2B_{cp} + \frac{H_2}{\gamma^2} \right) \lambda \operatorname{ctg} \alpha_2 + 2 \sqrt{\frac{S}{G_m}} (a_1 v_1 + a_m v_m), \quad (33)$$

$$a_1 = \operatorname{ctg} \alpha_2 \left(\frac{1}{\beta^2} - \frac{1}{\gamma^2} \right). \quad (34)$$

$$a_m = 1 - \frac{\operatorname{ctg} \alpha_2}{\beta^2}. \quad (35)$$

Значения v_m и v_1 находятся по (30) и (28).

Приложение 2. Вывод формул для аналитического расчета во втором приближении. При замене кривой индуктивания ломаной, состоящей из четырех отрезков, точками излома, соответствующими значениям индукции B_{cp} , B_{cp} и $1,5 B_{cp}$ (рис. 7), функция WB в диапазоне $B_{cp} - 1,5 B_{cp}$ (например, для некоторого значения функции B), будет:

$$W(B) = W(B_{cp}) + (B' - B_{cp})^2 \frac{\operatorname{ctg} \alpha_3}{2} + (B' - B_{cp}) H_{cp}.$$

В том же диапазоне

$$W(2B_{cp} - B') = W(B_{cp}) + (B' - B_{cp})^2 \frac{\operatorname{ctg} \alpha_2}{2} - (B' - B_{cp}) H_{cp}.$$

Подставляя эти выражения в уравнение (7), имеем, что в диапазоне $B_{cp} - 1,5 B_{cp}$

$$v^2 = v_m^2 + (B' - B_{cp})^2 \xi^2, \quad (36)$$

$$\xi^2 = \frac{\operatorname{ctg} \alpha_2 + \operatorname{ctg} \alpha_3}{2}. \quad (37)$$

При $B' = 1,5 B_{cp}$ функция v^2 принимает значение, равное:

$$v_{1,5}^2 = v_m^2 + \left(\frac{B_{cp}}{2} \right)^2 \xi^2. \quad (38)$$

В диапазоне $1,5 B_{cp} - 2B_{cp}$ для некоторого значения функции, например B'' , аналогичные значения функции W согласно рис. 7 будут:

$$W(B'') = W(1,5 B_{cp}) + (B'' - 1,5 B_{cp})^2 \frac{\operatorname{ctg} \alpha_1}{2} + (B'' - 1,5 B_{cp}) H_{1,5},$$

$$\begin{aligned} W(2B_{cp} - B'') &= W(0,5 B_{cp}) + \\ &+ [0,5 B_{cp} - (2B_{cp} - B'')]^2 \frac{\operatorname{ctg} \alpha_1}{2} - \\ &- [0,5 B_{cp} - (2B_{cp} - B'')] H_{0,5} = W(0,5 B_{cp}) + \\ &+ (B'' - 1,5 B_{cp})^2 \frac{\operatorname{ctg} \alpha_1}{2} - (B'' - 1,5 B_{cp}) H_{0,5}. \end{aligned}$$

Рассматривая рис. 7 и вышенаписанные формулы для $W(B')$ и $W(2B_{cp} - B')$, нетрудно доказать, что

$$\begin{aligned} W(1,5 B_{cp}) + W(0,5 B_{cp}) &= 2W(B_{cp}) + \left(\frac{B_{cp}}{2} \right)^2 \xi^2, \\ H_{1,5} - H_{0,5} &= B_{cp} \xi^2. \end{aligned}$$

Подстановка написанных выражений в уравнение (7) приводит к следующему уравнению для функции v^2 в диапазоне $1,5 B_{cp} - 2B_{cp}$:

$$v''^2 = v_{1,5}^2 + \eta^2 (B'' - 1,5 B_{cp})^2 + B_{cp} \xi^2 (B'' - 1,5 B_{cp}), \quad (39)$$

где

$$\eta^2 = \frac{\operatorname{ctg} \alpha_4 + \operatorname{ctg} \alpha_1}{2}. \quad (40)$$

При $B'' = B_1$, т. е. в пункте O'_1 листа Q , лежащем против края соседнего листа P (рис. 1), функция v''^2 принимает значение v_1^2 :

$$v_1^2 = v_{1,5}^2 + \eta^2 (B_1 - 1,5 B_{cp})^2 + B_{cp} \xi^2 (B_1 - 1,5 B_{cp}). \quad (41)$$

Интеграл $\int_{B_1}^{B_{cp}} \frac{dB}{v}$, входящий в уравнение (9), теперь разбивается на два интеграла:

$$\sqrt{\frac{G_m}{S}} \frac{t - \lambda}{2} = \int_{1,5 B_{cp}}^{B_1} \frac{dB''}{v''} + \int_{B_{cp}}^{1,5 B_{cp}} \frac{dB'}{v}.$$

Левую часть этого выражения разобьем на два слагаемых:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{G_m}{S}} \cdot \frac{t - \lambda}{2} &= \sqrt{\frac{G_m}{S}} \cdot \frac{t' - \lambda}{2} + \\ &+ \sqrt{\frac{G_m}{S}} \cdot \frac{t - t'}{2} = \frac{\delta'}{\xi} + \frac{\delta''}{\eta}. \end{aligned} \quad (42)$$

с таким расчетом, чтобы

$$\int_{B_{cp}}^{1,5 B_{cp}} \frac{dB'}{v'} = \frac{\delta'}{\xi} \quad (43)$$

и

$$\int_{1,5 B_{cp}}^{B_1} \frac{dB''}{v''} = \frac{\delta''}{\eta}. \quad (44)$$

Легко видеть, что $\frac{t'}{4}$ будет абсциссой пункта в листе Q (рис. 1), где значение индукции равно $1,5 B_{cp}$.

Подставляем (36) в (43) и интегрируем:

$$\delta' = \operatorname{Arsh} \frac{B_{cp} \xi}{2 v_m}$$

или

$$\frac{B_{cp}}{2} \xi = v_m \operatorname{sh} \delta'. \quad (45)$$

После подстановки этого выражения в уравнение (38) имеем:

$$v_{1,5} = v_m \operatorname{ch} \delta'. \quad (46)$$

Теперь подставляем (39) в (44) и интегрируем:

$$\delta'' = \operatorname{Arsh} \frac{\eta(B_1 - 1,5 B_{cp}) + W}{\sqrt{v_{1,5}^2 - W^2}} - \operatorname{Arsh} \frac{W}{\sqrt{v_{1,5}^2 - W^2}}, \quad (47)$$

где

$$W = \frac{B_{cp} \xi^2}{2\eta}. \quad (48)$$

Выполняя преобразование разности арксинусов, получаем выражение

$$v_{1,5}^2 - 2 \frac{\eta(B_1 - 1,5 B_{cp}) + W}{\operatorname{sh} \delta''} - v_{1,5}^2 + \frac{[\eta(B_1 - 1,5 B_{cp})]^2 + 2W\eta(B_1 - 1,5 B_{cp})}{\operatorname{sh}^2 \delta''} - W^2 = 0.$$

Это квадратное уравнение решается относительно $v_{1,5}$:

$$v_{1,5} = \frac{\eta(B_1 - 1,5 B_{cp}) - W(\operatorname{ch} \delta'' - 1)}{\operatorname{sh} \delta''}.$$

Второй корень этого уравнения отличается лишь наличием отрицательного знака перед гиперболическим косинусом в числителе. Физического смысла этот корень не имеет. Действительно, предположим, что стыковой зазор будет небольшим, так что величина индукции B_1 против края соседнего листа стремится к $1,5 B_{cp}$. В этом случае величина δ'' стремится к нулю. Величина же $v_{1,5}$, пропорциональная разности магнитных потенциалов между соседними листами в зазоре перекрытия, не может обратиться в бесконечность.

Из предыдущей формулы следует, что:

$$\begin{aligned} B_1 - 1,5 B_{cp} &= \frac{1}{\eta} [v_{1,5} \operatorname{sh} \delta'' + W(\operatorname{ch} \delta'' - 1)] = \\ &= \frac{v_m}{\eta} \left[\operatorname{ch} \delta' \operatorname{sh} \delta'' + \frac{\xi}{\eta} \operatorname{sh} \delta' (\operatorname{ch} \delta'' - 1) \right]. \end{aligned} \quad (49)$$

Подставляя (49) в (41), получим соотношение между v_1 и v_m :

$$v_1 = v_{1,5} \operatorname{ch} \delta'' + W \operatorname{sh} \delta'' = v_m \left(\operatorname{ch} \delta' \operatorname{ch} \delta'' + \frac{\xi}{\eta} \operatorname{sh} \delta' \operatorname{sh} \delta'' \right). \quad (50)$$

Обращаясь теперь к области $O' - O'_1$ листа Q (рис. 1), заметим, что уравнения (24) — (27), выведенные в предыдущем расчете в первом приближении, сохраняют свой характер и теперь при условии замены угла α_2 рис. 6 углом α_4 рис. 7. Используя аналогию, записываем:

$$\left(2 B_{cp} - B_1 - \frac{H_2}{2\sqrt{2}} \right) = \left(2 B_{cp} - B_0 - \frac{H_2}{2\sqrt{2}} \right) \operatorname{ch} \mu, \quad (51)$$

где

$$\mu = \lambda \sqrt{\frac{G_m}{S}} v, \quad (52)$$

$$v^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} + \operatorname{ctg} \alpha_4 \right), \quad (53)$$

$$\begin{aligned} v_\lambda^2 &= v^2 \left[(2 B_{cp} - B)^2 - (2 B_{cp} - B_0)^2 \right] - \\ &- H_2 [(2 B_{cp} - B)] - (2 B_{cp} - B_0). \end{aligned} \quad (54)$$

Пограничное значение v_λ при $B = B_1$ после подстановки из (51) и упрощений оказывается равным:

$$v_{\lambda_1} = v \sqrt{2 B_{cp} - B_0 - \frac{H_2}{2\sqrt{2}}} \operatorname{sh} \mu. \quad (55)$$

Как и следовало ожидать, эта формула совпадает с (28).

Приравнявая правые части (50) и (55), а также значения индукции B_1 , определяемые уравнениями (49) и (51), получаем возможность определения параметров v_m и C . После преобразований получается:

$$\begin{aligned} 2 B_{cp} - B_0 - \frac{H_2}{2\sqrt{2}} &= \\ &= \frac{1}{C} \left[\left(\frac{B_{cp}}{2} - \frac{H_2}{2\sqrt{2}} \right) \cdot \operatorname{ch} \delta'' + \frac{W}{\eta} (\operatorname{ch} \delta'' - 1) \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_m &= \frac{1}{C \cdot \operatorname{ch} \delta'} \left\{ \left(\frac{B_{cp}}{2} - \frac{H_2}{2\sqrt{2}} \right) v \cdot \operatorname{sh} \mu - \right. \\ &- W \left[\operatorname{ch} \mu \cdot \operatorname{sh} \delta'' + \frac{v}{\eta} \operatorname{sh} \mu (\operatorname{ch} \delta'' - 1) \right] \left. \right\}, \end{aligned}$$

где

$$C = \operatorname{ch} \mu \cdot \operatorname{ch} \delta'' + \frac{v}{\eta} \operatorname{sh} \mu \cdot \operatorname{sh} \delta''.$$

Для определения входящих в эти формулы неизвестных величин δ' и δ'' приравняем друг другу значения, определяемые уравнениями (45) и (57). Получится соотношение:

$$\operatorname{th} \delta' = \frac{\eta \cdot \operatorname{cth} \mu \cdot \operatorname{ch} \delta'' + v \operatorname{sh} \delta''}{D_1 v - \frac{\xi}{\eta} (v \operatorname{ch} \delta'' + \eta \operatorname{cth} \mu \operatorname{sh} \delta'')},$$

где

$$D_1 = \left(\frac{\eta}{\xi} + \frac{\xi}{\eta} \right) - \frac{H_2 \eta}{v^2 \xi B_{cp}}.$$

В целях дальнейшего упрощения сделаем подстановку (полагая, что $\eta \operatorname{cth} \mu < v$):

$$z = \sqrt{v^2 - \eta^2 \operatorname{cth}^2 \mu}, \quad \operatorname{th} y = \frac{\eta}{v} \cdot \operatorname{cth} \mu.$$

В таком случае

$$\operatorname{th} \delta' = \frac{\operatorname{sh}(y + \delta'')}{D_1 \cdot \operatorname{ch} y - \frac{\xi}{\eta} \operatorname{ch}(y + \delta'')}.$$

Искомые корни δ' и δ'' определяются теперь системой уравнений (42) и (61). Определение корней можно сделать подбором, дав уравнению (42) такой вид:

$$\delta' = P - \frac{\xi}{\eta} \delta'',$$

где

$$P = \sqrt{\frac{G_m}{S}} \cdot \frac{l - \lambda}{2} \cdot \xi.$$

В случае, когда $\eta \operatorname{cth} \mu > v$, прибегают к другой постановке:

$$\eta \cdot \operatorname{cth} \mu = z_1 \operatorname{ch} y_1; \quad v = z_1 \operatorname{sh} y_1.$$

Тогда

$$\operatorname{th} y_1 = \frac{v}{\eta \cdot \operatorname{cth} \mu}$$

и уравнение (61) приводится к виду:

$$\operatorname{th} \delta' = \frac{\operatorname{ch}(y_1 - \delta'')}{D_1 \operatorname{sh} y_1 - \frac{\xi}{\eta} \operatorname{sh}(y_1 + \delta'')}.$$

Корни δ' и δ'' находятся в этом случае из системы уравнений (61а) и (62).

Переходим теперь к расчету увеличения м. д. с. иходящегося на один шихтованный стык.

Подобно сделанной выше разбивке [уравнения (44)] разбиваем второй интеграл уравнения (19) на

выражение (19) принимает вид:

$$I - F_0 = 2 \sqrt{\frac{S}{G_m}} \left(\int_{B_1}^{B_0} \frac{H - H_{cp}}{v_\lambda} dB + \int_{1,5 B_{cp}}^{B_1} \frac{H - H_{cp}}{v''} dB'' + \int_{B_{cp}}^{1,5 B_{cp}} \frac{H - H_{cp}}{v'} dB' + v_m \right). \quad (64)$$

Входящие в числители подинтегральных выражений величины $H - H_{cp}$ выражаются согласно рис. 7 так: в первом интеграле (пределы $B_1 - B_0$)

$$H - H_{cp} = (H_2 - H_{1,5}) + (H_{1,5} - H_{cp}) - (H_2 - H) = \frac{B_{cp}}{2} (\operatorname{ctg} \alpha_4 + \operatorname{ctg} \alpha_3) - (2 B_{cp} - B) \operatorname{ctg} \alpha_4,$$

во втором интеграле (пределы $1,5 B_{cp} - B_1$)

$$H - H_{cp} = (H - H_{1,5}) + (H_{1,5} - H_{cp}) = (B - 1,5 B_{cp}) \cdot \operatorname{ctg} \alpha_4 + \frac{B_{cp}}{2} \operatorname{ctg} \alpha_3,$$

в третьем интеграле (пределы $B_{cp} - 1,5 B_{cp}$):

$$H - H_{cp} = (B - B_{cp}) \operatorname{ctg} \alpha_3.$$

Производим эти подстановки в (64). Подставляем туда значения v_λ , v'' и v' из (54), (39) и (36).

После интегрирования и подстановки пределов получаем:

$$F_1 - F_0 = 2 \sqrt{\frac{S}{G_m}} \left\{ \left\{ \frac{B_{cp}}{2v} (\operatorname{ctg} \alpha_3 + \operatorname{ctg} \alpha_4) \times \right. \right. \\ \times \operatorname{Arch} \frac{2 B_{cp} - B_1 - \frac{H_2}{2\sqrt{2}}}{2 B_{cp} - B_0 - \frac{H_2}{2\sqrt{2}}} - \frac{\operatorname{ctg} \alpha_4}{\sqrt{2}} \times \\ \left. \left. \sqrt{\frac{[(2 B_{cp} - B_1)^2 - (2 B_{cp} - B_0)^2] - H_2[(2 B_{cp} - B_1) - (2 B_{cp} - B_0)]}{2}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{H_2}{2\sqrt{2}} \operatorname{Arch} \frac{2 B_{cp} - B_1 - \frac{H_2}{2\sqrt{2}}}{2 B_{cp} - B_0 - \frac{H_2}{2\sqrt{2}}} \right\} + \frac{\operatorname{ctg} \alpha_4}{v_1^2} (v_1 - v_{1,5}) + \right. \\ \left. - \left(\frac{B_{cp} \operatorname{ctg} \alpha_3}{2\eta} - \frac{W \cdot \operatorname{ctg} \alpha_4}{v_1^2} \right) \cdot \left[\operatorname{Arsh} \frac{\eta (B_1 - 1,5 B_{cp}) + W}{\sqrt{v_{1,5}^2 - W^2}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \operatorname{Arsh} \frac{W}{\sqrt{v_{1,5}^2 - W^2}} \right] + \frac{\operatorname{ctg} \alpha_3}{\xi^2} (v_{1,5} - v_m) + v_m \right\}.$$

Это выражение можно существенно упростить. Согласно (51) и (52) арксинус в первом члене в двойных

скобках равен $\lambda \sqrt{\frac{G_m}{S}}$. Ту же величину имеет

арксинус во втором члене; согласно (54), (51) и (55) изл во втором члене равняется v_1 . Согласно (48) вся скобка (первый множитель) в четвертом члене

равна $W \left(\frac{\operatorname{ctg} \alpha_3}{\xi^2} - \frac{\operatorname{ctg} \alpha_4}{\eta^2} \right)$; согласно (47) стоящая в квадратной

скобке разность арксинусов равна величине δ'' . Таким образом, расчетная формула получает окончательный вид:

$$F_1 - F_0 = H_3 \lambda + 2 \sqrt{\frac{S}{G_m}} \left[b_1 v_1 + b_{1,5} (v_{1,5} + W \delta'') + b_m v_m \right], \quad (65)$$

где

$$H_3 = (\operatorname{ctg} \alpha_3 + \operatorname{ctg} \alpha_4) B_{cp} + \frac{H_2 \operatorname{ctg} \alpha_4}{\sqrt{2}}, \quad (66)$$

$$b_1 = \operatorname{ctg} \alpha_4 \left(\frac{1}{\eta^2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right), \quad (67)$$

$$b_{1,5} = \frac{\operatorname{ctg} \alpha_3}{\xi^2} - \frac{\operatorname{ctg} \alpha_4}{\eta^2}, \quad (68)$$

$$b_m = 1 - \frac{\operatorname{ctg} \alpha_3}{\xi^2}. \quad (69)$$

Величины v_1 , $v_{1,5}$, v_m и W определяются по (50), (46), (57) и (48); δ' и δ'' — корни системы уравнений (61) и (62); вспомогательные величины ξ , η , γ и m определяются по (37) (40), (52) и (53).

Приложение 3. Примеры. Сердечник собран из стальных листов следующих геометрических размеров (рис. 1):

$$l = 7,38 \text{ см}; d = 0,0317 \text{ см}; n = 1,5 \text{ см};$$

$$S = 0,0475 \text{ см}^2; \delta = 0,012 \text{ см}.$$

Кривая намагничивания дана на рис. 8.

Рассчитаем увеличение м. д. с., приходящееся на один шихтованный стык при $B_{cp} = 7000 \text{ гс} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ в} \cdot \text{сек/см}^2$ и длине стыкового зазора $\lambda = 0,05 \text{ см}$.

По (3):

$$G_m = 4\pi \cdot 10^{-9} \cdot \frac{1,5}{0,012} = 1,57 \cdot 10^{-6} [\text{гн/см}],$$

$$2 \sqrt{\frac{S}{G_m}} = 2 \sqrt{\frac{4,75 \cdot 10^{-2}}{1,57 \cdot 10^{-6}}} = 348.$$

Расчет в первом приближении. По рис. 6 и 8:

$$\operatorname{ctg} \alpha_1 = \frac{0,78}{7 \cdot 10^{-5}} = 1,11 \cdot 10^4; \operatorname{ctg} \alpha_2 = \frac{8,5 - 0,78}{7 \cdot 10^{-5}} = 11 \cdot 10^4.$$

По (21): $\beta^2 = 6,055 \cdot 10^4$; $\beta = 246$.

По (25): $\gamma^2 = 39,89 \cdot 10^6$; $\gamma = 6311$.

По (23): $\delta = 5,21$; $\operatorname{sh} \delta \approx \operatorname{ch} \delta = 91,5$.

По (27): $m = 1,815$; $\operatorname{sh} m = 2,99$; $\operatorname{ch} m = 3,15$.

По (32): $a = 7288$.

По (31):

$$2 B_{cp} - B_0 - \frac{H_2}{2\gamma^2} \left(7 \cdot 10^{-5} - \frac{8,5}{2 \cdot 39,89 \cdot 10^6} \right) \cdot \frac{91,5}{7288} = 8,77 \cdot 10^{-7} \text{ в} \cdot \text{сек/см}^2.$$

По (28): $v_1 = 6311 \cdot 8,77 \cdot 10^{-7} \cdot 2,99 = 16,6 \cdot 10^{-3}$;

$$v_m = \frac{16,6 \cdot 10^{-3}}{91,5} = 1,812 \cdot 10^{-4}.$$

По (34): $a_1 = 1,815$.

По (35): $a_m = 0,817$.

По (33):

$$F_1 - F_0 = \left(14 \cdot 10^{-5} + \frac{8,5}{39,89 \cdot 10^6} \right) \cdot 0,05 \cdot 11 \cdot 10^4 + 348 \cdot (1,815 \cdot 16,6 \cdot 10^{-3} - 0,817 \cdot 1,812 \cdot 10^{-4}) = 11,17 \text{ ампервитков}.$$

Расчет во втором приближении. По рис. 7 и 8:

$$\operatorname{ctg} \alpha_1 = \frac{0,4}{3,5 \cdot 10^{-5}} = 1,15 \cdot 10^4; \operatorname{ctg} \alpha_2 = \frac{8,5 - 0,4}{3,5 \cdot 10^{-5}} = 1,09 \cdot 10^4; \operatorname{ctg} \alpha_3 = \frac{1,9 - 0,78}{3,5 \cdot 10^{-5}} = 3,21 \cdot 10^4; \operatorname{ctg} \alpha_4 = \frac{8,5 - 1,9}{3,5 \cdot 10^{-5}} = 18,89 \cdot 10^4.$$

По (37): $\xi^2 = 2,15 \cdot 10^4$; $\xi = 145,6$.

По (40): $\eta^2 = 10,02 \cdot 10^4$; $\eta = 317$.

По (53): $v^2 = 39,89 \cdot 10^6$; $v = 6311$.

По (48): $W = \frac{7 \cdot 10^{-5} \cdot 2,15 \cdot 10^4}{2,317} = 2,375 \cdot 10^{-3}$.

По (66): $H_3 = 15,51$.

По (67): $b_1 = 1,876$.

По (68): $b_{1,5} = -0,387$.

По (69): $b_m = -0,493$.

По (52): $m = 1,815$; $\text{sh } m = 2,99$; $\text{ch } m = 3,15$; $\text{cth } m = 1,056$.

По (60): $\text{th } y = 0,0529$; $y = 0,0529$; $\text{ch } y = 1,0015$.

По (59): $D_1 = 2,618$.

Уравнения (61) и (62) получают вид:

$$\text{th } \delta' = \frac{\text{sh}(0,0529 + \delta'')}{2,621 - 0,462 \text{ch}(0,0529 + \delta'')},$$

$$\delta' = 3,11 - 0,462 \delta''.$$

Путем подбора находим корни: $\delta' = 2,533$; $\delta'' = 1,25$;
 $\text{ch } \delta' = 6,335$; $\text{sh } \delta' = 1,602$; $\text{ch } \delta'' = 1,888$.

По (58): $C = 101,3$.

По (56):

$$2B_{cp} - B_0 - \frac{H_2}{2,2} = \frac{1}{101,3} \left[\left(3,5 \cdot 10^{-5} - \frac{8,5}{2 \cdot 39,89 \cdot 10^6} \right) \cdot 1,888 + \frac{2,375 \cdot 10^{-3}}{317} \cdot 0,883 \right] =$$

$$= 7,12 \cdot 10^{-7} \text{ в} \cdot \text{сек/см}^2.$$

По (55): $v_1 = 6311 \cdot 7,12 \cdot 10^{-7} \cdot 2,99 = 13,47 \cdot 10^{-3}$.

По (50) находим $v_{1,5}$:

$$v_{1,5} = \frac{13,47 \cdot 10^{-3} \cdot 2,375 \cdot 10^{-3} \cdot 1,602}{1,888} = 5,13 \cdot 10^{-3}$$

По (46) находим v_m : $v_m = \frac{5,13 \cdot 10^{-3}}{6,335} = 0,81 \cdot 10^{-3}$.

По (65): $F_1 - F_0 = 15,51 \cdot 5 \cdot 10^{-2} +$
 $+ 348 [1,876 \cdot 13,47 \cdot 10^{-3} - 0,387 \cdot (5,13 \cdot 10^{-3} + 2,375 \cdot 10^{-3})$
 $\times 1,25] - 0,493 \cdot 0,81 \cdot 10^{-3} = 8,335 \text{ ампервитков}.$

Графический расчет, проведенный так, как показано на рис. 4 и 5 и в параграфе 5 (см. выше), дал в результате значение $F_1 - F_0$, лежащее между 8 и 8,5 ампервитков. Если бы сердечник был собран встык, то увеличение, приходящееся на один стык, было бы

$$F_1 - F_0 = \frac{7 \cdot 10^{-5}}{4\pi \cdot 10^{-9}} \cdot 0,05 = 279 \text{ ампервитков}.$$

Из сравнения полученных цифр видно, какую огромную пользу приносит в данном случае шихтовка.

Литература

1. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах. ОНТИ, 1935.
2. А. Г. Столетов. Исследование о функциях гниения мягкого железа. Ann. d. Phys., 146, 442, 187.



Фотоэлементы

(ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ)

Кандидат техн. наук Н. С. ХЛЕБНИКОВ

Москва

Фотоэлементом называют прибор, основная составная часть которого представляет собой «светочувствительный» материал, способный под действием падающего на него света вызывать изменения режима электрической цепи, звеном которой фотоэлемент является. Под словом «свет» здесь подразумевается вообще лучистая энергия с длинами волн в интервале от $2000 \text{ \AA}$ ($0,2 \mu$) до примерно $50000 \text{ \AA}$ (5μ), поскольку современные фотоэлементы разных типов способны реагировать на излучение того или другого участка этого интервала [Л. 2, 4].

В отличие от других приборов, реагирующих на лучистую энергию — термоэлементов и болометров, — фотоэлементы воспринимают отдельные кванты света, но не энергетическую сумму этих квантов в виде соответствующего количества тепловой энергии. Этот факт определяет преимущества и недостатки фотоэлементов по сравнению с тепловыми

Рассмотрены основные свойства фотоэлементов различных классов. Произведено сопоставление фотоэлементов с тепловыми индикаторами лучистой энергии. Указаны способы и особенности использования фотоэлементов разных классов. В форме таблицы дана сводка характеристик фотоэлементов, изготовляемых в СССР.

элементами с тепловыми индикаторами лучистой энергии. Преимущества фотоэлементов состоят в следующем:

1) Значительная выработка сигнала, отнесенная к единице падающей лучистой мощности, называемая «чувствительностью для участка спектра, на который фотоэлемент реагирует».

2) Значительно меньшая инерционность, т. е. меньшее запаздывание электрического сигнала по отношению к световому.

Оба эти преимущества являются следствием различия в механизмах действия тепловых и электрических приемников излучения.

Низкая инерционность фотоэлементов обусловлена тем, что каждый квант полезно поглощенного излучения (полезно в том смысле, поглощение его ведет к соответствующему электрическому действию), мгновенно пре-

лется в элементарное изменение электрического состояния фотоэлемента. Таким образом, полное изменение электрического состояния суммируется в множества одновременно совершающихся элементарных. В случае тепловых приемников результирующее изменение является следствием повышения температуры малой, но все же заметной массы (порядка десятой доли миллиграмма). Измерения показывают, что между моментом включения освещения и установлением нового состояния в случае тепловых индикаторов проходит от 0,1 до 10 сек. При внешнем фотоэффекте тот же промежуток времени составляет менее 10^{-9} сек.

Непосредственное превращение светового сигнала в электрический, без предварительного превращения в тепло, обуславливает также и более высокую чувствительность фотоэлементов, если ее сравнивать с чувствительностью тепловых приемников в одном и том же участке спектра. Происходит это, во-первых, потому, что тепловые приемники реагируют не на количество поступающей лучистой энергии (что для данного спектрального участка эквивалентно количеству квантов), но на повышение температуры приемника относительно температуры окружающей среды. Это повышение температуры зависит от нагреваемой массы (приемника), которая не может быть уменьшена ниже некоторого предела. Во-вторых, вызываемая повышением температуры термо-Э.Д.С., равно как и увеличение сопротивления, весьма мала. Так, для наиболее чувствительных термопар она составляет несколько милливольт на градус стоградусной шкалы, а изменение сопротивления металлов на 1°C равно около $\frac{1}{273}$ исходной величины.

Различие в механизмах действия тепловых и фотоэлектрических приемников, создают и другое различие между ними, обуславливающее единственное, но важное преимущество первых. Поскольку тепловые приемники реагируют на общее количество поглощаемой ими лучистой энергии, и для них безразличен ее спектральный состав. Поэтому один и тот же термоэлемент при условии, что его приемная поверхность одинаково поглощает во всем данном интервале длин волн, будет давать на единицу падающей энергии один тот же сигнал, вне зависимости от длины волны. Таким образом, по принципу действия тепловые приемники являются приемниками неселективными. И действительно, с ними можно вести измерения от самых коротких ультрафиолетовых лучей до самой далекой инфракрасной области ($400 \mu \div 0,4 \text{ мм}$). В случае фотоэлементов, наоборот, явление всегда носит селективный характер; равные количества энергии в разных спектральных участках дают неодинаковые электрические сигналы. Таким образом, все фотоэлементы являются селективными приемниками. Существует одно (или несколько) значение длин волн, где чувствительность достигает максимума, уменьшаясь в обе стороны от этого значения длины волны, а начиная от наиболее длинноволнового максимума и в сторону волн еще большей длины чувствительность непрерывно умень-

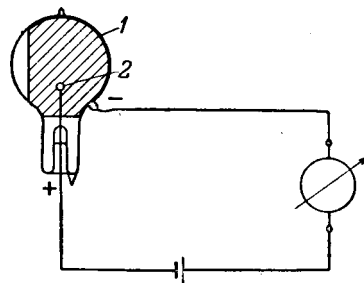


Рис. 1.

1 — светочувствительный катод; 2 — анод.

шается до нуля. Эти два значения длин волн $\lambda_{\text{макс}}$ и λ_0 являются наиболее характерными признаками каждого фотоэлемента и в значительной мере определяют их свойства и возможности их применения.

Подводя итоги можно сказать, что в своих спектральных участках фотоэлементы всегда имеют преимущество перед тепловыми приемниками, но зато последним доступен гораздо более широкий интервал длин волн.

Классы фотоэлементов. В соответствии с тремя видами фотоэлектрического эффекта все фотоэлементы могут быть разделены на три класса: 1) фотоэлементы с внешним фотоэффектом; 2) фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (фотосопротивления); 3) фотоэлементы, основанные на фотоэффекте запирающего слоя (вентильные фотоэлементы).

Вентильные фотоэлементы являются генераторами Э.Д.С. и электрического тока. Действие же фотоэлементов других типов всегда состоит только в том, что они изменяют под действием света свое внутреннее сопротивление, изменяя тем самым в цепи ток, создаваемый Э.Д.С. внешнего источника.

Характер процессов, обуславливающих каждый из видов фотоэффекта, определяет конструктивное выполнение фотоэлементов различных типов. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом, где под действием света происходит вылет фотоэлектронов из поверхности светочувствительного слоя, непременно представляют собой вакуумно-плотную (стеклянную) оболочку, внутри которой расположены два электрода: катод, состоящий из светочувствительного вещества, испускающий электроны, и анод, собирающий эти электроны. Между этими электродами должно быть наложено напряжение от постороннего источника.

На рис. 1 показаны конструкция и схема включения такого фотоэлемента.

В зависимости от назначения, по технологическим соображениям или в связи с особыми требованиями к некоторым характеристикам, фотоэлементы с внешним фотоэффектом могут существенно различаться по выполнению [Л. 1, 2]. Вместо расположения светочувствительного слоя непосредственно на стенке колбы (рис. 1) катод может быть образован на металлическом электроде, не связанном со стенкой. Точно так же вместо расположения анода внутри пространства, более или менее полно охватываемого катодом, возможно обратное расположение: маленький

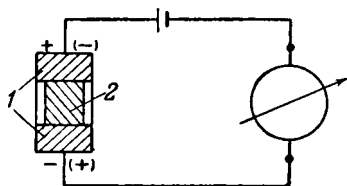


Рис. 2.

1 — металлические электроды; 2 — светочувствительный слой на изолирующей подложке.

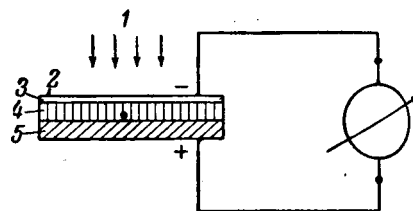


Рис. 3.

1 — свет; 2 — прозрачный металлический электрод; 3 — запирающий слой; 4 — полупроводник; 5 — металлическая основа.

катод, со всех сторон окруженный анодом; возможно также и выполнение обоих электродов в виде плоскопараллельной системы. Сферическая колба с катодным слоем на ее внутренней поверхности и малого размера анод, более или менее близко расположенный к ее центру, характерны для отечественных фотоэлементов. Эта конструкция дает существенные технологические и эксплуатационные преимущества.

Необходимость помещения электродов таких фотоэлементов в вакуум диктуется двумя обстоятельствами. Во-первых необходимо, чтобы вылетающие из катода электроны могли беспрепятственно достигать анода. Для этого нужно, чтобы средняя длина свободного пробега электрона была много больше расстояния между электродами [Л. 5]. Практически это означает, что давление остаточных газов в фотоэлементе не должно превышать 10^{-6} мм рт. ст. Во-вторых, катод не должен соприкасаться с химически-активными газами, так как материалы современных фотокатодов, неперменной составной частью которых являются щелочные металлы (главным образом, цезий, реже — рубидий) весьма активны в химическом отношении.

Фотокатоды не боятся лишь соприкосновения с инертными газами (гелий, неон, аргон и др.). На этом основан способ повышения отдачи фотоэлементов, состоящий во внутреннем усилении фототока при помощи газового разряда. После изготовления катода и перед отпайкой фотоэлемента с вакуумного поста колба его наполняется одним из названных газов (обычно — аргонном, как наиболее дешевым и дающим наилучшие результаты также и в других отношениях), тщательно очищенным от малейших следов химически активных примесей, до давлений порядка $0,01$ — $0,1$ мм рт. ст. При движении электронов от катода к аноду в таком газонаполненном фотоэлементе имеет место характерное для несамостоятельного газового разряда [Л. 5] лавинообразное возрастание тока, ведущее к увеличению тока во внешней цепи. Усиление, которое может быть достигнуто таким путем, может составлять 10 — 12 раз. Однако, применение усилений, превосходящих 3 — 4 , ведет к быстрому снижению чувствительности фотокатода.

При использовании фотоэлементов для работы с видимым и близким инфракрасным излучением прозрачность стеклянных колб совершенно достаточна. Однако, для работы с ультрафиолетом обычные стекла оказываются непригодными дальше 3700 — 3600 Å, так как обнаруживают

сильное поглощение. В этих случаях возможно использование колб из специальных стекол — плавленого кварца или же из обычных стекол со специальными, прозрачными для ультрафиолета окнами. Простейшее решение этой задачи было осуществлено в СССР и дало весьма хорошие результаты [Л. 6].

При внутреннем фотоэффекте электроны освобождаются светом только в том смысле, что они превращаются из связанных в электроны проводимости. В случае фотоэффекта запирающего слоя электроны переходят из одного электрода сквозь запирающий слой в другой и создают между ними разность потенциалов. Поскольку в обоих случаях электроны движутся только внутри самих светочувствительных веществ, соответствующие фотоэлементы не обязательно помещать в вакуум, тем более что в этих случаях и светочувствительные вещества сравнительно мало чувствительны к воздействию воздуха. Тем не менее иногда и такие фотоэлементы помещают в откачанные сосуды, имея в виду повышение стабильности их свойств или по другим соображениям.

На рис. 2 и 3 показаны принципиальные схемы устройства фотоэлемента с внутренним фотоэффектом и фотоэлемента с запирающим слоем.

Вентильный фотоэлемент генерирует э. д. с. только под действием света и поэтому ток в цепи при затемнении отсутствует полностью. Цепи других фотоэлементов имеют посторонний источник э. д. с. и поэтому ток продолжает существовать и при отсутствии освещения. В случае фотоэлементов с внешним фотоэффектом этот ток, складывающийся из тока утечки по стенке колбы и тока термоэлектронной эмиссии фотокатода, при обычных температурах весьма мал (10^{-12} — 10^{-9} а). Внутреннее сопротивление фотоэлементов лежит, грубо говоря, в пределах от $0,1$ до 10 мгом [Л. 4], а рабочее напряжение составляет около 10 в. Это дает для тока, текущего в цепи фотосопротивления при его затемнении от 10^{-4} до 10^{-6} а, т. е. сравнительно с предыдущим случаем, очень большие величины.

Указанные различия между классами фотоэлементов являются решающими для выбора схем их использования в конкретных схемах.

Характерным и общим для всех типов современных фотоэлементов является то, что все светочувствительные материалы, обладающие высокой эффективностью в фотоэлектрическом отношении, являются полупроводниками.

Краткий очерк истории развития фотоэлементов. История развития фотоэлементов, начиная с открытия физических явлений и до создания современных фотоэлектрических приборов, дает большое количество примеров того взаимного влияния теории и практики, которое является единственной плодотворной основой для развития науки и практического использования ее достижений. Так например фотоэффект запирающего слоя был открыт в 1839 г. французским ученым А. Беккерелем, но «пролежал» в архиве научных фактов почти целое столетие. Он был вторично открыт — на других веществах и в совершенно ином расположении опыта — в 1888 г. профессором Казанского университета В. А. Ульяниным [Л. 7] и еще раз, независимым образом, около 1916 г. (А. Пфундом), но техническое воплощение, в виде меднозакисных фотоэлементов, получил лишь в конце 20-х годов нашего века. Нужно сказать, что конец 20-х и начало 30-х годов было наиболее бурным периодом развития фотоэлементов, а также фотоэлектрических исследований, в связи со все более широким распространением звукового кино, которое и сыграло основную стимулирующую роль в создании современных фотоэлементов. Во времена же А. Беккереля электрические действия света не представляли технического интереса.

Точно то же самое мы можем наблюдать в отношении фотосопротивлений. Открытие внутреннего фотоэффекта относится к 1873 г. и было сделано случайно телеграфистом У. Смитом, занимавшимся, ввиду отсутствия в то время в продаже высокоомных сопротивлений, самостоятельным их изготовлением. Применяя для этих целей среди других материалов селен, известный своей слабой проводимостью, он обнаружил, что величина сопротивления зависит от освещения. Если работа Беккереля была в свое время забыта, то открытие Смита вызвало интерес у многих передовых техников того времени. Успехи электрической телеграфии и первые шаги электрической телефонии уже отчетливо показали возможности, заложенные в передаче электрических сигналов по проводам. Открытие Смита показало путь превращения световых сигналов в электрические и, следовательно, позволяло осуществить передачу световых сигналов на расстоянии электрическим способом, что означало, принципиально, во всяком случае, возможность осуществления того, что мы теперь называем фотоэлектрической телеграфией и телевидением. Правда, дальнейшая принципиальная постановка вопроса в виде ряда проектов дело не пошло и прежде всего потому, что передача изображений еще не стояла, и не могла стоять, как очередная проблема в области связи. Отсутствовала еще такая необходимая для ее решения предпосылка, как техника усиления слабых электрических сигналов.

Селеновые фотосопротивления, усовершенствованные рядом авторов, долгое время использовались как основной вид электрического индикатора света. С их помощью, в частности, была впервые осуществлена оптическая телефония [Л. 1]. Поиски, чувствительных к инфракрасным

лучам материалов привели к созданию более совершенных — таллофидных — фотосопротивлений [Л. 10]. Чувствительность к инфракрасным лучам требовалась для осуществления секретности светотелефонной связи, чему уделялось много внимания в первую мировую войну. Точно так же запросы военной техники привели к дальнейшему весьма крупному шагу вперед — к созданию пригодных для технических целей сернисто-свинцовых и селенисто-свинцовых фотосопротивлений во время второй мировой войны (в Германии). Нужно отметить, что лабораторные исследования фотоэлектрических свойств сернисто-свинца были выполнены также совершенно независимо еще до войны в СССР.

Наименьший разрыв по времени между открытием физического явления и созданием технических приборов имел место для внешнего фотоэффекта, наблюдавшегося в 1887 г. Г. Герцем, как побочное явление (потеря отрицательного заряда металлическим электродом под действием ультрафиолетового света) во время его опытов с электромагнитными волнами. В этом решающую роль сыграли замечательные исследования нашего соотечественника проф. Московского университета А. Г. Столетова [Л. 11]. Начав свои работы в 1888 г., Столетов сразу пошел по пути исследования, совершенно оригинальному и отличному от принятого в то время иностранными авторами, (Галльвакс, Риги и др.). Методика Столетова привела его к открытию фотоэлектрического тока и к созданию прибора, который мы теперь и называем фотоэлементом с внешним фотоэффектом. Воспользовавшись данными, опубликованными Столетовым, немецкие ученые Эльтер и Гейтель (долгое время несправедливо считавшиеся изобретателями фотоэлемента с внешним фотоэффектом) в 1892 г. разработали фотоэлементы, чувствительные не только к ультрафиолетовому (как первые приборы Столетова и их собственные), но и к видимому свету [Л. 12]. Эти фотоэлементы, как значительно более стабильные, чем селеновые фотосопротивления, вскоре вытеснили селеновые из всех тех областей применений, где не требовалась высокая чувствительность¹: в первую очередь, во всякого рода научных исследованиях, где можно было пользоваться самыми чувствительными измерительными приборами. Гидридные фотоэлементы с наполнением инертными газами просуществовали в неизменном виде более 30 лет, как наилучшие фотоэлементы с внешним фотоэффектом. На них велись первые разработки звукового кино и телевидения, в том числе и у нас. Эти фотоэлементы были вытеснены новыми, более совершенными, лишь в начале 30-х годов. Как уже отмечалось, стимулом являлись потребности звукового кино, а также и передачи изображений, в частности телевидения, которое к этому времени, с одной стороны, стало актуальной задачей в области электрической

¹ Следует помнить, что в то время не существовало электронных ламп и методов усиления, на них основанных.

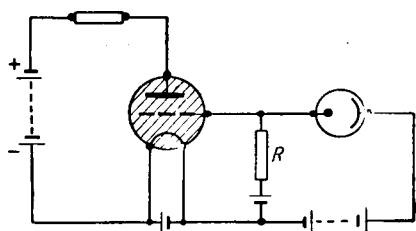


Рис. 4.

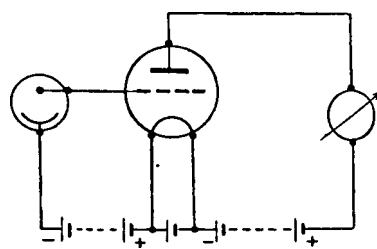


Рис. 5.

связи, а с другой, — получила реальную основу для развития в виде радиотехники, уже достигшей значительного совершенства. И, действительно, первые публикации о создании системы высококачественного катодного телевидения относятся к 1933—1934 гг. [Л. 13].

Способы использования фотоэлементов. Фотоэлементы создают весьма малые электрические сигналы. Например, если принято измерять анодные токи приемно-усилительных электронных ламп в миллиамперах, то для фотоэлектрических токов принята единица в тысячу раз меньшая — 1 микроампер. В соответствии с этим установился и способ выражения интегральной чувствительности (чувствительности к неразложенному излучению) для фотоэлементов первого и третьего типов.

Под интегральной чувствительностью S фотоэлемента (кроме фотосопротивлений) понимают отношение силы тока в цепи фотоэлемента к вызывающей его световой мощности (определенного спектрального состава). При этом ток выражают в микроамперах, а световую энергию для случая видимого излучения — в люменах. Для того, чтобы задать спектральный состав излучения, указывают тип источника и его температуру. Типичными значениями чувствительности современных фотоэлементов с внешним фотоэффектом является 100 мка/лм (сурьмяно-цезиевые вакуумные фотоэлементы), а для вентильных (селеновых) 500 мка/лм. Обычный размер светочувствительной поверхности — около 10 см². Расположенный на расстоянии 1 м от фотоэлемента источник с силой света в 10 свечей (автомобильная лампочка) может создать в цепях таких фотоэлементов ток в 1—5 мка соответственно. Такие токи легко обнаружить и измерить при помощи микроамперметров с чувствительностью 10^{-7} — 10^{-8} ампер на деление шкалы, но привести в действие какое-либо устройство ими непосредственно нельзя, так как 1—5 мка — это верхний предел чувствительности наиболее чувствительных (гальванометрических) реле. В большинстве случаев приходится иметь дело с еще меньшими фототоками. Совершенно ясно, что широкое техническое использование фотоэлементов возможно лишь при условии усиления фототоков. Столь же незначительными оказываются и те изменения сопротивления у фотосопротивлений, с которыми приходится встречаться на практике: они могут составлять до 10^{-4} от величины сопротивления при отсутствии освещения.

Следует различать два принципиально разных способа усиления фотоэлектрических сигналов:

1) усиление с помощью электронных ламп; 2) — средством газоразрядных приборов (газоразрядные реле, тиратроны).

Усиление по первому из этих способов является более универсальным. Принципиально оно применимо во всех случаях. Использование этого способа необходимо тогда, когда имеется необходимость в воспроизведении в виде электрического сигнала изменений лучистого потока во времени (например, звуковое кино, светотелефония). При усилении по второму способу фотоэлемент играет роль ружейного курка при выстреле, включая, например, анодный ток тиратрона. Форма результирующего электрического импульса в этом случае никак не связана с формой вызвавшего его лучистого импульса. Достоинством этого способа является непосредственное усиление мощности, могущее достигать 10^6 — 10^7 в одном каскаде.

На рис. 4 показана принципиальная схема включения фотоэлемента в цепь тиратрона. Действие фотоэлемента состоит в том, что при освещении протекающий через него ток создает дополнительное падение напряжения на сопротивлении R . Это ведет к повышению потенциала сетки и к возникновению разряда. Из этого ясно, что в такого рода схемах могут быть использованы лишь фотоэлементы с большой чувствительностью по напряжению, способные создавать значительные приращения падения напряжения во внешней цепи. Этому условию не удовлетворяют фотоэлементы с запирающим слоем.

Существует большое количество более сложных схем с тиратронами, которые, в отличие от простейшей, показанной на рис. 4, допускают, например, управление средним значением тока анодной цепи тиратрона путем [Л. 14] изменения светового потока, поступающего на фотоэлемент.

Усиление с помощью электронных ламп свою очередь следует разделить на две категории: а) усиление на постоянном токе и б) усиление на переменном токе.

На рис. 5 показана одна из возможных схем усилителя постоянного тока. Действие фотоэлемента состоит здесь в том, что при наличии освещения сетка лампы заряжается отрицательно, уменьшает анодный ток. Для работы этой схемы необходимо, чтобы при отсутствии освещения сетка не заряжалась от батареи, т. е. чтобы фотоэлемент имел бесконечно большое сопротивление (точнее — большее, чем сопротивление утечки сетки лампы). Это может быть осуществлено только в случае фотоэлементов с внешним фотоэффектом.

эффектом. Таким образом, этот способ усиления неприменим ни для фотосопротивлений, ни для вентильных фотоэлементов. Применение специальных, так называемых «электрометрических», ламп с высокоизолированными сетками и низким анодным напряжением (во избежание ионных токов на сетку), а также фотоэлементов с высокой изоляцией между катодом и анодом, осуществляемой посредством введения охранных колец, позволяет получать усиление на одном каскаде до 10^6 раз и усиливать токи от 10^{-15} а, откуда и возникло распространенное название таких схем — «ламповые электрометры». Применение их столь же ограничено, как и собственно электрометрических схем, т. е. в основном лабораторной практикой. Одним из важнейших недостатков таких схем является то, что в них невозможно исключить, вследствие гальванической связи между фотоэлементом и сеткой лампы, влияние постороннего света. По этой причине работа с этими схемами требует или полной темноты, или, по крайней мере, высокого постоянства нулевой освещенности фотоэлемента, как правило практически недостижимой.

Усиление на переменном токе применимо для всех классов фотоэлементов. Такие усилители благодаря наличию емкостной связи на входе автоматически исключают постоянную составляющую тока. Это дает возможность работать с фотосопротивлениями и позволяет не считаться с посторонним светом постоянной или достаточно медленно изменяющейся интенсивности. Вентильный фотоэлемент также может работать с усилителем переменного тока при использовании трансформаторного входа (при не слишком малых световых потоках). При таком включении основной недостаток этих фотоэлементов (с точки зрения усилительной техники), состоящий в каждом внутреннем сопротивлении в некоторой мере устраняется, так как наличие трансформатора позволяет повысить напряжение входного сигнала. Этот прием не получил широкого распространения потому, что свойства самих вентильных фотоэлементов не настолько привлекательны, чтобы ради них стоило разрабатывать специальную усилительную аппаратуру. Действительным преимуществом вентильных фотоэлементов является их способность работать без постороннего источника напряжения, и именно этим определяется круг их практических применений.

Таким образом, наибольшее техническое значение имеет усиление фототоков посредством усилителей переменного тока, усилители этого рода в частности используются в аппаратуре звукового кино. Поэтому целесообразно остановиться на этом методе несколько подробнее.

Вне зависимости от типа и конкретного названия, всякий усилитель, работающий с фотоэлементами основанными на внешнем или внутреннем фотоэффекте, имеет определенным образом устроенный вход, схема которого показана на рис. 6.

Под действием света внутреннее сопротивление фотоэлемента уменьшается, вследствие чего

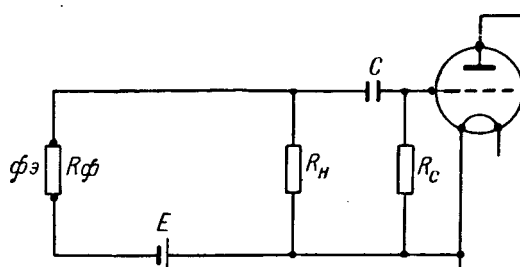


Рис. 6.

в цепи $R_\phi - R_n - E$ (рис. 6) ток увеличивается. Это ведет к тому, что падение напряжения на нагрузочном сопротивлении R_n возрастает, потенциал левой обкладки конденсатора C увеличивается, вместе с тем растет и потенциал правой обкладки, а следовательно, и потенциал сетки. Приращение сеточного потенциала ведет к увеличению анодного тока и к увеличению падения напряжения на сопротивлении анодной нагрузки. Это последнее приращение падения напряжения, при надлежащем выборе величин параметров схемы в несколько раз больше приращения потенциала на сетке лампы. Это усиленное падение напряжения подается на сетку второй лампы и т. д.

Первые каскады усилителя фототоков работают в качестве усилителей напряжения. Если на выходе усилителя присоединен прибор, потребляющий для управления малую мощность (например, катодный осциллограф), то дело ограничивается усилением напряжения. Если на выходе требуется значительная мощность (динамик киноустановки, мощное реле), то последние 1—2 каскада усиления строятся как усилители мощности.

Входная цепь усилителя должна давать возможно больший сигнал на сетке первой лампы при заданном световом сигнале, для чего нужно обеспечить правильное соотношение между внутренним сопротивлением фотоэлемента R_ϕ и сопротивлением R_n и R_c . Наибольшее приращение потенциала сетки при прочих равных условиях получается при условии, что $R_n = R_\phi$ и при возможно большем значении R_c ($R_c = \infty$).

В случае фотоэлементов с внешним фотоэффектом условие $R_n = R_\phi$ не может быть соблюдено, так как внутреннее сопротивление фотоэлемента весьма велико. Например, для случая звукового кино среднее значение светового потока приблизительно равно $0,01$ лм; если $S = 100$ мка/лм и напряжение $E = 100$ в, то фототок составит 1 мка и внутреннее сопротивление фотоэлемента будет $R_\phi = 100$ мгом. При использовании фотоэлементов в светотелефонии средний световой поток еще меньше и R_ϕ окажется еще больше. Между тем по ряду других соображений не представляется возможным применять в усилителях сопротивления, превосходящие несколько мегом. Поэтому в данном случае следует выбрать R_n и R_c возможно боль-

Свойства Тип фотоэлемента	Рабочая область спектра ¹ Å	Положение спектрального максимума, Å	Интегральная чувствительность			
			по току		по напряжению	
			мкА/лм	а/вт	(приблизительно) в.м.м	мВ
Фотоэлементы с внешним фотоэффектом						
Кислородно-серебряно-цезиевый, вакуумный	4 000—11 000	Ок. 8 000	30 (до 50)		0,1	
То же, газонаполненный тип ЦГ-4 [Л. 20] . .	4 000—10 000	Ок. 8 000	250		0,1	
Сурьмяно-цезиевый, вакуумный, тип СЦВ-4 [Л. 20]	3 800—6 200	Ок. 4 500	110		0,5	
Сурьмяно-цезиевый вакуумный для ультрафиолета [Л. 6]	2 000—6 000	4 200	50	Ок ² . 0,1	0,25	
Фотоэлектронные умножители						
С кислородно-серебряно-цезиевым катодом [Л. 3] (системы Кубецкого)	4 000—11 000	Ок. 7 500	10 ⁶ —10 ⁷		10 ⁴	
С сурьмяно-цезиевым катодом (системы Кубецкого) [Л. 19]	3 700—6 000	Ок. 4 500	10 ⁻⁶ —10 ⁷		10 ⁴	
Фотосопротивления						
Сернисто-таллиевое [Л. 4]	4 000—13 500	10 000	10 ⁵ —10 ⁶		10 ³	
Сернисто-свинцовое [Л. 4]	5 000—30 000	27 000		До 1,0 ³		До 1
Селенисто-свинцовые [Л. 4]	5 000—50 000	25 000; 33 000		До 0,1 ³		До 1
Фотоэлементы вентильные						
Селеновый, тип СВ-39	4 000—7 000	5 500	500			0,4
Сернисто-таллиевое [Л. 16]	4 000—12 000	9 500	До 10 000			0,3
Сернисто-серебряное [Л. 17]	5 000—12 500	10 500	До 8 000			0,3
Тепловые приемники						
Термоэлемент (системы Хазе)	2 000—250 000	—		3·10 ⁻⁴		

¹ Область, где чувствительность фотоэлемента обычного оформления еще не слишком мала (не менее нескольких процентов от максимума).

² По отношению к интегральному излучению водородной лампы.

³ По отношению к излучению черного тела при температуре 300°С.

⁴ Для фотоэлементов с внешним фотоэффектом принято $R_n = 5$ мгом, как практически возможный верхний предел. Для фотосопротивлений $R_n = R_{\phi}$. Для вентильных фотоэлементов дана R_n холодного хода — верхний предел достижимого напряжения.

шими, исходя из требований, предъявляемых к схеме (постоянная времени, полоса частот и др.).

Величины внутренних сопротивлений фотосопротивлений составляют от десятков тысяч ом до нескольких мегом. Поэтому условие $R_n = R_{\phi}$ может быть выполнено. Условие $R_c = \infty$ очевидно выполнено быть не может. Но, как оказывается, уже пятикратное превышение R_c над R_{ϕ} (при $R_n = R_{\phi}$) позволяет получить 90% от максимальной возможной величины сигнала на сетке.

При достаточно больших средних световых потоках (например в звуковом кино) задача рационального построения входа усилителя в принципе исчерпывается указанным выше выбором параметров, имеющим целью получение возможно большего электрического сигнала от

заданного светового. Но когда назначен устройству состоит в обнаружении возможных лучистых сигналов (например, в световой телефонии, где минимальная обнаруживаемая величина сигнала определяет осуществимость дальности связи), столь же важным является снижение помех, т. е. переменных э. д. с. на сетке первой лампы, возникающих под влиянием посторонних по отношению к обнаруживаемому излучению факторов. Такие помехи могут быть как внешние, так и внутренние происхождения. Наиболее трудно устранимыми внешними помехами являются электромагнитные наводки (электродвигатели, высокочастотные устройства сети переменного тока и т. п.). От них избавляются тщательной экранировкой входа усилителя вместе с фотоэлементом. Внутренние помехи, помимо устранимых дефектов (напри-

Климатическая чувствительность в мкА/лм	Порог чувствительности		Область линейной световой характеристики ⁶ до	Размер светового окна, мм	Внутреннее сопротивление ⁷ , Ом	Рабочее напряжение, В	Инерция $\frac{S_{1000}}{S_{50}} \cdot 100$, %	Остаточная чувствительность в процентах от начальной		Срок хранения ⁹ , лет
	лм	вт						после 50 час. работы	после 1 000 час. работы	
100	$\geq 5 \cdot 10^{-7}$		1 лм	Диам. 40	10^{12}	50—100	100	100	Ок. 90	> 10
	$5 \cdot 10^{-6}$		0,1 лм	Диам. 39	10^{10}	240	Ок. 100	Ок. 25	Ок. 25	?
	$1 \cdot 10^{-7}$		0,5 лм	Диам. 39	10^{10}	50—240	100	100	≥ 80	> 10
	?		?	Диам. 15	10^{14}	50—100	100	100	?	> 5
	10^{-9}		10^{-4} лм	Ок. 5×3	10^{10}	Ок. 1 500	100	?	?	?
	?		10^{-4} лм	Ок. 5×3	10^{10}	1 000	100	?	?	?
	$\geq 10^{-7}$		0,01 лк	От 2×2 до 5×5	$(1 \div 5) \cdot 10^6$	≤ 20	10—15	?	?	> 1
До 10^4	—	$\geq 10^{-9}$	10 мквт/см ²	От 1×1 до 10×10	$(0,1 \div 1) \cdot 10^6$	1—100	Ок. 100	?	?	?
?	—	?	?	?	?	?	?	?	?	?
	10^{-4}		1 лм	Диам. 39	10^3	—	100^8	?	?	> 1
	?		1 лм	Диам. 30	10^3	—	100^8	?	?	Ок. 0,1
	?		1 лм	Диам. 20	10^3	—	100^8	?	?	Ок. 0,3
10^{-3}	—	10^{-5}	?	Диам. 3	10	—	0,01	Не зависит		Неограниченный

⁶ В применении к фотосопротивлениям понятие квантового выхода имеет смысл, так как не представляется возможным провести границу между первичными и вторичными процессами.

⁷ Приводятся только уже установленные верхние пределы линейности. Возможно, что в действительности линейность сохраняется и выше.

⁸ Для промышленных типов имеется в виду сопротивление между электродами в озолеванном стандартным способом состоянии, для прочих — при условии принятия мер против утечек.

⁹ При внешней цепи с малым сопротивлением (меньшим $R_{\text{ф}}$).

¹⁰ Срок сохранности интегральной чувствительности с точностью $\pm 10\%$.

ные контакты), коренятся также в самой дисперсионной структуре электричества, порождающей электрические флуктуации. Эти помехи могут быть уменьшены лишь до некоторого предела.

В схеме рис. 6 для обоих рассматриваемых классов фотоэлементов решающими являются помехи, вызываемые электрическими флуктуациями в сопротивлениях R_n и R_c . Электродвижущая сила, создаваемая этими флуктуациями, зависит от величины сопротивления, температуры, при которой они находятся, и ширины полосы частот, пропускаемых усилителем. Эта зависимость выражается следующей формулой [15]:

$$\bar{E}^2 = 4kTR\Delta f,$$

где $\bar{E}^2$ — среднее значение квадрата эффективного значения э. д. с. шума;

R — величина сопротивления;
 k — постоянная Больцмана;
 T — абсолютная температура;
 Δf — ширина полосы частот.

Хотя для фотоэлементов с внешним фотоэффектом предел чувствительности устанавливается дробовым эффектом в фотоэмиссии они не проявляют этих своих, специфических свойств вследствие того, что тепловые шумы сопротивления значительно больше чем шумы дробового эффекта и полезный сигнал тонет в шуме этого происхождения гораздо раньше, чем он был бы замаскирован флуктуациями в фотоэмиссии. С флуктуациями этого последнего вида приходится считать (в схеме рис. 6) лишь в том случае, когда фототок предварительно усиливается внутри фотоэлемента, как это имеет место, например, в фотоэлектронных умножителях.

Фотоматричная чувствительность в мкс/вт		Порог чувствительности		Область линейной световой характеристики ⁶ до	Размер светового окна, мм	Внутреннее сопротивление ⁷ , ом	Рабочее напряжение, в	Инерция $\frac{S_{1000}}{S_{50}} \cdot 100, \%$	Остаточная чувствительность в процентах от начальной		Срок хранения ⁹ , лет
тип	в/вт	лм	вт						после 50 час. работы	после 1 000 час. работы	
401		$\geq 5 \cdot 10^{-7}$		1 лм	Диам. 40	10^{12}	50—100	100	100	Ок. 90	>10
41		$5 \cdot 10^{-6}$		0,1 лм	Диам. 39	10^{10}	240	Ок. 100	Ок. 25	Ок. 25	?
42		$1 \cdot 10^{-7}$		0,5 лм	Диам. 39	10^{10}	50—240	100	100	≥ 80	>10
43		?		?	Диам. 15	10^{14}	50—100	100	100	?	>5
44		10^{-9}		10^{-4} лм	Ок. 5×3	10^{10}	Ок. 1 500	100	?	?	?
45		?		10^{-4} лм	Ок. 5×3	10^{10}	1 000	100	?	?	?
46	?	$\geq 10^{-7}$		0,01 лк	От 2×2 до 5×5	$(1 \div 5) \cdot 10^6$	≤ 20	10—15	?	?	>1
47	До 10^4	—	$\geq 10^{-9}$	10 мквт/см ²	От 1×1 до 10×10	$(0,1 \div 1) \cdot 10^6$	1—100	Ок. 100	?	?	?
48	?	—	?	?	?	?	?	?	?	?	?
49		10^{-4}		1 лм	Диам. 39	10^3	—	100^8	?	?	>1
50		?		1 лм	Диам. 30	10^3	—	100^8	?	?	Ок. 0,1
51		?		1 лм	Диам. 20	10^3	—	100^8	?	?	Ок. 0,3
52	10^{-3}	—	10^{-5}	?	Диам. 3	10	—	0,01	Не зависит		Неограниченный

⁴ В применении к фотосопротивлениям понятие квантового выхода имеет смысла, так как не представляется возможным провести границу между первичными и вторичными процессами.

⁶ Приводятся только уже установленные верхние пределы линейности. Возможно, что в действительности линейность сохраняется и выше.

⁷ Для промышленных типов имеется в виду сопротивление между электродами в опколеванном стандартным способом состоянии, для прочих — при условии принятия мер против утечек.

⁸ При внешней цепи с малым сопротивлением (меньшим R_{ϕ}).

⁹ Срок сохранности интегральной чувствительности с точностью $\pm 10\%$.

юние контакты), коренятся также в самой дисперсной структуре электричества, порождающей электрические флуктуации. Эти помехи могут быть уменьшены лишь до некоторого предела.

В схеме рис. 6 для обоих рассматриваемых сейчас классов фотоэлементов решающими являются помехи, вызываемые электрическими флуктуациями в сопротивлениях R_n и R_c . Электродвижущая сила, создаваемая этими флуктуациями, зависит от величины сопротивления, температуры, при которой они находятся, и ширины полосы частот, пропускаемых усилителем. Эта зависимость выражается следующей формулой [15]:

$$\bar{E}^2 = 4kTR\Delta f,$$

где $\bar{E}^2$ — среднее значение квадрата эффективного значения э. д. с. шума;

R — величина сопротивления;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура;

Δf — ширина полосы частот.

Хотя для фотоэлементов с внешним фотоэффектом предел чувствительности устанавливается дробовым эффектом в фотоэмиссии они не проявляют этих своих, специфических свойств вследствие того, что тепловые шумы сопротивлений значительно больше чем шумы дробового эффекта и полезный сигнал тонет в шуме этого происхождения гораздо раньше, чем он был бы замаскирован флуктуациями в фотоэмиссии. С флуктуациями этого последнего вида приходится считаться (в схеме рис. 6) лишь в том случае, когда фототок предварительно усиливается внутри фотоэлемента, как это имеет место, например, в фотоэлектронных умножителях.

Фотосопротивление, являясь, по крайней мере, в известных пределах, омическим сопротивлением, также создает тепловые шумы. Иногда шумы фотосопротивления оказываются значительно больше, чем им следовало бы быть в соответствии с величиной сопротивления. Обычно это является результатом несовершенства переходных контактов между фоточувствительным слоем и подводящими проводниками. Кроме того, шумы фотосопротивлений возрастают с ростом приложенного к нему напряжения. До некоторого значения напряжения возрастание шумов идет параллельно с ростом чувствительности, что означает такое же возрастание полезного сигнала. Таким образом, в этих пределах повышение питающего напряжения не ухудшает отношения полезного сигнала к шуму. Дальнейшее увеличение напряжения ведет к более быстрому росту шумов по сравнению с сигналом.

Мы видим, таким образом, что между условиями для получения возможно большего полезного сигнала и возможно меньших шумов существует противоречие, так как для первого следует увеличивать нагрузочные сопротивления, а для второго — уменьшать их. Однако, как видно из приведенной выше формулы для E^2 , с увеличением нагрузочного сопротивления (также и R_c) отношение сигнала к шуму будет расти, так как полезный сигнал возрастает пропорционально первой степени R , а шум — пропорционально $\sqrt{R}$. Поэтому увеличение нагрузочных сопротивлений всегда желательно (с ограничениями, оговоренными выше).

Параметры и характеристики фотоэлементов.

В настоящее время не существует еще единообразной и до конца продуманной системы параметров, которая исчерпывающим образом описывала бы все необходимое в части свойств фотоэлементов всех типов, точно так же как нет и единой системы для определения соответствующих величин. Поэтому, в частности, не всегда можно сопоставить результаты измерений, выполненные различными авторами. Создание такой единой системы является одной из задач упорядочения работы по фотоэлементам.

Выше мы уже упоминали об одной из характеристик фотоэлементов — о его спектральной характеристике (п. 1) и о некоторых их параметрах: интегральной чувствительности, внутреннем сопротивлении и собственных шумах. Другими существенными параметрами являются монокроматическая чувствительность — отдача на единицу лучистой мощности или на 1 квант для узкого спектрального участка, и порог чувствительности — минимальный лучистый сигнал, который может быть усилен и использован. Из характеристик (кроме спектральной) существенными являются: вольтамперная, дающая зависимость отдачи от приложенного напряжения, частотная, показывающая изменение отдачи с частотой модуляции светового потока, и световая характеристика, выявляющая ход отдачи в зависимости от величины светового потока (или освещенности). Далее, весьма существенно знать

срок службы фотоэлемента. Дело в том, что, по правилу, по мере работы фотоэлементы понижают чувствительность. Существенен также срок время, в течение которого фотоэлемент сохраняет свои свойства, не работая. Это существенно потому, что некоторые весьма многообещающие типы фотоэлементов оказались крайне нестабильными и утрачивали чувствительность полностью за несколько месяцев. Точно так же было важно знать характер изменения свойств фотоэлементов в зависимости от внешней температуры. К сожалению, далеко не все эти вопросы были подвергнуты исследованию.

Не имея возможности по недостатку места описывать свойства каждого фотоэлемента в отдельности², мы попытались дать сводку известных нам данных в таблице. В этой таблице представлены только советские фотоэлементы (кросернисто- и селенисто-свинцовых фотосопротивлений), как представляющие все типы фотоэлементов и по ряду своих свойств превосходящие граничные конструкции. Единственное печальное исключение представляют собою фотоэлементы типа ЦГ (о причинах этого будет сказано далее). Для сопоставления со свойствами тепловых индикаторов приведены данные одного из лучших термоэлементов (см. «Тепловые приборы»).

Необходимость представить единым образом свойства различных по физическим основам своего действия приборов заставила прибегнуть к некоторым условностям. Так, например, хотя понятие интегральной чувствительности по току не имеет прямого физического смысла применительно к фотосопротивлениям, она дана в этом выражении. В действительности, интегральная чувствительность фотосопротивлений должна

выражаться как $\frac{R_m - R_c}{R_m}$, где R_m — сопротивление в отсутствие освещения; R_c — при его наличии. Здесь, конечно, также должны быть специфицированы мощность падающего лучистого потока и его спектральный состав. При этих условиях указанное отношение, которое часто обозначается через δ , оказывается такой же физической, зависящей от условий измерения, характеристикой светочувствительного слоя, как интегральная чувствительность в данном выше определении для фотоэлементов с внешним фотоэффектом.

Далее, поскольку для невидимых областей спектра понятие люмен, как единица световой энергии, утрачивает смысл, то для тех фотоэлементов, которые предназначены для работы в инфракрасной и ультрафиолетовой областях, да и интегральная чувствительность в амперах в ватт. В таблицу включены также фотоэлементы, которые, по первоначальным данным, казались весьма интересными, тем не менее не получили распространения, так как слишком быстро сам

² Значительную часть такого рода данных можно найти в книге С. Ю. Лукьянова [Л. 2], более полные — в указываемых литературных источниках [Л. 3].

³ Серно-галлиевые [Л. 16] и серно-серебряные [Л. 17] фотоэлементы с запирающими слоями.

произвольно теряли свою чувствительность. По нашему мнению, это явилось следствием недоработки их, и вполне возможно, что в дальнейшем эти фотоэлементы займут должное место среди других. Наконец, следует заметить, что значок «?» в таблице означает неисследованность.

По поводу содержания приведенной таблицы следует сделать некоторые замечания. Прежде всего необходимо отметить, что в данных ее могут существовать некоторые неточности. Происходит это потому, что таблица составлена на основании весьма обширного литературного материала, и, как правило, ни один автор не попытался исследовать свои фотоэлементы всесторонне. По этой причине данные о различных свойствах одного и того же фотоэлемента черпаются из разных источников и они могли относиться к существенно разнящимся, хотя номинально идентичным образцам. В тех случаях, где это было возможно, производилась проверка данных. Далее следует отметить особое положение, в котором оказались серно-галлиевые фотосопротивления, для которых, в отличие от других, единственной световой энергии остался люмен. Это имеет известное историческое обоснование, (так как работа с этими фотосопротивлениями велась в то время, когда доминировали кислородно-серебряно-цезиевые фотоэлементы) равно как и обстоятельство, что протяженность их спектральной кривой практически не отличается от таковой для кислородно-серебряно-цезиевых.

В таблицу не был введен ряд типов сурьмяно-цезиевых фотоэлементов (СЦВ-1, СЦВ-3), как отличающихся существенно от СЦВ-4.

Не приведены также данные о поведении фотоэлементов со временем работы по той причине, что они, как правило, отсутствуют. Действительно, за немногими исключениями (промышленные типы), нет достоверных данных даже об изменении чувствительности после 50 час. работы. Полезно будет отметить, что наибольшие изменения чувствительности наблюдались на сурьмяно-цезиевых фотоэлементах в звуковом кино. Известны случаи непрерывной работы фотоэлементов ЦВ-4 свыше 25 000 час. причем уменьшение чувствительности не превышало 10—15%.

Наконец, следует остановиться на фотоэлементах типов ЦГ, которые обнаруживают четырехкратное понижение чувствительности за час работы и, кроме того, ухудшение на порядок порога чувствительности по сравнению с кислородно-серебряно-цезиевыми вакуумными. Основная причина этого — в неправильном режиме газового накопления, которое было подобрано (еще в 1933 г.) для работы на напряжении в 240 в, с целью получения возможно более высокой чувствительности. Эта высокая чувствительность оказалась, однако, фиктивной и, кроме того, качество звуковоспроизведения значительно хуже, чем оно могло бы быть при разумном режиме рабочего режима.

Заключение. Создание фотоэлементов положило начало ныне отпочковавшейся от собственно электротехники фотоэлектрической технике, напо-

добнее того, как в свое время из электротехники выделилась радиотехника, а из этой последней в свою очередь — радиолокация.

Важнейшее, к чему привело создание техники фотоэлементов, — это передача световых сигналов электрическим способом, сперва по проводам, а в дальнейшем — без проводов (тем самым были заложены основы фототелеграфии, телевидения и звукового кино); это, далее, возможность электрического управления механизмами посредством световых сигналов (фотоэлектрическая автоматика) и создание нового вида канала связи — оптического канала (оптическая телеграфная и телефонная связь); наконец, это возможность измерения электрическим, — а следовательно, наибо́льшим и точнейшим — способом различных радиаций от крайнего ультрафиолета и до средней инфракрасной области, причем от самых больших мощностей (солнечная радиация) и до самых малых — до мощностей в 10^{-12} вт. Результаты этого неисчислимы, прежде всего, для самых разнообразных научных исследований, от астрономии и физики до химии, биологии и медицины. С развитием на основе этих исследований соответствующих производств роль фотоэлементов еще больше возрастет.

Литература

1. Г. Симон и Р. Зурман. Фотоэлементы и их применения. ГТИ, 1936.
2. С. Ю. Лукьянов. Фотоэлементы. Изд-во Академии наук СССР, 1948.
3. Н. С. Хлебников. Электронные умножители. УФН, т. 24, стр. 358, 1940 (Обзор, см. также список литературы).
4. Б. Т. Коломиец. Фотосопротивления. Электричество, стр. 57, № 3, 1949 (Обзор, см. также список литературы).
5. Н. А. Капцов. Электрические явления в газах и вакууме. ГТИ, 1947.
6. Н. С. Хлебников и А. Е. Меламид. Изв. Академии наук СССР, серия физическая, т. 8, стр. 309, 1944.
7. W. Uijani. Ann. d. Phys., т. 34, стр. 241, 1888.
8. Л. О. Грондаль. УФН, т. 12, стр. 253, 1934.
9. Б. Ланге, УФН, т. 11, стр. 747, 1931.
10. T. W. Case, Phys. Rev., т. 15, стр. 290, 1917.
11. А. Г. Столетов. Актиноэлектрические исследования. СПб, 1889.
12. J. Elster, H. Geitel. Ann. d. Phys., т. 48, стр. 629, 1892.
13. В. К. Зворыкин. УФН, т. 14, стр. 774, 1934.
14. К. Нентвиг. Газоразрядные лампы в технике. Госэнергоиздат, 1946.
15. В. Л. Грановский. УФН, т. 13, стр. 805, 1933.
16. Б. Т. Коломиец. ЖТФ, т. 17, стр. 125, 1947.
17. Геихман и Сорока. „Автоматика и телемеханика“. т. 6, стр. 4, 1941.
18. В. К. Зворыкин и Е. Д. Вильсон. Фотоэлементы и их применение, 1936; Халфин. Фотоэлементы и их применение, 1936; Тумерман. Фотоэлементы и их применение, 1934; Основы телевидения под редакцией С. Катаева, 1940.
19. С. М. Файнштейн. ЖТФ, т. 18, стр. 39, 1948.
20. М. И. Беляев. Каталог по фотоэлементам. БТИ МПСС, 1947.

[15. 8. 1949]



Применение регулируемых трансформаторов различных типов в городских электрических сетях

Кандидат техн. наук В. Г. ХОЛМСКИЙ

Киевский политехнический институт

Обеспечивая надежность электроснабжения, любая электрическая сеть должна удовлетворять двум основным требованиям.

1) Держать отклонение напряжения у потребителя в допустимых пределах.

2) Передавать электроэнергию с минимальными издержками.

При расчетах городских электрических сетей общепринятым является определение сечений проводов по потере напряжения и допустимому нагреву, узаконенное «Руководящими указаниями» 1940 г. [Л. 1]. Принципиальным недостатком такого метода расчета является стремление решить задачу о выборе сечений проводов, как чисто техническую, хотя, по существу, эта задача является прежде всего экономической. Понятия об экономическом сечении проводов или об экономической плотности тока не признаны как официальные и не упоминаются в «Руководящих указаниях» по проектированию городских сетей. Помимо этого недостатком существующей методики является:

1) установление расчетной потери напряжения, одинаковой для всех сетей, без учета условий регулирования в точке питания сети, что в ряде случаев приводит к отклонениям напряжения, далеко выходящим за допустимые пределы;

2) независимое раздельное нормирование расчетной потери напряжения для сетей высокого и низкого напряжения, в то время как отклонение напряжения у потребителей зависит от суммарной потери напряжения во всех звеньях сети;

3) игнорирование возможности применения новых технических средств, в частности регулируемых трансформаторов для улучшения режима напряжений;

4) пренебрежение тем, что проверка на нагрев может в некоторых случаях служить основанием для увеличения сечений проводов по сравнению с экономическими, а отнюдь не для их уменьшения.

Предлагается методика расчета городских электрических сетей при использовании регулируемых трансформаторов. Даны методы определения экономической потери напряжения для различных схем сети и определения допускаемой предельной потери напряжения при установке регулируемых трансформаторов различных типов. Указаны области применения различных типов трансформаторов. Исследовано влияние регулируемых трансформаторов на экономические показатели сети.

Чтобы обеспечить регулирование городских сетей с оптимальными экономическими параметрами, представляется целесообразным установить такие понятия о звеньях потери напряжения ΔU_s — экономическая потеря напряжения,

которой сеть работает с экономической плотностью тока во всех звеньях; ΔU_n — предельная потеря напряжения, при которой отклонения напряжения у потребителей достигают наибольших допускаемых значений; ΔU_p — расчетная потеря напряжения, по которой следует проводить выбор сечений проводов.

В идеальном случае следовало бы принимать $\Delta U_p = \Delta U_s$. Однако, в сетях значительной протяженности ΔU_s окажется недостижимой величиной даже при наличии дополнительных регулирующих устройств. Поэтому для ΔU_p должны применяться меньшие значения, определяемые неравенствами

$$\Delta U_p \leq \Delta U_s \text{ и } \Delta U_p \leq \Delta U_n.$$

Если, без применения дополнительных устройств, окажется, что $\Delta U_n \ll \Delta U_s$, следует дополнительно рассмотреть вопрос целесообразности установки трансформаторов специальных типов. В качестве таковых для городских сетей могут быть указаны:

1) Мощные понизительные трансформаторы со встроенным многоступенчатым регулятором напряжения под нагрузкой. Такие трансформаторы применимы на подстанциях энергетических систем, питающих городские сети. Установка позволяет осуществить встречное регулирование в точке питания сети, что приводит к значительному облегчению последней.

2) Вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ) и автотрансформаторы, включаемые в схему линии высокого напряжения, питающей

питательный пункт или группу понизительных трансформаторов. Чтобы избежать чрезмерного удорожания переключающих устройств, вольтодобавочные трансформаторы средней мощности выполняются нереверсируемыми с одной или двумя ступенями напряжения на 5—10%.

3) Сетевые понизительные трансформаторы со встроенным регулированием, освоены нашими заводами еще до Великой Отечественной войны [Л. 2]. Поскольку это обычно трансформаторы небольшой мощности, то для них применима простейшая схема одноступенчатого регулирования на 5% со стороны низкого напряжения. При этом со стороны высокого напряжения сохраняются нормальные глухие ответвления.

4) Нерегулируемые автотрансформаторы с коэффициентом трансформации порядка 1,05, включаемые наглухо в рассечку магистрали низкого напряжения. Такой трансформатор может быть помещен в ящике и подвешен на любой сетевой опоре или установлен на вводах сравнительно крупного потребителя. В последнем случае соответственно рассчитанный трансформатор может быть использован в трехпроводных сетях в качестве нейтралера. Вместо трехфазного автотрансформатора может быть использовано включение по схеме вольтодобавочного трансформатора группы из трех малых однофазных трансформаторов типа котельных¹. Глухое включение без переключающих устройств и автоматики обеспечивает простоту, надежность и дешевизну устройства. Изготовление низковольтных трансформаторов и автотрансформаторов может быть выполнено в любых электротехнических мастерских.

Определение экономической потери напряжения. При малом числе нагрузок, расположенных вдоль линии, и значительной длине участков целесообразно сооружение линии с постоянной плотностью тока, равной экономической j_e (а/мм²). Обозначив длину и мощность производного участка соответственно l_i км и P_i кВт, полную длину l_0 км, номинальное напряжение U_n кв, удельное сопротивление проводов r_0 (ом·мм²/км) и сдвиг фаз φ_c и приняв для реактивного сопротивления некоторое среднее значение x_0 (ом/км), получим для экономической потери напряжения в процентах выражение:

$$\Delta U_s = \frac{\sqrt{3} l_0 j_e \cos \varphi_c}{10 U_n} + \frac{x_0 \operatorname{tg} \varphi_c \sum P_i l_i}{10 U_n^2}.$$

Для развитых сетей со многими нагрузками обычно применяются магистрали постоянного сечения или с ограниченным числом ступеней сечения. Чтобы распространить понятие об экономической плотности тока на такие магистрали, введем в наши рассуждения среднюю квадратичную по длине магистрали мощность [Л. 3]. В об-

щем виде квадратичная мощность определяется выражением:

$$S_{кв} = \sqrt{\frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} S_x dx}. \quad (1)$$

При сечении магистрали или ее ступени s линейная квадратичная плотность тока

$$j_{кв} = \frac{S_{кв}}{\sqrt{3} U_n s}.$$

Приняв $j_{кв} = j_s$, можно определить экономическое сечение и соответствующую потерю напряжения. Рассмотрим возможные случаи расчета.

Случай „а“. Высоковольтная магистраль с сосредоточенными нагрузками. Обозначив реактивную мощность на произвольном участке Q_i квар, из выражения (1) получим:

$$S_{кв} = \sqrt{\frac{1}{l_0} \sum (P_i^2 + Q_i^2) l_i}.$$

Экономическое сечение проводов

$$s_s = \frac{S_{кв}}{\sqrt{3} U_n j_s}.$$

Определив соответствующие значения активного r_0 ом/км и реактивного сопротивления для определения ΔU_s , имеем:

$$\Delta U_s = \frac{r_0 \sum P_i l_i + x_0 \sum Q_i l_i}{10 U_n^2}.$$

Случай „б“. Низковольтная магистраль с равномерно распределенной активной нагрузкой p_0 (вт/м). Длины принимаем в метрах и напряжения — в вольтах. Для этого случая получается:

$$P_{кв} = \frac{p_0 l_0 10^{-3}}{3}; \quad s_s = \frac{p_0 l_0}{3 U_n j_s}; \quad \Delta U_s = \frac{150 r_0 l_0 j_s}{U_n}.$$

При расчете по заданной потере напряжения ΔU_n существует некоторая критическая длина магистрали, при которой квадратичная плотность тока в ней равна экономической. Эта длина определяется выражением:

$$l_{кр} = \frac{U_n \Delta U_n}{150 r_0 j_s}.$$

При длинах, меньших критической, сеть следует рассчитывать по экономической плотности тока, при больших критической — по потере напряжения.

При удельном весе проводникового металла γ (кг/дм³) его относительный расход g (кг/квт) при расчете сети с экономической плотностью и по потере напряжения соответственно будет:

$$g_s = \frac{\gamma l_0}{U_n j_s} \quad \text{и} \quad g_0 = \frac{150 \gamma l_0^2}{U_n^2 \Delta U_n}.$$

Можно также показать, что потеря мощности в процентах

$$\Delta p = \frac{\Delta U}{1,5}.$$

¹ Установка нерегулируемой вольтодобавочной группы из трех котельных трансформаторов предложена инж. С. Мешель. Вопрос о применимости таких трансформаторов в городских сетях исследован бригадой Киевского отделения НИТОЭ под руководством автора статьи.

Случай „в“. Низковольтная магистраль с распределенной и сосредоточенными нагрузками. Расчетная схема дана на рис. 1. Сосредоточенные нагрузки показаны на схеме в долях от суммарной распределенной нагрузки магистрали. Расстояния от питающего пункта до ответвлений выражены в долях от общей длины магистрали. В этом случае:

$$P_{кв} = p_0 l_0 10^{-3} \times \sqrt{\int_{1-\beta_n}^1 x^2 dx + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{1-\beta_i}^{1-\beta_{i+1}} (x + \sum_{k=i}^{k=n} \alpha_k)^2 dx} = \psi p_0 l_0 10^{-3},$$

где после интегрирования ψ имеет значение:

$$\psi = \sqrt{\frac{1}{3} + \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \beta_i + 2 \sum_{i=1}^{i=n-1} \sum_{k=i+1}^{k=n} \alpha_i \alpha_k \beta_i + \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \beta_i (2 - \beta_i)}.$$

Остальные величины

$$s_a = \frac{\psi p_0 l_0}{\sqrt{3} U_n j_s} \text{ и } \Delta U_s = \frac{50 \sqrt{3} \psi l_0 j_s b}{4 U_n},$$

где
$$b = 1 + 2 \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \beta_i.$$

Полная экономическая потеря напряжения должна быть подсчитана от точки питания до наиболее удаленного потребителя, находящегося на магистрали или на ответвлении.

Значения экономической плотности тока для воздушных и кабельных сетей высокого напряжения нормированы решениями Техсовета МЭС [Л. 4—5]. До уточнения вопроса этими же значениями можно пользоваться и для низковольтных сетей. При этом, при числе часов использования максимума до 3000, удельная критическая длина сети с медными и алюминиевыми проводами при напряжении 380 в получится около 60 м на 1% потери напряжения.

Определение предельной потери напряжения. Предельная потеря напряжения зависит от допустимых отклонений напряжения у потребителей, условий регулирования в точке питания сети и типа примененных трансформаторов.

На рис. 2 представлены четыре возможные схемы регулирования напряжения у потребителей, подключенных к низковольтной сети некоторого трансформаторного пункта.

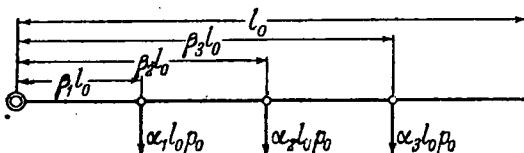


Рис. 1.

Схема а. Регулирование производится только в точке питания высоковольтной сети. На рассматриваемом трансформаторном пункте установлен обычный понизительный трансформатор с глухим ответвлением.

Схема б. Понизительный трансформатор первичной обмотке имеет обычные глухие отводы, а во вторичной встроено одно регулируемое дополнительное ответвление, дающее повышение напряжения на 5%.

Схема в. В рассечку высоковольтной сети в некоторой точке включен регулируемый вольтдобавочный трансформатор или автотрансформатор, имеющий ступени — 0—5—10%.

Схема г. В рассечку низковольтной сети в глухо включен вольтдобавочный автотрансформатор или трансформатор, дающий некоторое постоянное повышение напряжения.

Сети высокого и низкого напряжения считаем разомкнутыми. Потери напряжения в отдельных элементах в максимальном режиме обозначены на схемах через ΔU с соответствующими индексами. В минимальном режиме принимаем их k от максимальных. Потери напряжения в вольтдобавочных трансформаторах пренебрегаем, так как они обычно не превышают 0,5%. В некоторых точках сети происходит повышение напряжения. Соответствующие „надбавки“ обозначены на схемах через δU . Перечислим их здесь:

δU_n — надбавка в точке питания, зависящая от условий регулирования в этой точке.

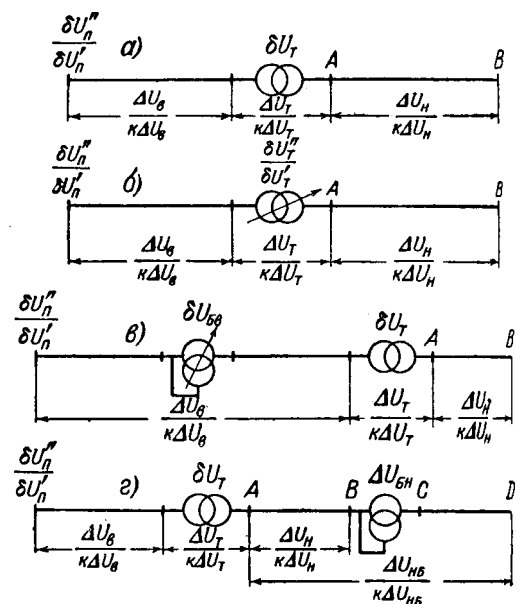


Рис. 2. Схемы регулирования напряжений.

δU_T — надбавка, создаваемая понизительным трансформатором. Она состоит из двух частей: δU_{T1} — обусловленной соотношением между номинальными напряжениями вторичной обмотки низковольтной сети; δU_{T2} — определяемой установкой ответвлений обмотки высокого напряжения. Для стандартных сетевых трансформаторов $\delta U_{T1} = 5\%$ и δU_{T2} может иметь значения -5% , 0% и $+5\%$. При этом для результирующей надбавки получается 0% , $+5\%$ и $+10\%$. Для трансформаторов с глухими ответвлениями выбранная надбавка δU_T остается постоянной во всех режимах. Для регулируемых трансформаторов простейших типов значения δU_T в максимальном и минимальном режимах могут отличаться на 5% .

δU_{BV} — надбавка высоковольтного вольтодобавочного трансформатора. В минимальном режиме принимаем ее равной нулю, в максимальном $+5\%$ или $+10\%$.

δU_{BH} — надбавка глухого низковольтного вольтодобавочного трансформатора, являющаяся постоянной во всех режимах. Ее допустимые значения будут определены ниже.

Все потери и надбавки считаем выраженными в процентах от номинального напряжения сети. Переменные надбавки снабжены дополнительными индексами ' и '' соответственно для минимального и максимального режимов.

Пользуясь относительными значениями потерь напряжения, мы не делаем в дальнейшем никаких ограничивающих предположений о структуре сетей высокого и низкого напряжения, кроме предположения об отсутствии замкнутых контуров. Поэтому к данной линии высокого напряжения ближе и дальше рассматриваемого трансформаторного пункта может быть подключено произвольное количество других трансформаторных пунктов. Точно так же в данной низковольтной линии может быть произвольное количество промежуточных нагрузок и ответвлений. Во всех случаях предельная потеря напряжения определяется как наибольшая допустимая суммарная потеря напряжения в элементах сети от точки питания до наиболее удаленного потребителя. Значения предельной потери напряжения для потребителей, получающих энергию от разных трансформаторных пунктов в данной сети будут различными. Дело в том, что величина допустимых трансформаторных надбавок зависит не только от условий регулирования в точке питания, но и от величины потери напряжения в высоковольтной сети. Каждой ступени надбавки трансформаторов соответствует вполне определенный интервал значений потери напряжения в высоковольтной сети. Наименьшую надбавку необходимо применять у трансформаторов, расположенных ближе точки питания. При некотором удалении трансформатора возникает возможность перестановки ответвлений и соответствующего повышения предельной потери напряжения. Наименьшую потерю напряжения в высоковольтной сети, при которой допустима работа трансформаторов с не-

которой заданной надбавкой, условимся называть в дальнейшем минимально допустимой электрической удаленностью трансформатора и будем обозначать λ_n .

Основной задачей расчета является определение предельной потери напряжения. Вспомогательными задачами могут быть либо определение допустимых надбавок понизительного и вольтодобавочных трансформаторов, либо минимально допустимой удаленности понизительного трансформатора.

Для получения расчетных выражений необходимо написать уравнения отклонений напряжения в контрольных точках сети A, B, C и D , показанных на схемах. Уравнения пишем для минимального и максимального режимов и соответственно получаем по два неравенства для каждой величины. Одно из них будет расчетным в зависимости от знака.

Допустимые положительные и отрицательные отклонения напряжения обозначим ΔU_{om}^B и ΔU_{om}^H . Непосредственно у потребителей нормированы отклонения $\pm 6\%$. Вводя в расчет только наружную сеть, можно пренебречь потерями напряжения в домовой сети в минимальном режиме и оценить их в $1-2,5\%$ в максимальном. При этом получим $\Delta U_{om}^B = +6\%$ и $\Delta U_{om}^H = -(3,5 \div 5)\%$.

Расчетные выражения для всех рассмотренных схем сведены в табл. 1.

Установка регулирующих устройств может быть технически оправдана при наличии таких условий: схема b $\delta U_T'' - \delta U_T' \geq 5$; схема $в$ $\delta U_{BV} \geq 5 - 10$; схема $г$ $\delta U_{BH} \geq 2,5 - 5$.

В табл. 2 приведены численные значения предельной потери напряжения для городских сетей при применении регулируемых трансформаторов различных типов. При ее составлении принято:

$$\Delta U_T = 2\%; k = 0,25; \Delta U_{om}^B = +6\%; \Delta U_{om}^H = 5\%.$$

Для δU_{BH} в таблице приведены округленные значения.

Отсутствие в табл. 2 данных для какого-либо типа регулирования показывает на техническую нецелесообразность применения его.

Анализируя данные табл. 2, можно сделать такие выводы;

1. Установка мощных регулируемых трансформаторов в точке питания сети приводит к изменению δU_n и должна обеспечивать встречное регулирование напряжения. Так, установка трансформаторов с пределами регулирования $\pm 7,5\%$ дает возможность перехода от условий позиций 1-2 к условиям позиций 9-11, при этом ΔU_n увеличивается от 5,5 до 18%. В сетях, питающихся от коммунальных электростанций, целесообразно осуществление встречного регулирования непосредственным воздействием на генераторы.

2. При отсутствии встречного регулирования предельная потеря напряжения составляет 5,5—8%. При расчете сети на суммарную потерю напряжения 12—14%, предусмотренную суще-

Таблица

Расчетные выражения для определения предельной потери напряжения в городских сетях

Схема	Расчетная величина из условий минимального режима	Расчетная величина из условий максимального режима
а	$\delta U_T \leq \Delta U_{om}^B - \delta U_n' + k(\Delta U_B + \Delta U_T)$	$\delta U_T \leq \Delta U_{om}^B - \delta U_n'' + \Delta U_B + \Delta U_T$
	$\lambda_m \geq \frac{1}{k} (\delta U_n' + \delta U_T - \Delta U_{om}^B) - \Delta U_T$	$\lambda_m \geq \delta U_n'' + \delta U_T - \Delta U_{om}^B - \Delta U_T$
	$\Delta U_n \leq \frac{1}{k} (\delta U_n' + \delta U_T - \Delta U_{om}^H) - \Delta U_T$	$\Delta U_n \leq \delta U_n'' + \delta U_T - \Delta U_{om}^H - \Delta U_T$
б	$\delta U_T' \leq \Delta U_{om}^B - \delta U_n' + k(\Delta U_B + \Delta U_T)$	$\delta U_T'' \leq \Delta U_{om}^B - \delta U_n'' + \Delta U_B + \Delta U_T$
	$\lambda_m \geq \frac{1}{k} (\delta U_n' + \delta U_T' - \Delta U_{om}^B) - \Delta U_T$	$\lambda_m \geq \delta U_n'' + \delta U_T'' - \Delta U_{om}^B - \Delta U_T$
		$\Delta U_n \leq \delta U_n'' + \delta U_T'' - \Delta U_T - \Delta U_{om}^H$
в	$\delta U_T \leq \Delta U_{om}^B - \delta U_n' + k(\Delta U_B + \Delta U_T)$	$\delta U_{EB} \leq \Delta U_{om}^B - \delta U_n'' - \delta U_T + \Delta U_B + \Delta U_T$
	$\lambda_m \geq \frac{1}{k} (\delta U_n' + \delta U_T - \Delta U_{om}^B) - \Delta U_T$	$\lambda_m \geq \delta U_n'' + \delta U_T + \delta U_{EB} - \Delta U_{om}^B - \Delta U_T$
		$\Delta U_n \leq \delta U_n'' + \delta U_T + \delta U_{EB} - \Delta U_{om}^H - \Delta U_T$
г	$\delta U_T \leq \Delta U_{om} - \delta U_n' + k(\Delta U_B + \delta U_T)$	$\delta U_T \leq \Delta U_{om}^B - \delta U_n'' + \Delta U_B + \Delta U_T$
	$\lambda_m \geq \frac{1}{k} (\delta U_n' + \delta U_T - \Delta U_{om}^B) - \Delta U_T$	$\lambda_m \geq \delta U_n'' + \delta U_T - \Delta U_{om}^B - \Delta U_T$
	$\delta U_{EH} \leq \Delta U_{om}^B - \delta U_T k(\Delta U_B + \Delta U_T + \Delta U_H)$	$\delta U_{EH} \leq \Delta U_{om}^B - \delta U_n'' - \delta U_T + \Delta U_B + \Delta U_T + \Delta U_H$
		$\Delta U_n \leq \delta U_n'' + \delta U_T + \delta U_{EH} - \Delta U_{om}^H - \Delta U_T$

Таблица

Значения предельной потери напряжения в % в городских сетях при применении трансформаторов различных типов

№ позиции	$\delta U_n'$	$\delta U_n''$	λ_m	Схема а		Схема б			Схема в			Схема г		
				δU_T	ΔU_n	$\delta U_T'$	$\delta U_T''$	ΔU_n	δU_T	δU_{EB}	ΔU_n	δU_T	δU_{EH}	ΔU_n
1	+7,5	+2,5	4	0	5,5	0	5	10,5	0	5	10,5	—	—	—
2			4,5	0	5,5	0	5	10,5	0	5	5,5	—	—	—
3	0	0	0	5	8	—	—	—	—	—	—	5	2,5	10,5
4			2	5	8	5	10	13	5	5	13	5	2,5	10,5
5			7	5	8	5	10	13	5	10	18	5	2,5	10,5
6	0	+5	0	0	8	—	—	—	—	—	—	0	7,5	15,5
7			2	5	13	—	—	—	—	—	—	5	5	18
8			7	5	13	5	10	18	5	5	18	5	5	18
9	0	+10	2	0	13	—	—	—	—	—	—	0	10	23
10			7	5	18	—	—	—	—	—	—	5	5	23
11			12	5	18	5	10	23	5	5	23	5	5	23

ствующими нормами, отклонение напряжения у потребителей выйдет за допустимые пределы.

3. В этих условиях крупный эффект может дать применение регулируемых трансформаторов по схемам б и в.

4. При наличии встречного регулирования схемы б и в могут быть применены только при удаленностях свыше 7—12%. В этом случае бо-

лее эффективна установка глухих вольтодобавочных трансформаторов низкого напряжения.

Установка глухих вольтодобавочных трансформаторов. Допустимые надбавки глухих трансформаторов укладываются в шкалу 2,5—5—7,5—10%. Наиболее ходовыми будут надбавки 2,5—5%. Представляется целесообразным осуществить обе надбавки в одной единице. Для этого

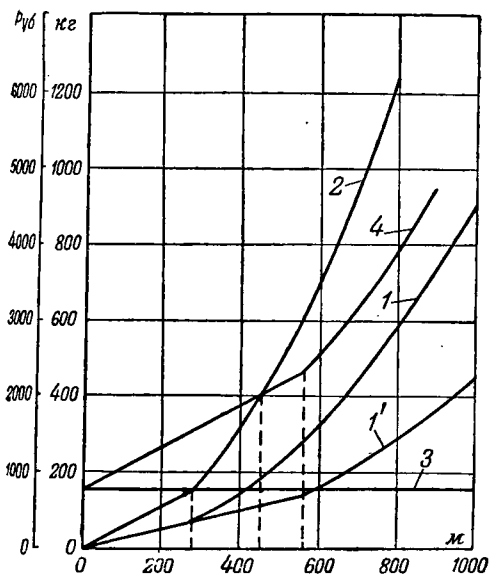


Рис. 3.

1 — вес меди при $\Delta U_p = 5\%$; 1' — то же при $\Delta U_p = 10\%$; 2 — стоимость сети при $\Delta U_p = 5\%$; 3 — стоимость вольтодобавочного трансформатора; 4 — стоимость сети с вольтодобавочным трансформатором при $\Delta U_p = 10\%$.

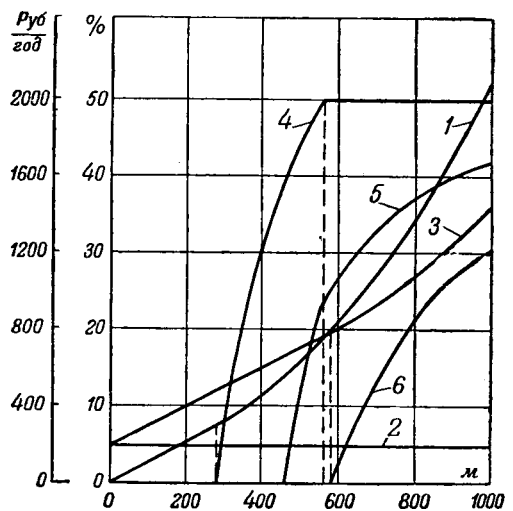


Рис. 4.

Эксплуатационные расходы. 1 — по сети при $\Delta U_p = 5\%$; 2 — по вольтодобавочному трансформатору; 3 — по сети с вольтодобавочным трансформатором при $\Delta U_p = 10\%$. Относительная экономия: 4 — меди; 5 — первоначальных затрат; 6 — эксплуатационных материалов.

трансформатор должен иметь дополнительную отпайку, а вольтодобавочный трансформатор — включать по схеме, дающей сдвиг фазы на 60° . Надбавки 7,5 и 10% можно получить последовательным включением двух единиц по 5 и 2,5%. Точка установки вольтодобавочного трансформатора определяется после расчета напряжения в сети как точка с наименьшим допустимым напряжением. Проходная и собственная мощности трансформатора, в свою очередь, определяются положением точки его установки. На магистрали с равномерно распределенной нагрузкой для этих величин имеем:

$$l_s = l_0 \left(1 - \sqrt{\frac{\delta U_{BH}}{\Delta U_{HB}}} \right); S_{БП} = p_0 l_0 \sqrt{\frac{\delta U_{BH}}{\Delta U_{HB}}};$$

$$S_{БС} = \delta U_{BH} p_0 l_0 \sqrt{\frac{\delta U_{BH}}{\Delta U_{HB}}}.$$

Экономическая эффективность установки глухопереключаемых трансформаторов, как и глухопереключаемых трансформаторов других типов, зависит от длины магистралей. Для ее оценки могут служить графики типа представленных на рис. 3 и 4. Графики построены для случая установки вольтодобавочного автотрансформатора собственной мощностью в 1000 вА, для повышения напряжения на 5% в магистрали мощностью 27 кВт и напряжением 380 в. Предельная потеря напряжения без автотрансформатора принята в 5%. Стоимость меди принята в 10,75 руб/кг (с учетом надбавки в 25% на монтаж и стоимость остальных элементов сети, зависящих от длины проводов). Автотрансформатор оценен в 800 руб. При подсчете годовых расходов отчисления по сети и автотрансформатору приняты соответственно в 20 и 15%, стоимость потерь —

ной энергии 15 коп/кВтч, время потерь 1000 ч/год и максимальные потери в автотрансформаторе 10% от его собственной мощности. Экономическая плотность тока принята 2,5 а/мм². Значения критической длины магистрали при потерях напряжения 5 и 10% оказались соответственно 280 и 560 м. При длинах, меньших критической, предполагалось сооружение сети с экономической плотностью тока, при больших — расчет велся по потере напряжения. На графиках рис. 3 показано изменение веса проводов и первоначальных затрат, на графиках рис. 4 — изменение ежегодных эксплуатационных расходов. Из графиков видно, что экономия в весе меди начинается при длинах магистрали свыше 280 м, в первоначальных затратах — свыше 460 м, в эксплуатационных расходах — свыше 580 м. На рис. 4 нанесены также значения относительной экономии в процентах.

Набор аналогичных графиков может значительно облегчить технико-экономические расчеты, связанные с выбором средств регулирования.

Выводы. 1. Городские сети следует проектировать с плотностью тока, близкой к экономической, для чего необходимо выбирать расчетную потерю напряжения в зависимости от ее экономического и предельного значений. В частности, для низковольтных сетей отдельных трансформаторных пунктов в ряде случаев следует принимать различные значения потери напряжения, в зависимости от их удаленности от точки питания.

2. Регулируемые трансформаторы следует применять при длинах низковольтных магистралей свыше 500 м, что встречается в сетях небольших городов. В центральных районах крупных городов при больших плотностях нагрузки и сравнительно малых длинах магистралей сооружение последних с экономической плотностью тока, как правило, возможно и без применения дополнительных регулирующих устройств.

3. Весьма целесообразна установка мощных регулируемых трансформаторов для создания встречного регулирования в точке питания сети. В нужных случаях они могут быть дополнены глухими вольтодобавочными автотрансформаторами.

4. При отсутствии встречного регулирования следует устанавливать вольтодобавочные трансформаторы высокого напряжения на линиях, питающих фидерные пункты сети. Представляется, что такая установка будет экономичнее, чем установка значительного количества мелких сетевых трансформаторов со встроенным регулированием.

5. При наличии встречного регулирования наиболее целесообразна установка глухих вольтодобавочных автотрансформаторов.

6. Применение регулирующих устройств приведет к увеличению оптимальной мощности трансформаторных пунктов, что будет способствовать уменьшению затрат на трансформаторы и аппаратуру и использование трансформаторов

с более высоким к. п. д. при одновременном облегчении сетей.

7. Следует наладить массовый выпуск вольтодобавочных трансформаторов высокого напряжения и разработать несколько типоразмеров вольтодобавочных низковольтных трансформаторов, доступных для изготовления на электротехнических заводах и в мастерских.

Литература

1. Руководящие указания по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока. Госэнергоиздат, 1940.

2. И. А. Антонов и Б. М. Лебедев. Регулирование напряжения под нагрузкой распределительных трансформаторов. Госэнергоиздат, 1940.

3. В. Г. Холмский. Первая Всесоюзная научная техническая сессия по городским электрическим сетям. Доклады, вып. II, 1948.

4. Правила устройства электротехнических установок сильного тока (Указания по проектированию электрических систем.) Госэнергоиздат, 1947.

5. Об экономических плотностях тока для силовых кабелей напряжения 3—6—10 кв. Электрические станции, № 6, стр. 54, 1943.

[8, 10 кв]



К АВТОРАМ ЖУРНАЛА

В анкетах, присланных читателями в редакцию одновременно на протяжении последних нескольких лет, равно в выступлениях на четырех читательских конференциях журнала в 1948 и 1949 гг. в Москве, Киеве, Ленинграде и Свердловске были высказаны весьма существенные замечания по вопросам ИЗЛОЖЕНИЯ в журнале основных научно-технических материалов.

Одобрив в целом тематическое направление и содержание журнала «Электричество», читатели критиковали отдельные недостатки журнала и, в частности, единодушно подчеркивали необходимость решительной борьбы: с отвлеченностью метода рассмотрения некоторых тем, с имеющимся еще в отдельных случаях отрывом теоретических работ от практики, с частым применением в статьях излишне сложного математического аппарата, затрудняющего довольно значительный контингент читателей.

Читатели выражали свою заинтересованность в том, чтобы статьи на актуальные, жизненные темы, освещающие современные научные и инженерные проблемы электротехники, и отражающие передовую советскую техническую мысль, составлялись авторами в сжатом и доступном по форме изложении.

От материалов, помещаемых в журнале, читатели требуют СОЧЕТАНИЯ НАУЧНОЙ ЦЕННОСТИ И ПРАКТИЧЕСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ СОДЕРЖАНИЯ С ПРОСТОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФОРМОЙ ИССЛЕДОВАНИЯ; при этом указывается на необходимость безусловного отказа от узко математического трактовки исследуемого явления. Математические преобразования, обосновывающие расчетные формулы и теоретические соотношения, должны выноситься целиком в приложение к статье. Читатели далеки от мысли снизить научный и проблемный уровень журнала «Электричество»; они вовсе не хотят, чтобы страницы журнала «Электричество» оказались заполненными элементарными, не оригинальными статьями; они и впредь желают видеть в журнале глубоко серьезные и важные

для советских научных работников, исследователей, проектировщиков, конструкторов и других инженеров-электриков промышленности, высшей технической школы, энергетического хозяйства СССР — научные статьи, написанные, однако, доступно: сжато, просто, четко, устремленно, хорошим языком, без нагромождения в основном тексте математических выкладок, которыми, как правило, вместо облегчения понимания предмета уводят в сторону от главного предмета темы и часто заслоняют основной физический смысл исследуемого в статье вопроса.

Ряд выявленных на читательских конференциях из анкет читателей предложений, в этом направлении, уже учтен редакцией в текущей работе путем более строгого отбора и редактирования поступающих статей. Однако наиболее плодотворной была бы реализация указанных выше требований при подготовке статей на более ранней, доредакционной стадии: в процессе авторской работы над темой и над материалом. Высокая требовательность, в смысле изложенных выше соображений, автора к себе ЕЩЕ В ПРОЦЕССЕ ТВОРЧЕСКОЙ РАБОТЫ НАД СТАТЬЕЙ является конечно, решающим фактором.

Редакция журнала «Электричество», в удовлетворение отмеченных, давно назревших, запросов читателей, обращается ко всем авторам журнала с настоятельной просьбой принять во внимание в своей дальнейшей деятельности по журналу эти справедливые запросы читателей журнала, расширив тем самым круг СВОИХ читателей, и выполнив, таким образом, свой авторский долг и почетную обязанность советского деятеля науки и техники перед инженерно-технической общественностью Советского Союза в области технической пропаганды, повышения квалификации и роста технических кадров и развития отечественной электротехники.

Редакция журнала «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ МЕТАЛЛОВ

При некоторых формах электрического разряда происходит сильное разрушение обоих электродов или одного из них. Это вредное явление — «электрическая эрозия» — последнее время стали широко использовать при обработке металлов «электронискровым методом», предложенным Б. Р. Лазаренко. Явление электрической эрозии представляет собой весьма сложный процесс, и физический механизм этого явления до настоящего времени остается неизученным.

Базируясь на рассмотрении существующего материала, авторы считают, что явление электрической эрозии наиболее резко выражено в высоковольтном конденсированном искровом разряде и в низковольтном дуговом разряде при тирпировании дуги большой емкостью (дуга «в искровом режиме»). Уменьшая величину напряжения, до которой заряжен конденсатор, и соответственно увеличивая емкость конденсатора, можно получить и в низковольтном дуговом разряде в «искровом режиме» ту же силу тока, что и в высоковольтном разряде.

В искровом разряде плотность тока достигает больших значений порядка 10^5 — 10^6 а/см², тогда как в дуговом она превосходит 10^2 — 10^3 а/см². В искровом разряде образование паров металла электродов происходит в виде выходящих струй или факелов, вылетающих нормально к поверхности электродов со скоростью нескольких километров в секунду. Отсюда следует, что они подобно взрывам жидких веществ способны разрушать встречающиеся предметы, в первую очередь противоположный электрод. И есть, с точки зрения авторов, основная причина эрозии электродов, т. е. эрозия не связана непосредственно с электрическим разрядом, а является вторичным процессом, обусловленным механическим действием струй паров металла, вызванных разрядом.

Из этой теории следует, что возможны такие режимы разряда (малая плотность тока, большое расстояние между электродами), когда факелы уже не будут способны разрушать противоположный электрод.

Авторами описаны проведенные ими экспериментальные работы, иллюстрированные хорошими фотографиями. В первой серии опытов убедительно показано, что при большом промежутке между электродами величина эрозии значительно меньше, чем при малом промежутке.

В следующих сериях опытов показано, что яркость факелов, их протяженность и правильность формы весьма зависят от формы поверхности электродов и материала, из которого они сделаны. Лучше всего факел развивается у электрода, заточенного на корпус.

Механизм электрической эрозии, в основе которого лежит разрушающее действие факела от противоположного электрода, должен обусловить устранение или заметное уменьшение разрушения при экранировке факела.

Опытная проверка показала, что экран из кварцевой пластинки значительно ослабляет разрушающее действие факела на противоположный электрод. На самой кварцевой пластинке, экранировавшей электрод, образовывались борозны от воздействия факела.

С целью еще сильнее подчеркнуть роль факела авторы провели ряд опытов с электродами, помещенными в миллиметровых капиллярах, высверленных в кварце. Выходящий через боковой канал факел неустойчив, но обладал сильным эрозионным действием при большой мощности, подводимой к электродам. Этот же факел делается слабым и устойчивым при уменьшении мощности, но производит слабое разрушающее действие на металлическую стенку, куда он направлен.

Эрозионное действие факела усиливается, если электроды помещены в жидкость. Повидимому, жидкость ограничи-

вает канал, препятствуя, подобно капилляру, расширению факела и усиливая его разрушающее действие.

В заключении констатируется, что опыты подтвердили выдвинутую авторами гипотезу о механизме электронискровой эрозии металлов, как о вторичном процессе, обусловленном разрушающим действием факелов на противоположный электрод. Существенным условием реализации этого механизма, повидимому, является движение факелов с надкритической скоростью. Что касается самого процесса разрушения, то этот вопрос еще не выяснен; не исключена возможность, что здесь играют роль явления, аналогичные кавитационному разрушению металла.

(Известия Академии наук СССР, серия физич., т. 13, № 5, С. Л. Мардельштам и С. М. Райский)

ЗА РУБЕЖОМ

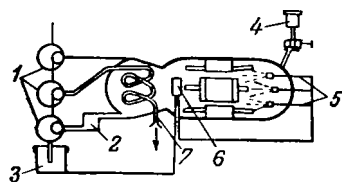
ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПАРООБРАЗОВАНИЕМ

В электрической машине 80% всех тепловых потерь мощности создаются в обмотках и в зубцах ротора и статора, поэтому воздушный зазор следует рассматривать как естественный канал, по которому можно выводить тепло из машины.

Применяемые в современной практике охлаждения электрических машин, воздух и водород обладают низкими коэффициентами теплопередачи, малой теплоемкостью, поэтому все тепло не может быть выведено в воздушный зазор и приходится создавать в машине добавочные охлаждающие поверхности: внутри тела машины — аксиальные и радиальные каналы, а снаружи статора делать дополнительную оболочку для каналов охлаждения внешней его поверхности. При столь сложной системе канализации охлаждающего агента тепловое поле машины неравномерно, очень сложно, а его расчеты не точны.

Применяя в качестве охлаждающего агента пары жидкости, например пары воды, все тепло можно удалить из машины по воздушному зазору. Охлаждающие каналы, составляющие от 4 до 12% длины статора, становятся ненужными. Охлаждающими поверхностями служат только наружная поверхность ротора и внутренняя поверхность статора. Вода через капиллярные трубки распределяется в воздушном зазоре и, попадая на нагретые поверхности ротора и статора, быстро испаряется. Для понижения температуры парообразования внутри машины создается вакуум. При испарении, как известно, поглощается большое количество тепла без повышения температуры испаряющейся жидкости. Следовательно, в зазоре вдоль всей машины сохраняется одинаковая и постоянная температура. Тепловое поле машины становится плоским, и его расчет прост и точен. Коэффициент теплопередачи паров воды приблизительно в 80—100 раз выше коэффициента для воздуха и в 40—50 раз выше коэффициента для водорода, что колоссально снижает расход охлаждающего агента, уменьшает габариты машины и упрощает всю охлаждающую и вспомогательную аппаратуру. Так, например, для охлаждения машины 50 000 кВа с 2% потерей при полной нагрузке требуется в час лишь 1,52 м³ воды вместо 1 140 000 м³ воздуха.

Принципиальная схема охлаждения по методу парообразования показана на рис. 1. Вода поступает в воздушный зазор в виде мельчайших капелек и испаряется, охлаждая поверхность ротора и статора. На другом конце машины помещен конденсатор, куда и устремляется пар из воздушного зазора. Конденсат подается насосом через фильтр в бак, откуда вода через капиллярные трубки вновь поступает в машину. Подача воды регулируется автоматически термостатом, помещенным вблизи конденса-



1—насосы; 2—фильтр для воды; 3—бак для воды; 4—фильтр; 5—питающие трубки; 6—термостат; 7—конденсатор.

Рис. 1.

тора. Температура испарения воды лежит в пределах 20—40° С и регулируется величиной вакуума и количеством подаваемой воды.

Присутствие воды на обмотках машины с воздушным или водородным охлаждением может вызвать повреждение изоляции вследствие проникновения воды вглубь изоляции обмотки. Поглощение воды изоляцией и обмотками у машины с охлаждением по методу истарения совершенно невозможно, так как вода, достигая более глубоко лежащих и поэтому более нагретых частей машины, моментально испаряется. Пар же значительно лучший изолятор, чем воздух. Зависимость состояния изоляции от температуры показана на кривых рис. 2.

Опасность коррозии в машине с охлаждением испаряющейся водой значительно меньше, чем у машин с воздушным и водородным охлаждением. Вода, распыляясь, освобождает около 95% содержащегося в ней воздуха, но он не придет в соприкосновение ни с ротором, ни со статором, так как испаряющаяся вода действует как щит; кроме того, идет постоянная откачка воздуха насосом и очистка фильтром воды от примесей. При замкнутом цикле охлаждения длительностью около 6 мин. можно обеспечить высокую чистоту воды и желаемую ее щелочность для задержания процесса коррозии.

Поскольку пар прекрасно очищает все поверхности машины от грязи и различных отложений, то можно объединять несколько машин в одном паровом пространстве, в частности, возбудитель машины делать в одном кожухе с главной машиной. Общность парового пространства исключает необходимость в лишних торцевых щитах, подшипниках, муфтах и т. д. Все это позволяет значительно

1—изоляция машины с охлаждением паром; 2—изоляция машины с воздушным охлаждением.

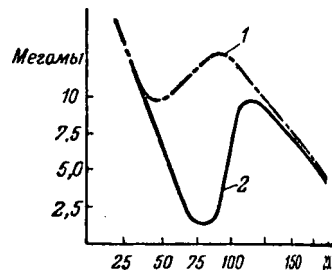


Рис. 2.

сократить габариты машины и площадь, требующую ее установки даже по сравнению с машинами, охлаждаемыми водородом. Наконец, машины с охлаждением паром безопасны не только в отношении взрывобезопасности, но и в отношении дальнейшего преобразования в машины с воздушным и водородным охлаждением, по мнению автора следующие:

1. Экономия веса меди и стали от 5 до 15% без увеличения плотности тока и магнитной индукции.
2. Повышенный к. п. д., экономия веса всей машины от 25% и выше, снижение стоимости мощных машин на 15%.
3. Уменьшение размеров машины и занимаемой площади.
4. Заполнение паром или выпуск пара занимает несколько минут по сравнению с таким же процессом в машинах с водородным охлаждением. Не требуется постоянного наблюдения во время работы. Исключаются большие затраты на потерю водорода и газа для промышленных машин.
5. Вспомогательное оборудование (насосы, термостат, конденсатор и пр.) очень простое, применяется во всех отраслях техники, стоит дешево и всегда имеется в наличии.

[El. Engineering, № 5, 1949, T. de la]

Инж. В. Г. МИТРОФАНОВ

ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЕВРОПЕЙСКИХ СТРАН НАРОДНОЙ ДЕМОКРАТИИ¹

(Обзор)

РУМУНИЯ

Энергоресурсы и их использование. Румыния обладает значительными, но еще мало изученными энергетическими ресурсами. Запасы всех видов энергоресурсов характеризуются следующими цифрами [Л. 1, 2]:

Каменный уголь и антрацит	31—48	млн. т
Бурый уголь и лигнит	2 400—2 838	" "
Торф	67—200	" "
Нефть	95	" "
Нефтяной газ (попутный)	35 млрд.	м ³
Природный газ (метан)	575	" "
Гидроэнергия:		
Среднегодовая мощность	5,93	млн. квт
Минимальная мощность	2,27	" "

Месторождения каменного угля известны в области Банат. В 1939 г. общая добыча каменных углей составила 289 тыс. т.

Месторождения бурых углей расположены в долине р. Жну (рудники — Петрошани, Лупени, Вулкан, Ливазени). Кроме того, имеются месторождения в северной Трансильвании (Лапузи, Лалоу, Мололува, Компанешти, Фалтицени). Запасы лигнитов сосредоточены преимущественно в южном прикарпатском районе, кроме того, небольшие имеются в Трансильвании и в Крышане. В 1939 г. общая добыча бурых углей и лигнитов составляла 2 183 тыс. т. С окончанием войны и проведением ряда

восстановительных работ в 1948 г. добыча вновь возросла до 2 млн. т. По перспективному плану [Л. 14] добыча угля в 1955 г. должна составить 8 млн. т.

Торф, основные месторождения которого расположены в Трансильвании и в районе дельты Дуная, совершенно не разрабатывался и не использовался до прихода к власти народно-демократического правительства.

Основные месторождения нефти расположены в районе Прахова и Дембовицы. Наиболее богатые из них расположены в районе Буштенари и Кемпина. Следует отметить наличие целебных нефтей в районе деревни Досре. Нефть является важнейшим источником энергии в Румынии.

Добыча нефти в Румынии [Л. 3, 19] развивалась следующим образом (в тыс. т):

Годы					
1916	1929	1932	1936	1937	1938
938	4 650	7 213	8 720	7 190	6 642

Годы					
1940	1941	1942	1944	1945	1946
5 920	5 500	5 665	3 525	4 680	4 680

¹ Начало обзора см. Электричество, № 2 и № 3, 1950 г.

Исторические месторождения природного газа расположены по преимуществу в Трансильвании. Основной район добычи газа — Симошеш. По своему химическому составу газ представляет собой почти чистый метан. В нескольких городах Трансильвании — Турда, Уайра и др. — газ потребляется промышленными предприятиями. Добыча природного газа в 1948 г. составила 1,3 млрд. м³. Динамика его добычи с 1939 по 1944 г. представлена ниже (в млн. м³)

Годы					
1939	1940	1941	1942	1943	1944
334,7	362,0	470,8	608,0	474,3	

В топливном балансе Румынии большое место занимает древесное топливо. Лесная площадь страны до второй мировой войны составляла около 6,5 млн. га. Годовой расход древесины оценивался в 16 млн. м³, а годовая поросль — 20 и более млн. м³. Такое хищническое отношение к лесным ресурсам было прекращено лишь с переходом к лесов в собственность народного государства.

Гидроэнергоресурсы используются в Румынии в незначительных размерах. В 1934 г. насчитывалось всего гидроэлектростанций суммарной мощностью 52 тыс. квт. В наше время мощность работающих гидроэлектростанций не превышает 75 тыс. квт или, иначе говоря, гидроэнергетические ресурсы страны используются всего лишь на 3,3% от их потенциальной мощности.

Производство электроэнергии. Хотя в стране в изобилии имеются запасы дешевой гидроэнергии, бурых углей и природного газа — метана, энергетика страны до последнего времени базировалась на дровах и нефти. По пятилетнему плану [Л. 14] общая мощность электростанций страны должна составить 2 млн. квт, по сравнению с довоенной вырастет почти в 4 раза.

Производство электроэнергии всеми станциями Румынии [Л. 2, 4, 11, 15, 16] составляло (млн. квтч):

В 1938 г.	1 148
„ 1940 г.	1 130
„ 1941 г.	1 170
„ 1943 г.	1 600
„ 1945 г.	700
„ 1949 г. (по плану)	1 350

Ниже в табл. 1 указывается распределение вышеприведенной выработки электроэнергии по видам станций (млн. квтч).

Таблица 1

Выработка электроэнергии	Годы		
	1938	1940	1941
станциями общего пользования	538	529	540
промышленными станциями	580	601	630

Выработка электроэнергии гидроэлектростанциями в последнее время (1948—1949 гг.) не превышает (млн. квтч).

Мощность электростанций в целом по стране и по видам станций [Л. 2, 4, 15, 16] представлена в табл. 2 тыс. квт).

Таблица 2

Мощность электростанций	Годы			
	1938	1940	1941	1947
общая мощность электростанций	510,5	504	533	702
в том числе мощность станций общего пользования	262,5	250	263	342
промышленных электростанций	248,0	254	270	360

Выработка электроэнергии электростанциями общего пользования [Л. 2, 15] распределяется по роду первичных двигателей следующим образом (табл. 3).

Таблица 3

	1938 г., %	1947 г., %
Выработка электроэнергии станциями:		
с паровыми машинами и турбинами	70,0	37,3
с дизелями	15,0	54,8
с гидротурбинами	14,6	7,6
с прочими двигателями	0,4	0,3

Распределение электростанций общего пользования по группам мощности по состоянию на 1 января 1948 г. [Л. 2] указывается в табл. 4.

Таблица 4

Группы мощностью, квт	Число станций	Общая мощность, тыс. квт	Средняя мощность, квт
До 100	69	6,0	87
100 — 1 000	87	34,8	400
1 000 — 5 000	19	40,6	2 135
5 000 — 10 000	6	44,3	7 380
10 000 — 25 000	6	103,4	17 230
25 000 — 50 000	1	28,0	28 000
50 000 — 100 000	1	85,5	85 500

Министерство электрификации осуществляет сооружение системы электропередачи энергии на большое расстояние. По договору о хозяйственном сотрудничестве между Румынией и Болгарией в июле 1949 г. было закончено сооружение высоковольтной линии электропередачи Бухарест — Русс (Болгария). Эта линия позволит снабжать электроэнергией, выработанной в Бухаресте, промышленность и сельское хозяйство Русенского района в Болгарии. В дальнейшем, когда будет сооружено Единое болгарское высоковольтное кольцо, к которому будет примыкать и эта линия, дешевая гидроэнергия Болгарии будет передаваться в обратном направлении в Румынию.

Электрификация деревень Румынии пока сравнительно невелика: электроэнергией пользуется всего лишь 427 сел, или 3,3% всего их количества, в то время как города электрифицированы на 92,5%.

Электроснабжение столицы и крупнейшего промышленного центра Румынии — Бухареста — осуществляется целой группой электростанций. Сюда входят: паротурбинная станция Грозавешти, дизельная станция «Филарет» мощностью 11,9 тыс. квт, гидроэлектростанция Добрешти мощностью 16 000 квт, станция Шитул — Голешти и другие станции бывшей компании «Конкордия», в общей сложности передававших городу 145 млн. квтч в год (относится только к компании «Конкордия»).

Электротехническая промышленность Румынии насчитывает 61 предприятие с общим числом работающих на 15 октября 1947 г. — 3 744 чел. Валовая продукция этих предприятий [Л. 5] в 1939 г. составляла 700 млн. лей, или около 1% валовой продукции всей промышленности Румынии. Народно-демократическое правительство стремится к созданию в Румынии сильной электротехнической промышленности.

В конце 1948 г. был использован для производства электродвигателей, трансформаторов и других электромаши и аппаратов завод Динамо в Бухаресте. В Брашове был пущен завод по производству одноцилиндровых дизельных двигателей 6 л. с. для насосов, применяемых в нефтяной, горнорудной промышленности и энергетике. Завод имени «23 августа» начал производство серии дизельных двигателей от 20 до 300 л. с. для железнодорожного транспорта и нефтяной промышленности. В 1949 г. закончено строительство заводов: электромаши и в Брашове, электроаппаратуры в Бухаресте, а также завода изоляционных материалов и экспериментальной электротехнической лаборатории в других городах Румынии.

ВЕНГРИЯ

Энергоресурсы и их использование. Венгрия обладает следующими энергетическими ресурсами: а) углями — каменными и бурными; б) торфом; в) нефтью; г) природным газом; д) лесом и е) гидроэнергией [Л. 6].

Каменный уголь имеется в небольших количествах в районе Мечек близ Дуная. Уголь высококачественный, коксующийся. Запасы его [Л. 7] оцениваются в 200 млн. т. Бурый уголь имеется в значительных количествах в районе Эстергома, а также в районе Шалготарья. Оба месторождения расположены близко от столицы — важнейшего промышленного центра страны и на линии железной дороги. Запасы бурого угля оцениваются следующим образом: вероятные—3 569 млн. т, промышленные—1 516,6 млн. т.

Структура электростанций общего пользования по первичных двигателей в 1938 г. представляла следующую картину:

Мощность станций с паровыми турбинами или машинами	669,3 тыс.
Мощность станций с дизелями или газовыми двигателями	26,3
Мощность гидроэлектростанций	5,2

К числу крупных электростанций Венгрии относятся электростанция Татабанга мощностью 30 тыс. кВт, введённая в 1938 г. 56 млн. кВт; электростанция Габриеллен, выработавшая в 1938 г. 11 млн. кВт; г. Сегед, 8,2 млн. кВт и некоторые другие.

Табл.

	Единица измерения	1937 г.	1938 г.	1943 г.	1946 г.	1947/48 г.	1948/49 г. план	1949 г.
Уголь, всего	тыс. т	8 964	9 340	12 156	6 348	9 856	10 200	11
В том числе:								
каменный	" "	912		1 368	720			
бурый	" "	8 052		10 788	5 628			
Нефть	" "	2,4	37,3	837	684	496	600	10
Природный газ	млн. м³	3,6	8,1	70,8	91,2	204,8	—	—

Залежи торфа наблюдаются в районах Зала—Шомодьи и Ханшаг, а кроме того, в целом ряде других районов. Общие запасы торфа оцениваются в 1,1 млрд. м³, что по калорийности соответствует 225 млн. т бурых углей. Запасы в районе Зала—Шомодьи оцениваются в 210 млн. м³, а в районе Ханшаг—200 млн. м³. В настоящее время из торфа изготавливаются брикеты (4 600—4 800 кал на килограмм).

Месторождения нефти имеются в районе Бюкских гор и в комитате (области) Зала. Запасы нефти в комитате Зала предварительно оценены в 5,2 млн. т.

В комитате Зала, в окрестностях Будапешта и у Бая, за Тиссой распространены месторождения природного газа. Запасы природного газа в районе Зала определены в 2 455 млн. м³.

Лесная площадь Венгрии составляет около 1,14 млн. га, а запасы древесины оцениваются в 62 млн. м³.

Мощность, которая может быть получена при помощи гидроэнергии, оценивается в 130 000 кВт. В настоящее время используемая мощность гидроэлектростанций составляет 8 500 кВт, или всего 1% установленной мощности электростанций.

Добыча каменного и бурого угля, нефти и природного газа [Л. 7—9] представлена в табл. 5.

Производство электроэнергии. Производство электроэнергии [Л. 7, 11] характеризуется нижеследующими цифрами (млн. кВтч).

в 1937 г.	1314,4
1938 г.	1369,6
1946 г.	1280,0
1947—1948 г.г. (с 1/VII по 31/VI)	1934,0
1949—1950 г.г. (план)	2000,0
1954 г. (план)	4200,0

Распределение мощности в производстве электроэнергии между станциями общего пользования и промышленными станциями [Л. 7] приводится в табл. 6.

Таблица 6

	1937 г.	1938 г.
Мощность, тыс. кВт:		
станций общего пользования	683,6	700,8
промышленных станций	165,1	170,9
Всего	853,7	871,7
Выработка электроэнергии, млн. кВтч:		
станциями общего пользования	1031,5	1110,2
промышленными станциями	252,9	259,4
Всего	1314,4	1369,6

Крупнейшей в Венгрии энергосистемой является Будапештская, потребление электроэнергии в которой представлено в табл. 7.

Табл.

	Годы				
	1937	1938	1946	1947	1948
Потребление электроэнергии, всего млн. кВтч	346,2	360,0	475,4	568,2	583,4
в том числе:					
от собственных станций	336,6	320,4	269,2	356,1	414,9
получено со стороны	39,6	39,6	206,2	212,1	168,5
Число абонентов, тыс.	260	269	310	318	328

В Будапештском районе Матра должна быть в эксплуатацию первая очередь электростанции мощностью 32 тыс. кВт.

Первым пятилетним перспективным планом предусмотрена постройка шести новых электростанций, в том числе гидроэлектростанции на реке Тисса мощностью 14 тыс. кВт (4 генератора по 3,5 тыс. кВт). Выработка электроэнергии этой станцией составит около 70 млн. кВтч в год.

По плану электрификации Венгрии проектируется строительство еще двух гидроэлектростанций на Тиссе и на Дунае. Мощность последней должна составить 60 тыс. кВт.

В табл. 8 показана структура потребления электроэнергии в целом по стране (на примере 1938 г.).

Табл.

Категория потребителей	млн. кВтч	% кт
Промышленность	622,6	45,5
Железнодорожный транспорт	121,9	8,9
Сельское хозяйство	4,2	0,3
Коммунальное потребление	28,8	2,1
Бытовое потребление	129,7	9,5
Собственные нужды электростанций	257,5	18,8
Потери в сети	205,3	15,0
Всего	1363,6	100,0

За 50 лет, предшествовавших освобождению Венгрии советской армией, в стране было электрифицировано всего 10 деревень. В трехлетнем хозяйственном плане предусматривалась электрификация 500 деревень. По пятилетнему плану ассигновано 300 млн. форинтов для электрификации и телефонизации к концу 1954 г. без исключения сел Венгрии.

Электротехническая промышленность Венгрии занимает очень большой удельный вес во всей машиностроительной промышленности и представляет собой развитую отрасль производства. Удельный вес электропромышленности можно представить из следующего сопоставления [Л. 8, 12] табл. 9.

Таблица 9

Валовая продукция отдельных отраслей машиностроения (млн. форинтов)

	1947/48 г.		
	План	Отчет	% выполнения
Электротехническая промышленность	335	561,9	167,7
Машиностроение	44	116,0	263,6
Судостроение	60	69,5	115,8
Самолетостроение	454	500,0	110,0
Всего машиностроение	859	1054,0	116,9

Основными предприятиями электропромышленности являются заводы Ганц, «Динамо», «Ланг», «Агро», «Сабо и Матефи», «Стандарт» и др.

Завод Ганц (электротехнический) выпускает трансформаторы до 60 000 кВА, электродвигатели мощностью до 10 л. с., генераторы мощностью до 80 000 кВА, различные электроаппараты напряжением до 220 кВ, электрооборудование для железных дорог, шахт, кранов, теплоходов, лифтов и шахтных электровозов.

Завод Ганц (вагоно-машиностроительный) выпускает следующее энергосиловое оборудование: дизельные двигатели мощностью 600 л. с., гидротурбины мощностью до 10 л. с., центробежные насосы мощностью до 10 л/час на давление до 100 ат. Дизельных двигателей в 1947 г. 78 шт., в 1948 г. — 200 шт. и план 1949 г. предусматривал выпуск 300 шт.

Завод Ганц (судостроительный) выпускает стационарные паровые котлы на давление до 80 ат и мощностью до 1 т пара в час, и судовые паровые котлы различной мощности и на различное давление.

Завод «Динамо» производит электродвигатели, трансформаторы, промышленные и сельскохозяйственные магнитные сепараторы, электроинструмент, электрооборудование для автомобилей и др. В настоящее время завод переходит на новейшим оборудованием и вскоре перейдет к серийному производству маломощных электродвигателей. На заводе будет освоено производство ручного электроинструмента.

Завод «Ланг» производит, главным образом, паровые и механические турбины. На заводе проводится большая работа по рационализации производства и сокращению сроков изготовления турбин (с 2-х лет до 17 месяцев) [Л. 7].

Завод «Агролюкс» производит электросчетчики, электрические материалы, аппаратуру высокого напряжения, бытовые электроприборы, светотехническое и газовое оборудование и др. По пятилетнему плану завод будет значительно расширен и оснащен новейшим оборудованием. Валовая продукция завода к концу пятилетки в сравнении с 1949 г. увеличится вдвое.

Завод «Сабо и Матефи» производит трансформаторы мощностью до 10 000 кВА, измерительные трансформаторы, трансформаторы для электросварки, трансформаторы к магнитным и прочим печам, выпрямители, магнитные плавители высокого напряжения, выключатели электрической защиты низкого напряжения для двигателей и трансформаторов до 3 000 А [Л. 7].

Завод «Стандарт» изготавливают телефонную, телеграфную и радиоаппаратуру. Номенклатура выпускаемой продукции следующая: телефонные аппараты системы ЦБ, АТС, а также аппараты с последовательной и параллельной

схемами включения на одну и две городские линии, и шесть добавочных аппаратов. Центральные телефонные станции, коммутаторы типа ЛБ с шнуровой и бесшнуровой системой; типа ЛБ с любым количеством линий; типа ЦБ с числом абонентов от 100 до 10 000; типа «Интерурбан» в любом виде с любым расположением; подстанции типа ЦБ. Автоматические центральные телефонные станции: типа 7-А2 на количество абонентов от 10 000 до 20 000; типа 7-ДУ на количество абонентов от 100 до 10 000; типа 7-Д — автоматические районные станции в любом виде с любым расположением. Запасные части и детали для всех перечисленных центральных станций и подстанций. Оборудование для линий дальней связи: высокочастотное для 1—3- и 12-канальной системы; портативные усилители с 2 и 4 выходами; крепежные материалы и измерительная аппаратура. Телеграфное оборудование: стационарные и портативные аппараты Морзе с одним и большим количеством рабочих мест, сверхтональное 8-канальное оборудование, детали и запасные части. Радиоаппаратура: радиопередатчики — телеграфные и телефонные на длинные, средние и короткие волны; широко- и узкополосные радиостанции мощностью от 10 до 135 кВт на длинные, средние и короткие волны; радиоприемники от двух- до пятиламповых; оборудование студий радиовещания; переносные усилители; микрофонные усилители от 3 до 50 Вт. Репродукторы, детали и запасные части.

АЛБАНИЯ

Энергоресурсы и их использование. Албания имеет в своем распоряжении три вида энергетических ресурсов: нефть, уголь и гидроэнергию. Запасы угля и нефти в стране считаются довольно значительными, но геологически полностью еще не изучены. То же можно сказать и о ресурсах гидроэнергии.

План добычи нефти и угля [Л. 17] в 1948 г. полностью хотя и не был выполнен вследствие вредительства рабочих в Албании югославских специалистов и югославских снабжающих организаций, тем не менее добыча нефти в 1948 г. составила к 1938 г. 109,7%, а к 1947 г. — 119,7%. Добыча угля составила соответственно 573,9% и 200,9%.

2 июня 1949 г. Народное Собрание Албании утвердило 2-летний план развития народного хозяйства, по которому к концу 1950 г. добыча нефти должна составить 159%, а добыча угля — 255%, в сравнении с 1948 г.

Производство электроэнергии. В 1938 г. в Албании насчитывалось 13 электростанций [Л. 17], которые вырабатывали 3 млн. кВтч в год. В 1946—1947 гг. после национализации электростанций производство электроэнергии достигло 9 200 тыс. кВтч, а к началу 1950 г. увеличилась еще более.

В настоящее время в Албании строится довольно крупная электростанция «Селита». На ее строительство уже израсходовано за два года (1947—1948) 67,32 млн. лек. К началу 1950 г. уже сооружены две другие электростанции в Билиште и Эрсеке [Л. 18].

Литература

1. Материалы 3-й Мировой энергетической конференции. 1936.
2. Almanacul Economic, 1947.
3. Neue Zürcher Zeitung, 2/IX, 5/IX, № 183, 184, 1947.
4. Electrician, стр. 366, № 3410, 1943.
5. Румыния, изд. Госполитиздата, стр. 18, 1941.
6. Gasdasap, 15/XII 1948.
7. Szabad Nep., 9/I 1949. Gasdasagstatisztikai Tajekostato, 4—5, 1949. Nepsava, 29/IV 1949. Венгерско-Советский обозреватель, № 5, 9, 1949.
8. Gasdasagstatisztikai Tajekostato, XI, № 3, 1948.
9. Nachrichten für Aussenhandel, 9/VI, № 46, 1948.
10. Nachrichten für Aussenhandel, № 104—105, 1948.
11. Стопанство и търговия, № 8, 1949.
12. Венгерско-Советская торговая палата, V, 1949, Будапешт.
13. Československy Průmysl, № 3, 1949.
14. Scanteia, 28/VIII, 1949.
15. Electrotechnische Zeitung, № 3, 1940.
16. Electrotechnische Berichte, 20/VI 1942.
17. Новая Албания, № 17, 1949.
18. Зери и Популит, 4/VI, 1949.
19. Minerals Yearbook, 1946.

Н. И. РОМАШКИН

Об электромагнитных единицах

(Электричество, № 1, 1948; № 1 и № 12, 1949)

Доктор техн. наук, проф.

П. Л. КАЛАНТАРОВ

Ленинградский политехнический институт
им. Калинина

В. Ф. Ремнев высказал ряд положений¹, с которыми следует согласиться. Вместе с тем в числе его замечаний имеются и неправильные суждения; на некоторых из них необходимо остановиться. Наиболее существенные ошибки допущены В. Ф. Ремневым при рассмотрении вопроса о рационализации уравнений и вопроса об эрстеде. Воспользуясь ниже обозначениями, принятыми В. Ф. Ремневым.

1. Пусть имеется зависимость (1), а именно $A = \alpha BC$, связывающая физические величины A, B, C , и пусть $A' = \alpha' A$, $B' = B$, $C' = C$, где $[A]$, $[B]$, $[C]$ — единицы измерения, принадлежащие к одной системе, а A', B', C' — соответствующие числовые значения физических величин. Тогда, приняв во внимание, что $[A] = [B] \cdot [C]$, имеем $A' = \alpha' B' C'$, т. е. числовые значения связаны зависимостью, имеющей тот же вид, что и зависимость (1), связывающая физические величины.

Для рационализации уравнения (1) достаточно положить: $A = \alpha A_r$. Тогда из (1) получим $\alpha A_r = \alpha BC$ или $A_r = BC$, что и требовалось. При этом зависимость между числовыми значениями физических величин, выраженных в единицах $[A]$, $[B]$, $[C]$, также примет рациональный вид, так как $A' = \frac{A}{[A]} = \alpha \frac{A_r}{[A]} = \alpha A'_r$. Если же, как предлагает автор, положить $A_r = \alpha A$, то из (1) получим $A_r = \alpha^2 BC$, и желаемая цель не будет достигнута.

Для рационализации уравнения (2), а именно $H = 4\pi I_0$, в полном соответствии со сказанным следует положить $H = 4\pi H_r$. Тогда из (2) мы получим $H_r = I_0$, т. е. приведем интересующую нас зависимость к рациональному виду. Положив, по автору, $H_r = 4\pi H$, мы, во-первых, получим $H_r = 16\pi^2 I_0$, а во-вторых, если бы мы даже и пришли к зависимости $H_r = 4\pi I_0$, то эта последняя зависимость, имеющая такой же вид, что и (2), не могла бы быть названа рационализованной, так как в ней имеется числовой множитель 4π , отличный от единицы.

Необходимо заметить, что никакие изменения единиц измерения не могут привести к рационализации зависимостей, связывающих физические величины, по той простой причине, что, изменяя единицы измерения, мы изменяем лишь числовые значения физических величин. Поэтому изменения единиц измерения влекут за собой изменения вида зависимостей только между числовыми значениями физических величин, но не оказывают никакого влияния на вид зависимостей, связывающих физические величины.

2. Можно, не добиваясь рационализации уравнения (1), стремиться к рационализации зависимости $A' = \alpha B' C'$, связывающей числовые значения физических величин. Для достижения последней цели можно, например, увеличить единицу измерения левой части уравнения (1) в α раз, оставив неизменной единицу измерения правой части.

Тогда новое числовое значение A'_0 левой части в α раз меньше старого числового значения A'_0 (т. е. $A' = \alpha A'_0$), т. е. будет равно $B' C'$, и мы получим рациональную зависимость $A'_0 = B' C'$ между числовыми значениями. Можно, конечно, наоборот, оставив единицу измерения левой части уравнения (1) неизменной, увеличить единицу измерения правой части в α раз. Однако, и в другом случае зависимость (1), связывающая физические величины A, B, C , не изменит своего вида и останется нерационализованной, а единицы измерения и правой частей ее не будут уже принадлежать к системе.

3. Определение эрстеда можно получить из выражения для напряженности магнитного поля в любом случае. Так, для этой цели можно воспользоваться выражением для напряженности поля внутри бесконечного соленоида $H = \frac{4\pi i w}{l} = 4\pi I_0$ (этим выражением, по сути, и пользуется автор заметки), выражением для напряженности поля на расстоянии a от оси бесконечного линейного тока $H = \frac{2i}{a}$, выражением $H = \frac{2i}{R}$ для напряженности поля в центре кругового тока радиуса R . Во всех этих случаях, желая определить эрстед — единицу напряженности магнитного поля в системе СГС, — не жая поэтому силу тока в декаамперах, а длину в сантиметрах, следует взять такие числовые значения входящих в правую часть, при которых числовое значение всей правой части, а следовательно и левой, равно единице. Определенный таким образом эрстед — ортодоксальное понятие классического эрстеда, и никаких других эрстедов нет. При этом единицей измерения левой части является $1 \frac{даа}{см}$, а единицей измерения правой

1 эрстед, и следовательно, 1 эрстед $= 1 \frac{даа}{см}$. Можно, конечно, рассуждать и несколько сложнее: если из выражения $H = 4\pi I_0$ при $I_0 = 1 \frac{даа}{см}$ мы имеем $H = 4\pi$ единиц, то за единицу напряженности магнитного поля — эрстед — мы должны взять напряженность, в 4π раз меньшую. Если такую напряженность мы получим при $I_0 = \frac{1}{4\pi}$, то и тогда опять $1 \text{ э} = 4\pi \cdot \frac{1}{4\pi} \frac{даа}{см} = 1 \frac{даа}{см}$, а не $1 \text{ э} = \frac{1}{4\pi} \frac{даа}{см}$, как неправильно заключил автор заметки. Кстати, если допустить, что автор сделал правильное заключение и из $H = 4\pi I_0$ следовало бы, что $1 \text{ э} = \frac{1}{4\pi} \frac{даа}{см}$, то из $H = \frac{2i}{a}$ мы получили бы $1 \text{ э} = \frac{1}{2\pi} \frac{даа}{см}$, а из $H = \frac{2i}{R}$ получили бы $1 \text{ э} = \frac{1}{2} \frac{даа}{см}$ и т. д.

Полезно заметить, что и из рациональных зависимостей ($H_r = I_0$, $H_r = \frac{i}{2\pi a}$, $H_r = \frac{i}{2R}$ и т. д.) можно тем самым путем, указанным выше, получить опреде-

¹ Электричество, № 12, 1949.

то же самого классического понятия эрстеда, равного

ид
см.

4. Системы единиц с формулами размерности, не содержащие дробных показателей, были предложены раньше, и появилась система LTQ Ф; к таким системам относятся, в частности, система Брилинского, основными единицами которой являются единицы длины, массы, времени и количества электричества. Мною предложена не система единиц LTQ Ф, а совокупность основных величин LTQ Ф и включающая из нее система размерностей электромагнитных величин.

5. Принцип построения системы MKSM очень прост: построена как единая система единиц измерения механических и электромагнитных величин с четырьмя основными единицами, тремя из которых являются три принятые основные механические единицы — еди-

ница длины (метр), единица массы (килограммы), единица времени (секунда), а четвертой — электромагнитная единица, а именно единица магнитной проницаемости (магн), определенная независимо от прочих основных единиц и притом так, чтобы в систему MKSM вошли все практические электромагнитные единицы (ампер, вольт и т. д.). Попутно замечу, что проект положения о системе MKSM составлен комиссией под председательством М. Ф. Маликова, а не лично им и мною.

6. Все применяемые системы единиц измерения электромагнитных величин, построенные на четырех основных единицах, а именно MKSM, CGS_{μ0} в CGS_ε, в одинаковой мере научны. Что же касается систем единиц измерения электромагнитных величин, построенных на трех основных единицах как, например, гауссова система и система CGSm и CGSe, то эти системы по моему убеждению являются системами псевдонаучными.

Правила устройства электротехнических установок¹

Доктор техн. наук, проф. А. А. ГЛАЗУНОВ

Московский энергетический институт
им. Молотова

В разделе «Заземления в электрических установках напряжением выше 1000 в» для установок с малыми токами на землю нормируется напряжение защитного заземления относительно земли при протекании расчетного тока замыкания на землю в любое время года не более 250 в. В установках с большими токами замыкания на землю нормируется то, что сопротивление защитных заземлений, в любое время года не должно превышать 0,5 ом. В установках, присоединенных к сетям с большими токами на землю предел повышения напряжения заземляющего устройства относительно земли, следовательно, не нормируется и может быть произвольно большим. Такое построение правил устройства заземлений электротехнических установок, лежа в основу их для установок с большими и малыми токами замыкания на землю необоснованно. Положены принципиально отличные положения, является неприемлемым.

Нет абсолютно никаких оснований отказываться от нормирования напряжения прикосновения ввиду опасности с точки зрения техники безопасности. Отказ от нормирования этой величины противоречит самым элементарным законоположениям Советского Союза по охране жизни и здоровья трудящихся. Допускать любое напряжение на защитных заземлениях по отношению земли, пользуясь персоналу электрических станций и подстанций, подходить соприкасаться с частями установки, на которых могут возникнуть опасные потенциалы, голыми руками без защитных средств, нельзя. Прикосновения к заземленным частям голыми руками без защитных средств значительно реже часты и продолжительнее, чем при пользовании инструментами, ботами и т. п. Достаточно указать только, что работа без перчаток, бот и т. п. проводится при всех работах оборудования, осмотрах трансформаторов, которые рекомендуется тронуть рукой для контроля температуры. и представляется, что и для установок с большими токами замыкания на землю нужно нормировать предельное повышение напряжения защитного заземления по отношению к земле.

Из редакции § 40 следует, что если естественные заземлители могут обеспечить сопротивление растеканию тока, то искусственного заземления можно не выполнять. В проекте электрической станции мощностью 400 000 квт,

которая будет работать в одной из мощнейших систем Советского Союза, выполненном Теплоэлектропроектом, было принято решение обойтись только естественными заземлителями. Протяженные заземлители, которые должны быть сделаны для присоединения заземляемых частей установки к естественным заземлителям, по § 42 рекомендуется размещать так, чтобы достигнуть возможно большего снижения напряжения прикосновения и шага. Однако, при этом подчеркивается, что затраты материала на искусственное заземление диктуются требованиями § 18 и 22. Последнее предопределяет, что от замкнутых контуров безусловно будут отказываться, поскольку замкнутый контур потребует больше материала, чем разомкнутая заземляющая система. Весьма вероятно, что в отдельных случаях на этом будет настаивать и экспертиза.

Отказ от контурных заземлений, отказ от требований выравнивания потенциала и отказ от нормирования предельного напряжения на заземляющей защитной системе приведут к несчастным случаям с людьми. Второе серьезное исправление в правилах устройства заземлений в установках с напряжением выше 1000 в должно обязывать иметь искусственные заземления в виде контуров и прокладывать в случае необходимости, электроды для выравнивания потенциала по поверхности. Сопротивление искусственного заземления и необходимая степень выравнивания потенциала устанавливаются соответствующими расчетами.

В разделе «Учет электроэнергии» правил устройства рекомендуется установка счетчиков реактивной энергии на генераторах станций и трансформаторах районных подстанций. Это требование обосновывается необходимостью определения средневзвешенного $\cos \varphi$ всех потребителей системы и отдельных групп их, питаемых от подстанций.

Нам представляется, что рекомендация установки счетчиков реактивной энергии на станциях и районных подстанциях ничем не обоснована. Средневзвешенный $\cos \varphi$ ничего не определяет и ничего не характеризует. Потери мощности или энергии по средневзвешенному $\cos \varphi$ определены быть не могут; этот $\cos \varphi$ не может быть положен в основу определения потерь напряжения и т. п. Для определения величин, характеризующих работу системы и отдельных ее элементов, нужно знать действительные величины $\cos \varphi$, которые определяются по показаниям ваттметров активной и реактивной мощностей, которые устанавливаются на генераторах электростанций и трансформаторах подстанций. На основании приведенных соображений считаю, что параграфы, относящиеся к учету реактивной энергии, должны быть переработаны.

¹Обращение редакции к читателям, в связи с обсуждением проекта, напечатано в № 11 журнала, стр. 96, 1949 г. Выступления по этому вопросу см. Электричество, № 12, 1949 г. и № 3, 1950 г.

Кандидат техн. наук, доц. А. Л. ВАЙНЕР**Харьковский политехнический институт
им. Ленина**

1. В действующих правилах для установок свыше 1000 в регламентируется верхний предел сопротивления заземлений: в установках, присоединенных к сетям с большими токами замыкания на землю, «сопротивление защитных заземлений установок напряжением 35 кВ и выше в любое время года не должно быть больше 0,5 Ом». Такая формулировка не побуждает проектантов и монтажников добиваться меньших, нежели предельное, значений R , в то время как использование естественных заземлителей (§ 39) позволяет в большом числе случаев без дополнительных расходов получать значительно меньшие величины R и тем самым снизить потенциал на заземлении во время замыкания на землю.

Поэтому следует оставить без изменения формулировки предельно допустимых значений R , но дополнить § 18 и 22 вводными фразами, указывающими на необходимость стремиться достичь с помощью естественных заземлителей возможно меньших значений R .

2. В правилах не предусмотрено использование в качестве естественных заземлителей систем трос — заземления опор. Присоединение заземляющего троса линии 110 и 220 кВ к заземлению подстанций не встречает возражений, что же касается линий 35 кВ, то и их заземляющий трос может быть присоединен к заземлению подстанции специальным проводником, проложенным в земле от конечной опоры, без опасений заноса опасных напряжений (затухание волны в этом проводнике будет велико).

Целесообразно поэтому дополнить § 39 рекомендацией — использовать трос заземления опор в качестве естественного заземлителя.

В качестве естественных заземлителей правила рекомендуют использовать металлические оболочки кабеля. Свежепроложенные в земле кабели обладают почти незаметной проводимостью растекания из-за наличия поверх брони джутовой просмоленной оболочки. Но через несколько лет после укладки изоляционные свойства джутовой оболочки исчезают, и можно говорить о проводимости растекания металлической оболочки кабеля.

Это обстоятельство и неопределенность некоторых параметров, требуемых для расчета R естественных заземлителей, приводят к необходимости указать в § 39, что сопротивление растеканию естественных заземлителей должно определяться измерениями.

3. В § 33 следует в более ясной форме сформулировать, что к общему заземлению установки с напряжением свыше 1000 в надлежит присоединять аппараты и т. п., относящиеся к цепям всех действующих на установке напряжений свыше 1000 в. § 34 рационально дополнить прямым указанием, каким должно быть заземление, используемое как общее для цепей с напряжением свыше и ниже 1000 в. Такое указание позволит с большей технической обоснованностью принимать решение об объединении либо разделении заземлений до и свыше 1000 в.

4. Следует уточнить некоторые формулировки в главе II — определения.

Так, в § 7 следует вначале дать физическое объяснение термина «сопротивление растеканию заземлителя», из которого уже будет вытекать дальнейший текст параграфа.

В § 13 следует исключить упоминание о пробивных предохранителях в цепи рабочего заземления, ибо в установках свыше 1000 в они не используются.

§ 14 и 15 целесообразно дополнить указанием, что электрические сети с большим током замыкания на землю характерны применением защиты, обеспечивающей кратковременность аварийного состояния — замыкания на землю, а сети с малыми токами замыкания на землю характерны длительным током замыкания за землю.

Желательно также внести некоторые исправления и уточнения в правила устройства заземлений и занулений в установках с напряжением до 1000 в.

5. В § 19 указывается, что в установках, расположенных в помещениях без повышенной опасности и с повышенной опасностью с напряжением относительно земли U

пределах 65—150 в, не все части оборудования должны заземляться, а лишь те металлические части, которые соприкасаются рукой, а также корпуса электродвигателей и таллически соединенных со станками.

По сути это означает, что лишь незначительная часть оборудования цеха современного предприятия не должна быть присоединена к так или иначе сооружаемому заземлению (занулению). В таком случае § 18 и 19 должны быть заменены по смыслу простой формулировкой: «при напряжениях относительно земли U в пределах 65 в соответствующие части установок, производственных помещениях должны заземляться (зануляться)».

6. В разделе VI «Связь между заземлениями различных назначений и напряжений» нет указаний, где должно быть заземление, используемое как общее для частей установки до и свыше 1000 в. В связи с этим приходится обращаться к различным параграфам правил устройства заземлений до и свыше 1000 в и давать или иные толкования допустимого R и в некоторых случаях — допустимого потенциала на заземлении. При этом значительно выиграют, если в разделе VI будут сформулированы требования к общим заземлениям.

7. Не следует рекомендовать выполнение заземлений из меди (§ 36, последняя часть).

8. Целесообразно объединить существующие правила для установок свыше 1000 в и правила для установок ниже 1000 в в одни правила.

В этом случае не понадобится повторять ряд общих правил, имеющих сейчас в одних и других правилах, не будет текстуально отличающихся формулировок и вообще правила будут более стройны и доходчивы.

Кроме того, следовало бы дополнить правила рекомендациями заземлений для передвижных энергетических установок, сопроводить правила некоторыми рекомендациями справочными данными, например значениями коэффициентов изменения ρ в течение года, коэффициентами использования электродов в системе многократного заземления и т. п. Надо было бы также указать рекомендуемые методы испытания заземлений и занулений.

Инж. М. Р. НАЙФЕЛЬД**Трест «Центроэлектромонтаж»**

Новые правила устройства заземлений и занулений электрических установок напряжением до 1000 в представляют собой значительный прогресс, и выход их в свет следует всячески приветствовать. Однако, в некоторых местах они требуют доработки.

1. В соответствии с § 18 «Правил» заземление или зануление должно выполняться во всех производственных помещениях при напряжении выше 150 в по отношению к земле, причем заземлению или занулению подлежат металлические оболочки и металлические покрытия проводов и кабелей. Здесь отсутствует указание, является ли напряжение 150 в по отношению к земле номинальным или относится к аварийным режимам (заземление одной фазы или одного полюса установок). Следовало бы оговориться, что имеется в виду напряжение, которое может возникнуть при любых режимах в установке.

В соответствии с этим параграфом следует заземлять оболочки всех проводов вторичной коммутации станков подстанций при напряжении постоянного или переменного тока 220 в, а равным образом — все оболочки кабелей, металлических корпусов, штепселей, выключателей и т. п. в сети освещения производственных помещений при напряжении 220/127 в с незаземленным нулем. Это требование должно быть более четко сформулировано. Доработка этого вопроса в «Правилах» вызывает большие затруднения в монтаже установок.

2. Нельзя согласиться с § 53 «Правил», которым разрешается использование металлических оболочек кабелей для целей зануления, а не заземления.

В сетях напряжением до 1000 в токи, протекающие через металлические оболочки кабелей, при использовании

для целей зануления (т. е. при заземленной нулевой точке), чем при использовании их для целей заземления (т. е. при незаземленной нулевой точке). Следовательно, нет оснований запрещать их использование в качестве проводов заземления. § 53 «Правил» не допускает использование металлических оболочек кабеля для соединения отдельных токоприемников (электродвигателей, катодов, кнопок и т. п.). Это запрещение вытекает из условия п. «а» § 53, согласно которому число кабелей, используемых для зануления, должно быть не менее двух. Учитывая затруднения, связанные с прокладкой отдельных приемников специальных линий заземления зануления, а также достаточную надежность при использовании оболочек кабелей в этих случаях, целесообразно разрешить их применение для занулений (и тем же заземлений) отдельных приемников. В этом случае для питающих кабелей не следует регламентировать. Это требование имеет смысл сохранить лишь для магистралей. В § 62 требуется, чтобы стальные трубы для прокладки проводов соединялись между собой муфтами наглухо. Обычно сурик (и притом с паклей) применяется в случае необходимости создания герметичности в помещениях с повышенной влажностью, при прокладке в фундаментах, перекрытиях и т. п.). Открытая же сварка в трубах выполняется без сурика. С точки зрения надежности заземления или зануления сурик с паклей скорее ухудшает и во всяком случае не улучшает проводимость цепи. Следовало бы дать указание о том, что сурик с паклей допускается для соединения стальных труб, применяемых для цепей заземления. Испытания, проведенные в тресте «Центроэлектромонтаж», подтвердили это указание.

В § 63 имеется требование соединения металлических оболочек трубчатых и панцирных проводов проволокой с бандажом и последующей пропайкой. Здесь отсутствует указание о том, что такие соединения требуются лишь только в производственных помещениях и при нахождении по отношению к земле выше 150 в. Требования выполнения столь кропотливой и сложной работы при прокладках — излишни. Кроме того, требования этого параграфа следовало бы распространить на все проводники в металлической оболочке (в частности, СИП). Таким образом, следовало бы дать общее наименование для проводников, а не ограничиваться трубчатыми и панцирными проводами, применяемыми сравнительно редко.

Требования § 64 в отношении пайки соединительных труб типа Бергмана недостаточны. К такого рода работам следует предъявлять те же требования, как и к прокладкам проводников в металлической оболочке, т. е. требования § 63 с учетом приведенных выше замечаний.

В отношении применения и сечения заземляющих, зануляющих и нулевых проводов следовало бы в § 44 указать, что для этой цели возможно применение алюминиевых проводов сечений, эквивалентных медным, так как применение нулевых алюминиевых проводов получает сейчас большое распространение.

Инж. Т. П. МУСАТОВ

Донбассэнерго

Некоторые предложенные в «Правилах» рекомендации можно считать недостаточными для условий гололедных районов. Следует настаивать на категорическом запрещении в «Правилах» применения опор с вертикальным расстоянием проводов на воздушных линиях I класса в IV климатических районах, не делая в этом отношении никаких разрешающих оговорок.

Длительный опыт работы ряда конструктивно отличных от других линий электропередачи достаточно убедительно показал, что наиболее надежным типом опор в гололедных районах является так называемая П-образная опора. Несмотря на это, имеют место отступления от такого типа опор и, например, в одном из сильно гололедных районов уже в послевоенный период была сооружена линия 110 кВ на двухцепных опорах с расположением про-

водов прямой елкой, что привело в первый же гололедный сезон к неоднократным отключениям этой линии из-за замыкания проводов при опадении гололедных образований.

Далее, «Правила», устанавливая минимальные расстояния между проводами и тросами по вертикали, одновременно с этим не нормируют минимальных расстояний между проводами и тросами по горизонтали. Отсутствие такой рекомендации повело в некоторых случаях к сооружению линий с недостаточной надежностью их при работе в гололедных районах.

Из опыта работы воздушных линий электропередачи в гололедных районах давно известно о так называемом явлении подпрыгивания проводов, как следствии одновременного опадения гололедного образования с целого пролета провода.

Провод, освободившийся от гололедного образования, подпрыгивая вверх, занимает довольно сложное пространственное положение, при котором отдельные участки провода могут иметь значительный отклонение в сторону от вертикальной плоскости. В отношении этого отклонения в некоторых источниках¹ указывается, что при подскоке провода возможен горизонтальный снос его в сторону от вертикальной плоскости на 0,5—1 м при вертикальном подскоке на 5—6 м. Однако, в действительности наблюдается значительно больший горизонтальный отклонение подскокшего провода, что подтверждается опытом эксплуатации линий электропередачи, выполненных на так называемых Х-образных опорах, примененных за последние годы при сооружении линий 110 кВ в гололедных районах². Защитные тросы подвешены со смещением их в горизонтальной плоскости в сторону крайних проводов до расстояния между ними в 1,38 м и при вертикальном расстоянии проводов от тросов на опоре в 2,97 м.

Как оказалось, одновременное опадение гололедного образования с пролета такой линии вызывает горизонтальное отклонение подпрыгнувшего провода, до короткого замыкания между крайним проводом и тросом.

Можно указать, что на линиях с П-образными опорами и с минимальным горизонтальным расстоянием между проводами и тросами в 2 м подобных замыканий не наблюдалось.

Следует считать необходимым внести в «Правила устройства» регламентацию минимального горизонтального расстояния между проводами и тросами, приняв это значение для гололедных районов равным 2 м.

Необходимо уточнить габариты пересечений воздушными линиями железных дорог. Так, в табл. 21 дано наименьшее расстояние по горизонтали «от любой части опоры до габарита приближения строений не менее 3 м», в то время как этот же габарит для случая следования воздушной линии параллельно железнодорожному пути определен от ближайшего рельса в конкретной и ясной форме — высота наиболее высокой опоры на данном участке трассы плюс 3 м.

Неопределенности в формулировке горизонтального расстояния от опоры до пересекаемого железнодорожного пути можно было бы избежать, указав значение габарита приближения строений, тем более что величина его однозначна как в новом габарите «2—С» (ОСТ 6435), так и в старом габарите «1—С», действующих согласно § 5 «Правил технической эксплуатации железных дорог Союза ССР» (Трансжелдориздат, 1949). В данном случае под габаритом приближения строений понимается расстояние от оси железнодорожного пути до линии приближения вновь строящихся зданий, равное в обоих упомянутых габаритах 3 м. Таким образом имелась полная возможность определить горизонтальное расстояние от любой части опоры до оси железнодорожного пути, как не меньшее 6 м. Однако, в целях идентичности определений с некоторым округлением для данного случая можно принять следующую формулировку — от любой части опоры до головки ближайшего рельса не менее 5,5 м.

Подобные изменения необходимо внести и в наименьшие расстояния по вертикали, так как и в этом случае

¹ В. В. Бургсдорф. Сооружение и эксплуатация линий электропередачи в сильно гололедных районах. Госэнергоиздат. 1947.

² Т. П. Мусатов. Колебания проводов в гололедных районах. Электрические станции, № 11, 1949.

габарит для железных дорог нормальной и узкой колеи общего пользования определен до головки рельса, а не общего пользования опять-таки до габарита приближения строений.

Надо изменить условия пересечения воздушными линиями электропередачи лесов. Следует возразить против табл. 26, в которой ширина просеки принята одной и той же безотносительно от того, пересекает ли воздушная линия лесной массив или насаждение. При пересечении лесных массивов указанная в табл. 26 ширина просеки может достигнуть до 30 и более м в зависимости от высоты леса, что может быть оправдано по соображениям сохранности линейных сооружений при лесных пожарах, что едва ли может служить основанием к устройству такой же ширины просек при пересечении лесных, сравнительно нешироких насаждений. Исключение делается (§ 142 «Правил») только для парков и заповедников, для которых ширина просеки несколько уменьшается, а для фруктовых садов вырубка просеки вообще является необязательной.

В практике эксплуатации воздушных линий в южных районах, где нет лесных массивов, а протяженность пересекаемых лесных насаждений невелика и обычно укладывается в 1—2 пролета линии, просеки, как правило, не делаются. Установившийся порядок тем более соблюдается при пересечении парков и заповедников. Работники эксплуатации в таких случаях периодически производят подрезку верхушек деревьев с расчисткой и вырубкой деревьев в пределах, обеспечивающих проезд через насаждение гужевого или автотранспорта. Следует указать, что такое положение каких-либо осложнений в эксплуатации не вызывало и не вызывает, вполне обеспечивая возможность надзора и ремонта воздушных линий при сохранении лесных насаждений.

В настоящее время, в связи с производящимися насаждениями лесозащитных полос в южных и степных районах страны, безусловность выполнения требования об устройстве просеки для таких насаждений следует исключить, ограничив обязательность рекомендаций табл. 26 только применительно к лесным массивам. В соответствии с этим предпоследний абзац § 142 может быть изложен в следующей редакции: при прохождении воздушной линии по фруктовым садам, а также при пересечении парков, питомников и лесозащитных полос, захватывающих 1—2 пролета, вырубка просеки является обязательной и может быть выполнена на ширину, необходимую для проезда гужевого и автомобильного транспорта.

М. С. МИРЕНСКИЙ

Москва

Изданные Министерством электростанций «Правила устройства электротехнических установок» по ряду разделов недостаточно конкретны, содержат в отдельных случаях противоречивые указания, повторяют правила, приведенные в других разделах, и частично содержат ошибочные утверждения.

1. Согласно § 2 раздела «Указания по проектированию электрических систем», электрической системой называется часть энергетической системы, состоящая из генераторов, распределительных устройств, повысительных и понижающих подстанций, линий электрической сети и приемников электроэнергии». Можно было ожидать, что раздел посвящен вопросам проектирования всех элементов, совокупно образующих электрическую систему. На самом деле в разделе приводятся только немногие данные, касающиеся вопросов проектирования электрических сетей.

2. В § 26 приводятся в табл. 2 допускаемые нагрузки проводов при температуре окружающего воздуха $+25^{\circ}\text{C}$. Принимая во внимание, что в ряде местностей СССР температура воздуха превосходит 25°C , следовало бы дать метод пересчета допустимых нагрузок на провода применительно к другой температуре окружающего воздуха. Следует также отметить отсутствие данных о допускаемых нагрузках на железные провода.

3. Глава 5 этого же раздела носит название «Фазирование и уровни напряжений и частоты в электрических системах».

Однако, в тексте этой главы ни слова о частоте сказано.

4. В главе 1 раздела «Электроснабжение промышленных предприятий» — «Область применения» указывается, что настоящие правила распространяются на предприятия с установленной мощностью приемников выше 1000. Непонятно, какими соображениями можно оправдать подобное ограничение области применения. Всякоемышленное предприятие независимо от установленной мощности токоприемников должно снабжаться электрической энергией по общим законам, установленным для промышленных предприятий. Если у авторов «Правил» имеются соображения, не позволяющие распространять правила на предприятия с мощностью менее 1000 кВт, надо тогда привести специальные правила для этих предприятий, число которых, несомненно, является значительным.

5. Параграфы 11 и 12 друг другу противоречат. В первом предлагается выбирать напряжение на основе технико-экономических показателей. В § 12 предлагается: «распределение энергии в цехах производить преимущественно по трехпроводной системе напряжением 380/220 в при обмотках трансформаторов для питания силовых и осветительных приемников». Не говоря уже о том, что требования в параграфах противоречивы, требование, изложенное в такой общей форме, является неоправданным, так при наличии больших пусковых токов к. з. двигателя колебания напряжения на зажимах трансформатора позволяют осуществить питание силовых и осветительных приемников от общих трансформаторов.

6. Параграф 13 является настолько неопределенным, что может вызвать ненужные споры. В ряде случаев работа электропривода с двигателями постоянного тока может быть заменена двигателями переменного тока, наоборот, что является делом проектировщиков и не требуется защищать правилами переменный ток постоянного.

7. Параграф 16 регламентирует то положение, что напряжение на зажимах двигателя при нормальных режимах должно отличаться от номинального не более чем $\pm 5\%$, очевидно, разумея под нормальным режимом работы двигателя с нагрузкой не выше его номинальной мощности. Пусковые режимы, являющиеся также нормальными, могут обеспечить это требование. Повидимому, это требование следовало каким-то образом в «Правилах» рассмотреть.

В пункте «б» того же параграфа указывается, «снижение напряжения у наиболее удаленного светильника при нормальных режимах не должно превышать 2,5% номинального напряжения ламп». Необходимо было указать, на сколько процентов допустимо повышение напряжения на зажимах лампы, наиболее близкой к источнику питания. Такое указание обеспечило бы нормальный срок службы лампы.

8. Параграф 19 трактует о сетях высокого напряжения с малыми токами замыкания на землю, не поясняя, следует считать высоким напряжением и что следует считать малым током заземления.

9. Параграф 23 указывает, что допускается увеличение плотности тока для коротких линий, несущих значительную нагрузку. Не определено, в каком размере допустимо увеличение плотности тока, что такое короткая линия, что такое значительная нагрузка.

10. В § 14 раздела «Распределительные устройства выше 1000 в» не оговорены признаки, которым определяется простейшее распределительное устройство от сложного. Такого рода правило всегда может служить источником конфликтов.

11. Параграф 11 раздела «Распределительные устройства напряжением до 1000 в» изложен непонятно. Приведенные в его формулировке, нельзя объяснить, значит номинальный ток? Что такое предельно отключаемый ток, который должен быть не меньше рабочего и чем отличается рабочий ток от номинального, поэтому не следует выбирать рубильники.

12. Параграф 14 оперирует с терминами, которые являются общезвестными. Что такое закрытый или открытый патрон? В равной мере нельзя одобрить

граф в той части, где не рекомендуется применять отплавные вставки. Повидимому, имеются в виду трансформаторы типа S, которые находят исключительно применение ввиду простоты их изготовления. Не исключать возможность всякого рода возгораний и ожогов обслуживающего персонала следует специально указать дополнительные мероприятия, предохраняющие аппарат и от поражения людей.

В заключение следует отметить, что в ряде разделов приводятся одни и те же правила: так, на стр. 7 § 14 и

на стр. 15 § 4 приводятся одни и те же признаки, по которым определяются категории нагрузок потребителей. В нескольких местах повторяются указания о цвете окраски шин, о необходимости иметь таблички с паспортными данными на аппаратах и т. д. Было бы весьма целесообразно иметь раздел для правил, которые являются общими для всех разделов, в частности, касающиеся материалов, имеющих наибольшее применение в электротехнических устройствах (проводники, рубильники, выключатели, патроны, штепсели, вилки, бытовые приборы и т. д.).

К проекту стандарта на номинальные напряжения стационарных электрических сетей

(Электричество, № 1, 1950)

Доктор техн. наук, проф.
А. М. ЗАЛЕССКИЙ

Ленинградский политехнический институт
им. Калинина

Расширение шкалы стандартных напряжений безусловно необходимо, однако по «Проекту» можно сделать ряд замечаний.

1. Наивысшее напряжение генераторов по табл. 3 превышает номинальное напряжение генераторов на 9,5—11%. В соответствии с тем по ГОСТ 183-41 (п. 65) наивысшее напряжение генератора не должно превышать номинальное более чем на 5%. Таким образом, здесь имеется серьезное расхождение с ГОСТ 183-41, которое необходимо устранить. В противном случае потребители могут требовать от электротехнических заводов, чтобы они выпускали генераторы, способные длительно работать при указанном напряжении. 3 наивысшем напряжении, что заводы не обязаны делать, имея в виду ГОСТ 183-41.

2. В шкалу номинальных напряжений для генераторов и первичных обмоток трансформаторов включены в качестве номинальных напряжения 13,8 и 15,75 кВ. Разница между этими напряжениями 13,8 и 15,75 кВ составляет всего 14% и не может быть оправдана. Заметим, что в действующем ГОСТ 721-41 напряжения 13,8 кВ не существует и нет необходимости его вводить.

3. Далее, нет смысла сохранять в новом ГОСТ напряжения 15,75 кВ. Надо округлить цифру 15,75 до 16 кВ и положить это напряжение в ГОСТ без скобок, так как мощность генераторов заведомо нерационально строить на напряжение 10,5 кВ. Будет целесообразно поставить это напряжение и в графу номинальных напряжений сети среднего тока. Технично-экономические расчеты, произведенные трестом Севзапэлектромонтаж, показывают, что напряжение 15—16 кВ имеет большие преимущества по сравнению с напряжением 10,5 кВ в промышленных сетях, особенно при питании этих сетей непосредственно от генераторов. Намеченное «Проектом» запрещение использования напряжения 16 кВ (15,75 кВ) в сетях лишает промышленные сети больших выгод. Введение в ГОСТ напряжения 16 кВ потребует выпуска соответствующих трансформаторов (понижающих), но не потребует выпуска специальных аппаратов, так как в силу небольшого разрыва между напряжениями 16 и 20 кВ будет возможно и целесообразно применять в сетях 16 кВ аппаратуру на 20 кВ. Принятый «Проектом» разрыв между напряжением 16 кВ и 400 кВ слишком велик, а величина напряжения 16 кВ в «Проекте» ничем не обоснована.

4. В связи с этим надо коснуться вопроса о принципе построения шкалы напряжений. В основу шкалы следует положить «натуральную» мощность линии. Отношение натуральной мощности двух соседних ступеней напряжений более низких напряжений (3—10 кВ) можно принять равным 4, при средних напряжениях (до 110 кВ) — 3 и при высоких напряжениях (110 кВ и выше) — 2. Тогда,

приняв за основу напряжение 110 кВ, мы получим следующую таблицу стандартных напряжений:

Отношение натураль- ных мощ- ностей	Отноше- ние напря- жений	Напряжение	
		расчетное	округлен- ное
—	—	3,06	3
4	2	6,12	6
4	2	12,23	12
3	1,73	21,2	21
3	1,73	36,7	36
3	1,73	63,5	63
3	1,73	110	110
2	1,41	155,6	155
2	1,41	202	220
2	1,41	311	310
2	1,41	438	440

Из таблицы видно, что существующие напряжения довольно близко подходят к рассчитанным по вышеуказанному принципу. Эта таблица подтверждает также, что напряжение 10,5 кВ выбрано неудачно. Более целесообразным является напряжение 12 кВ. Принимая, однако, во внимание сделанное мною предложение о введении в ГОСТ напряжения 16 кВ как сетевого, я полагаю, что нет необходимости ставить вопрос о повышении напряжения 10,5 кВ до 12 кВ.

Округление напряжений 21,2 и 36,7 кВ до 20 и 35 кВ соответственно, конечно, возможно. Поскольку напряжение 60 кВ вводится в наш ГОСТ впервые, в ГОСТ следует включить напряжение 63 кВ, а не 60 кВ и без скобок, так как имеются все основания к тому, что это напряжение получит большое распространение.

Округление напряжения 155,6 до 150 возможно, хотя в этом нет существенной необходимости.

Переходя к напряжению выше 220 кВ, считаю, безусловно целесообразным ввести еще одну ступень напряжения, именно 310 кВ. Применение этого напряжения может разрешить целый ряд задач, стоящих перед нашей энергетикой в течение ближайших лет. Необходимо заметить, что принятые соотношения 1,41 между напряжениями дает возможность применять для связи сетей 220 и 310 кВ автотрансформаторы, что представляет существенные технические и экономические выгоды, а освоение напряжения 310 кВ значительно легче, чем 400 кВ.

Если напряжение 440 кВ представляется слишком высоким и трудно реализуемым (наивысшее напряжение при этом будет равно 484 кВ, т. е. почти 500 кВ), быть может, целесообразно принять следующее за 310 кВ напряжение равным 380 кВ, что соответствует повышению натуральной мощности в 1,5 раза.

4. Параграф 1 «Проекта» в редакционном отношении ухудшен по сравнению с первой редакцией. Нехорошо тер-

мин «Подключенные» (который в § 6 превращается уже в «приключенные»). Его следует заменить более литературным термином «присоединенные» и применить этот последний термин также во всех дальнейших параграфах, где он необходим. Редакцию § 1 необходимо исправить следующим образом: «Настоящий стандарт распространяется на стационарные сети постоянного тока и переменного тока 50 гц, на работающие в них трансформаторы, аппараты и кабели, а также на присоединенные к этим сетям генераторы и приемники электрической энергии».

5. Определение номинального напряжения, данное в § 3, неудачно и неточно. Нельзя определять понятие через другие понятия, определяемые позже. Еще более недопустимо определять некоторое понятие через другое, которое в свою очередь определяется через первое (ср. § 3 и § 5). Кроме того, определение § 3 не указывает, напряжение какой точки сети следует приравнивать номинальному. Одни считают за номинальное напряжение сети напряжение приемных концов ее, а другие — напряжение генераторных концов. Необходимо указать, какую практику принимает наш стандарт.

Поэтому § 3 должен быть коренным образом переделан и представлен в следующем виде:

«Номинальным напряжением стационарной электрической сети (именуемый ниже «номинальное напряжение сети») называется среднее напряжение приемных концов сети, для нормальной работы при котором сеть предназначена».

Примечания: 1. Приемным концом сети являются шины приемной подстанции, к которым присоединена одна или более линий сети, питающей данную подстанцию.

2. Напряжение разных точек сети во время ее работы может отличаться от номинального вследствие падения напряжения в линиях сети и вследствие допустимых колебаний напряжений при изменениях нагрузки».

Предлагаемое мною определение устраняет нелогичность и неясность определения, данного в «Проекте».

6. Параграф 4 «Проекта» сформулирован неудачно. Последнее предложение этого параграфа следует написать так: «для нормальной работы, при котором они предназначены». Упоминание об «оптимальном» режиме здесь совершенно неуместно и должно быть исключено, так как этот режим далеко не всегда бывает связан с номинальным напряжением.

Кстати, вместо слова «оптимальный» с гораздо большим основанием следует пользоваться словом «наивыгоднейший».

Инж. Л. И. ДВОСКИН

Теплоэлектропроект

К проекту нового ГОСТ не приложено никаких пояснительных записок, в которых была бы обоснована необходимость исключения из числа действующих номинальных напряжений (напряжения 500 в) и включения новых напряжений: 1 000 в (очевидно, взамен 500 в), 20 и 60 кв. В 1949 г. в Ленинградском отделении Теплоэлектропроекта проводилась работа по определению целесообразного повышения напряжения генераторов с целью получения возможности питать потребителей без дополнительной трансформации энергии. Предварительные материалы показывают, что при напряжении в 15,75 кв могут быть относительно безболезненно проведены необходимые конструктивные изменения существующих типов генераторов, коммутационной аппаратуры и кабелей. Эти подсчеты показывают, что применение напряжения 15,75 кв может дать существенное снижение годовых расходов на сеть этого напряжения по сравнению с питанием ее при напряжениях как более низких (10 кв), так и более высоких (35 кв). Эти же подсчеты показывают, что переход на 20 кв потребовал бы коренных изменений существующих конструк-

ций генераторов и других элементов и осуществление этого напряжения натолкнулось бы на значительные затруднения.

2. Не возражая по существу против предложения введения нового более высокого напряжения, чем 15,75 кв, следует считать, что фиксация номинального напряжения в 400 кв с наивысшим напряжением 440 кв в данном случае еще преждевременна.

3. ГОСТ на номинальное напряжение сетей не должен устанавливать номинальное напряжение отдельных устройств, работающих в этих сетях — генераторов, трансформаторов, кабелей и аппаратуры. Этот ГОСТ должен установить, кроме номинального напряжения сети, малые напряжения, при которых должны надежно работать все элементы, присоединяемые к сети. Номинальное напряжение элементов, присоединяемых к сети, должно устанавливаться ГОСТ на отдельные виды оборудования — генераторы, трансформаторы и т. д. В соответствии с этим все графы в табл. 2 и 3, в которых приведено номинальное напряжение приемных концов генераторов и трансформаторов (первичных и вторичных моток), должны быть исключены.

4. Пункт 4 ГОСТ связывает номинальное напряжение с достаточно расплывчатым понятием об оптимальном режиме, не разъясняя, что следует понимать под этим режимом для генераторов, трансформаторов, электрических приемников.

Указание об оптимальном режиме должно быть исключено и п. 4 должен быть изложен в следующей редакции:

«Номинальным напряжением генераторов, трансформаторов и приемников электрической энергии называется напряжение сети, для работы в которой они предназначены».

5. Введение нового напряжения 1 000 в совершенно обосновано. Существующая коммутационная аппаратура 500 в не сможет быть применена при этом новом напряжении. Кроме того, отключающие способности этих аппаратов должны быть значительно увеличены по следующим соображениям: если на собственных нуждах электростанций мощность трансформаторов, питающих эти станции 500 в, обычно принимается 560 кв и реже 750 кв, при напряжении 1 000 в значительно большая часть электродвигателей собственных нужд будет питаться при этом напряжении и мощность питающих трансформаторов должна быть соответственно увеличена. Надо ожидать, что мощность трансформаторов, питающих секции 10 кв возрастет до 2 400—3 200 кв. Соответственно возрастет мощность короткого замыкания.

При новом напряжении в качестве коммутационной аппаратуры необходимо будет применить высоковольтные выключатели, т. е. те же, что и при 3 кв. Очевидно, это вызовет существенное удорожание собственных нужд электростанции.

Введение напряжения 1 000 в явится также и существенным напряжением на собственных нуждах электростанций, так как очевидно, что ряд мелких электрических потребителей не сможет быть выполнен на это напряжение. Их питания потребуются наличие сети напряжением 380 в. С другой стороны, для очень крупных электродвигателей собственных нужд, например таких, как центральные насосы мощностью 2 тыс. квт, напряжение в 1 000 в явно недостаточно. Разработка новой серии коммутационной аппаратуры на напряжение 1 000 в представляет собой сложную и неоправданную загрузку промышленности.

6. Указание в п. 5 о том, что «оборудование на напряжение 60 кв изготавливается как для существующих установок, так и для новых установок с ограниченными возможностями модификаций», мы считаем излишним. Изменение модификаций выполняемое для каждого из номинальных напряжений, регламентируется ГОСТ на отдельные виды оборудования. Оно не является неоправданным даже для существующих номинальных напряжений.

¹ На цеховых подстанциях промпредприятий, в целях ограничения мощности короткого замыкания и облегчения коммутационных операций, обычно выбираются трансформаторы также на 560—750 кв.

ПО ПОВОДУ СТАТЕЙ И. Е. БАЛЫГИНА „ПОВЕДЕНИЕ ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ ПРИ УДАРНЫХ ТОКАХ БОЛЬШОЙ СИЛЫ“

(Электричество, № 4, 1949, стр. 70) и

ОСОБЕННОСТИ РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРОВ ЧЕРЕЗ ПЛАВЯЩИЙСЯ ПРОВОДНИК*

(Техническая физика*. Сборник статей, 1947 г., издание „Журнала технической физики“)

В названных статьях¹ И. Е. Балыгин описывает проведенные им опыты над плавлением открытых и закрытых плавких вставок с помощью импульсных токов, возникающих при разряде конденсаторной батареи емкостью 1 мкф на напряжение 150 кВ, составленной из 14 конденсаторов по 0,7 мкф. Опыты производились при напряжениях порядка 70—95 кВ. Приводятся осциллограммы и описаны различные варианты испытанных плавких вставок — твердой и жидкой дугогасящей средой. Систематизации полученных опытов и каких-либо практических выводов о поведении плавких вставок, рекомендуемом для защиты конденсаторных батарей, автор не делает, хотя и пишет в своей статье [1], что опыты производились «в этом направлении». Единственным сформулированным выводом автора является его сообщение, что «явление самопроизвольного погасания на некоторый период электрической дуги при разрядах конденсатора было обнаружено автором в [1]». Для объяснения этого явления автор вводит понятие «электрического взрыва», при котором «заряженные частицы вместе с общим потоком движутся в первый момент почти перпендикулярно к направлению электрического поля, отчего ток в цепи прекращается и дуга гаснет» [2].

При ознакомлении с работами И. Е. Балыгина у читателя неизбежно появляется ряд вопросов, не разъясненных автором. Прежде всего, как справедливо отмечает И. Е. Балыгин, ток при разряде конденсатора должен был иметь вид затухающей синусоиды:

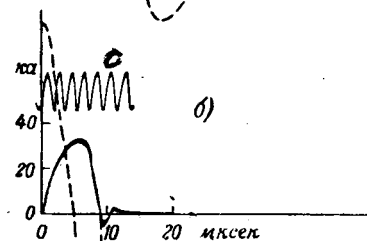
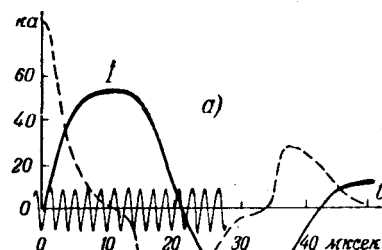
$$I_{св} = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t.$$

На рис. 2 в статье И. Е. Балыгина [1] приведена осциллограмма, показывающая, что в действительности такое явление не наблюдается. Не задумываясь над этим обстоятельством, автор ограничивается замечанием: «Из осциллограммы видно, что разряды получились колебательными с сильно искаженной синусоидой, очевидно за счет инерционной характеристики искры и отражений от узлов соединения» (?!).

Автору, вероятно, известно из работ советских исследователей и иностранной литературы, — в которой он, судя по обильным ссылкам [2], хорошо осведомлен, — что высоковольтные конденсаторные батареи при разряде через дугу, даже длинную (схемы Беллаши), дают кривую тока, весьма близкую к затухающей синусоиде. Падение напряжения в дуге при значительных токах неизмеримо меньше, чем обратная э. д. с. самоиндукции, возникающая при быстрых изменениях тока, какие имеют место в подобных случаях.

Волновые процессы в соединительных проводах, на которые намекает автор, имеют — даже при «сравнительно большой» протяженности соединительных проводов» порядка 10—15 м — столь высокие частоты, что они вообще не будут обнаружены при тех масштабах времени, в которых сняты приводимые осциллограммы.

Вызывает удивление весьма большая крутизна фронта волны тока. Почти на всех осциллограммах вовсе отсутствует след луча на восходящей части кривой, т. е. эта крутизна во много раз больше, чем на последующем спаде (ср. осциллограммы рис. 3, III; 6, III; 6, IV; 7, III и др. [1]). Фронт волны практически отвесный.



Осциллограммы тока при разряде через плавкие вставки имеют еще ряд необъясненных автором особенностей. Например, было бы интересно знать, почему гашение плавкой вставки всегда занимает два полупериода тока, почему амплитуда тока во втором полупериоде может быть больше, чем в первом. Это явно видно на рис. 3—1 [1] и, повидному, также обстоит дело на рис. 7 [1] и рис. 2 и 3 [2], хотя нижняя часть всех этих осциллограмм поче-

* Ссылки на статью в журнале „Электричество“ будут сопровождаться знаком [1], а на статью в сборнике „Техническая физика“ — знаком [2].

му-то не показана на рисунках. Наконец, весьма замечательным является то обстоятельство, что, судя по осциллограммам, введение в цепь плавкого предохранителя в несколько раз повышает частоту собственных колебаний контура(I). Частота разряда вообще, согласно данным рис. 6 [1], сильно зависит от диаметра и материала вставки.

Объяснение всех описанных «явлений» лежит в недостаточности правильной постановке измерительной части и неосведомленности экспериментатора в области методики осциллографирования импульсных токов, несмотря на наличие опубликованных работ советского ученого Я. С. Ицхоки, предложившего строгое и изящное решение этой задачи, оставляющее далеко позади методы, применяемые такими иностранными исследователями, как Беллаши, Мак Икрон, Браунли и др.

Все осциллограммы И. Е. Балыгина, приведенные в рассматриваемых здесь работах, представляют собой осциллограммы не токов, а почти чистого индуктивного падения напряжения $L \frac{di}{dt}$, чем и объясняются все их особенности. На рис. а, нами здесь приведена осциллограмма тока разряда на искровой промежутке той самой батареи, с которой работал И. Е. Балыгин, снятая с помощью тщательно рассчитанного и сконструированного шунта, применявшегося в компенсированной схеме по Я. С. Ицхоки. На рис. б нами приведена типичная осциллограмма тока через плавкую вставку. На тех же рисунках пунктиром показан примерный ход кривой $\frac{di}{dt}$, ко-

торая, как легко видеть, практически соответствует осциллограммам «тока», приведенным И. Е. Балыгиным, если учесть, что они в известной мере отражают не чье-либо падение напряжения, а падение напряжения на этом вполне понятна форма осциллограмм И. Е. Балыгина при разряде через плавкую вставку, обусловленная тем, что крутизна тока в стадии гашения может быть больше начальной крутизны кривой.

Не останавливаясь подробно на существе физических воззрений И. Е. Балыгина на природу явлений, которыми он объединяет неудачным термином «электрический взрыв», нужно заметить, что только отсутствие достаточно ярких представлений могло побудить его написать, что при замыкании через искру конденсаторной батареи «разряд» может быть колебательным, но он *всегда* происходит *непрерывно* [2] (курсив наш). Следовало бы сказать: «Разряд всегда гаснет при каждом прохождении через нуль, но зажигается вновь, в том случае, если комбинация ионов происходит недостаточно быстро», явление, описываемое И. Е. Балыгиным, является обычным повторным зажиганием плавкого предохранителя, вызванного недостаточной длиной при данных условиях дуги.

В заключение нельзя не отметить, что И. Е. Балыгин был известна оценка его работы, но он все же не бликовал и к тому же в двух журналах явно недобросовестную работу.

В. Ю. ГЕССЕН, А. В. КОРСУНЦЕВ
В. К. ШИБАНОВ

ОТВЕТ НА ЗАМЕЧАНИЯ В. Ю. ГЕССЕНА, А. В. КОРСУНЦЕВА И В. К. ШИБАНОВА

Авторы замечания справедливо указывают, что от импульсных генераторов можно получить кривую тока, близкую к затухающей синусоиде. Вообще, форма импульса тока зависит от конфигурации контура и демпфирующих сопротивлений. В некоторых случаях нет нужды в кривой, близкой к затухающей синусоиде, по крайней мере мне она была не особенно нужна, и я работал с искаженной волной.

Авторы далее утверждают, что почти на всех приведенных осциллограммах [Л. 1] вовсе отсутствует след луча на восходящей части кривой и что фронт осциллограмм стесненный. Такое утверждение не соответствует действительности. Например, у осциллограммы V рис. 6 и IV рис. 7 фронт волны явно равен около 4 мксек, у осциллограммы I рис. 3 около 2 мксек и, как видно, он далеко не отвесный. След луча на остальных осциллограммах в подлинниках, представленных мною в редакцию, был виден, но слабо; после воспроизведения осциллограммы стал вовсе незаметным.

Авторы интересуются затем, почему гашение плавкой вставки всегда занимает два полупериода. Во-первых, они ошибаются: это не два полупериода, а здесь имеет место переход тока через нуль вследствие появления тока смещения при очень резком обрыве тока проводимости в момент электрического взрыва проволоочки. Они также ошибаются во-вторых, заявляя, что это всегда наблюдается. Очевидно, например, что на осциллограмме III рис. 3 [Л. 1] ток не достигает нулевого значения в момент гашения. То же самое наблюдается на осциллограмме II рис. 6. На осциллограмме I рис. 3 переход тока через нуль следует, бесспорно, отнести за счет обратного перекрытия вакуумного сосуда после испарения медной проволоки и оседания меди на поверхности стекла. Явление обратного перекрытия в подобных случаях сравнительно хорошо изучено [Л. 2]. Авторы заметки не пожелали учитывать токов смещения при обрыве тока проводимости и они, естественно, нашли много, как они выражаются, замечательных моментов, которые и не замедлили приписать недостаточности правильной постановки измерений.

В. Ю. Гессен, А. В. Корсунцев и В. К. Шибанов еще раз глубоко ошибаются, характеризую метод измерения импульсных токов, предложенный Я. С. Ицхоки [Л. 3], как строгий и изящный. Известно, что компенсационные схемы при измерениях и регистрации токов импульсной формы хороши только в математических выкладках, но для прак-

тического использования мало пригодны и ими редко пользуются. Применение этого метода связано со значительными трудностями:

1. Необходимо уничтожить отражения волн от точек подводки путем точного подбора омического сопротивления, равного волновому сопротивлению проводов.

2. Необходимо подобрать точную компенсацию $\approx r_0 C_n$; при этом демпфирующее сопротивление r_0 должно быть сравнительно невелико. При регистрации больших токов величина r_0 должна быть мала, иначе изображение выйдет за экран осциллографа и надо вводить дополнительный контур для деления напряжения. Но величина r_0 , кроме того, зависит от параметров оцениваемой системы осциллографа, конструктивных особенностей вводов и т. д.

3. Требуется ввести дополнительный контур с целью для подбора C_n . Подбор должен быть практически точным.

4. Безусловно, необходимо также точно учесть емкостные емкости и индуктивности как основных, так и вспомогательных контуров, что практически сделать очень трудно.

5. Нужно иметь надежный метод для проверки правильности подбора параметров шунта.

Заявление авторов о том, что все осциллограммы, приведенные мною, представляют индуктивное падение на шунте, никак не соответствует действительности. Самое дело, как с этой точки зрения объяснить форму волн токов осциллограммы I рис. 3, III рис. 3 и II рис. 6. Да и как можно говорить о преобладании индуктивного падения на шунте по сравнению с омическим падением, когда многие осциллограммы снимались мной при использовании шунта, сопротивление которого было равнолям ома. Это можно легко проследить по амплитуде некоторых осциллограмм, например на рис. 3. Это замечание могло относиться только к осциллограммам I и II на рис. [Л. 1], записанных мною при использовании шунта с

большой постоянной времени $\left(\frac{L}{r}\right)$. Но в статье мною отмечено, что осциллограммы сняты для определения параметров контура [Л. 4]. В этом случае без-

можно, записать ли падение напряжения на шунте омическое, индуктивное или смешанное. В самом деле:

$$I = \frac{u_0}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t \text{ и } \ln \frac{I_{m(t)}}{I_{m(t+T)}} = \alpha T;$$

$$L \frac{dI}{dt}:$$

$$\xi = \frac{L u_0}{\omega L} \left[\frac{d}{dt} (e^{-\alpha t} \sin \omega t) \right] = \frac{u_0 L e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \phi)}{L \cos \phi};$$

$$t=0$$

$$E_{\max} = \frac{u_0 L_1}{L}$$

$$t=T, E_1 = E_{\max} e^{-\alpha T},$$

$$\text{а } \ln \frac{E_{\max}}{E_1} = \alpha T, \text{ т. е. то же самое.}$$

$$E = r_{\text{ш}} I + L_1 \frac{dI}{dt} = \frac{u_0 (r_{\text{ш}} - \alpha L_1)}{\omega L \cos \xi} \sin(\omega t + \xi)$$

$$\text{и } \ln \frac{E_{\max}}{E} = \alpha T - \text{все то же.}$$

В. Ю. Гессен, А. В. Корсунцев и В. К. Шибанов приводят, как они выражаются, типичную осциллограмму тока при разрядке на плавкую вставку той же батареи конденсаторов, которая была использована в моих опытах. Авторы затем заявляют, что это типичная осциллограмма снята с помощью тщательно рассчитанного и сконструированного шунта по компенсационной схеме Я. С. Ицхоки. Приводится, как видно, почти правильная часть синусоиды, точность записи которой доказывается только тем, что, т. е. тщательностью конструкции и изысканием метода. Сравнивая приведенные мной осциллограммы с тем типичным как бы эталоном, авторы утверждают, — не убеждают, — что форма моих осциллограмм искажена. Это больше чем странный метод доказательств потому, что надо еще показать, что форма этой типичной осциллограммы правильная. Легко можно доказать обратное, что она вовсе неправильная. Известно, что при переходе от одного агрегатного состояния медной проволоки к другому происходит весьма сильное изменение ее проводимости. Например, при переходе от твердого состояния жидкому σ уменьшается приблизительно на $1/7$ своей величины [Л 2]. В момент плавления при неизменной температуре σ скачкообразно снижается еще приблизительно на половину. При дальнейшем повышении температуры продолжит дальнейшее уменьшение σ до превращения проволоки в пар, только при 2310°C снижение прекра-

щается. При новом повышении температуры до 3500°C положение изменяется вследствие термояонизации металлического газа (пара): σ сильно увеличивается и при температуре 4500°C канал из этого газа уже имеет примерно такое же значение σ , как и холодная проволока. Применительно к разбираемому рисунку авторов полный цикл переходов проводника от твердого до газообразного состояния происходил приблизительно в 6 мксек. Медные проволоки, с которыми производились испытания, были диаметром 0,1 мм и длиной более 0,5 м. Сопротивление их при $T=20^\circ\text{C}$ больше 1 ома. Поэтому непонятно, как при таких обстоятельствах могла получиться неискаженная синусоида. Будет более понятно, если предположить, что авторы перекompенсировали шунт и получали неправильные осциллограммы как в отношении формы, так и величины токов.

В. Ю. Гессен, А. В. Корсунцев и В. К. Шибанов называют термин «электрический взрыв» металлических проволок неудачным, а явление самопроизвольного погасания на некоторый период искры при атмосферных условиях простым повторным зажиганием. Здесь, видимо, имеется тоже очередная неувязка, но на этот раз по части знакомства авторов с современной отечественной литературой; вопросы электрического взрыва и явление самопроизвольного погасания искры подвергались всестороннему и серьезному изучению [Л. 5, 6, 7 и 8]. Термин «электрический взрыв» общепотребителен. В названной литературе можно найти осциллограммы токов при самопроизвольном погасании искры в момент электрического взрыва металлических проволок, которые очень похожи на соответствующие осциллограммы, приведенные мной в разбираемых статьях.

Мне кажется, что возражения В. Ю. Гессена и др., главным образом, основаны на недоразумении и на недостаточной ориентации в обсуждаемых вопросах.

Литература

1. И. Е. Балыгин. Поведение плавких предохранителей при ударных токах большой силы. Электричество, стр. 70, № 4, 1949.
2. J. W. G. A. Arch. f. El., стр. 656, т. 33, 1939.
3. Я. С. Ицхоки. Неискажающая регистрация импульсных токов с помощью катодного осциллографа. Электричество, стр. 47, № 12, 1938.
4. И. С. Стекольников. ДАН, стр. 417, № 5, 1946.
5. Н. Н. Соболев. ЖЭТФ, стр. 986, № 11, 1947.
6. И. С. Абрамсон и И. С. Маршак. ЖТФ, стр. 637, № 10, 1942.
7. Н. Н. Соболев. Известия Академии наук, стр. 222, № 3, 1947.
8. И. И. Левитинов. Известия Академии наук, стр. 229, № 3, 1947.

И. Е. БАЛЫГИН



КОНФЕРЕНЦИЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Для обсуждения предложений и замечаний, выявленных на читательских конференциях в Москве, Киеве, Ленинграде и Свердловске в отношении статей, опубликованных в журнале „Электричество“,

В ЧЕТВЕРГ, 18 МАЯ 1950 г.

будет проведена в Москве в помещении МОНИТОЭ однодневная конференция авторов журнала „Электричество“.

Редакция журнала и Правление МОНИТОЭ приглашают всех авторов журнала „Электричество“ принять активное участие в работе конференции, открытие которой состоится в 7 час. вечера (проезд Владимирова, д. 6, подъезд 1, этаж 4-й).

Совещание по новым конструкциям шинопроводов

Комитет по электроснабжению промышленных предприятий при ВНИТОЭ совместно с МОНИТОЭ и Домом инженера и техника им. Дзержинского провел в конце прошлого года однодневное совещание инженеров-электриков Москвы по вопросу о новых конструкциях шинопроводов для внутрицехового распределения электроэнергии в металлообрабатывающих цехах с часто перемещаемым технологическим оборудованием.

На совещании было заслушано 3 доклада.

Инж. Г. А. Карвовский (Центроэлектромонтаж МСПТИ) в докладе «Конструкция штепсельных шинопроводов» сделал критический обзор старых систем внутрицехового распределения энергии, которые базировались на расчетах по минимуму проводникового материала и выполнялись в виде радиальных сетей, прокладываемых способами, не допускающими быстрого их перемонтажа (в траншеях, каналах и стальных трубах).

Поиски более совершенных систем внутрицехового распределения энергии привели на первом этапе на одном из крупных автозаводов к прокладке над станками металлических коробов с проложенными в них изолированными проводами всех ответвлений, обслуживающих линию станков. Важным следующим шагом на пути к созданию более гибкой распределительной сети было внедрение известных «шинных сборок» инж. Ф. Я. Гольдберга, которые и до сих пор в некоторых случаях не потеряли своей ценности. Следующим этапом в развитии системы внутрицехового распределения энергии в цехах с часто перемещаемым оборудованием явился переход от кабельных радиальных питательных сетей к более мощным магистральным сетям, выполняемым из голых проводов или шин, рассчитанных по методу удельных нагрузок (a/m^2 или $ва/m^2$) с учетом возможного перемещения технологического оборудования.

Питательные магистральные сети из голых проводов сочетаются с закрытыми, так называемыми «штепсельными», шинопроводами, также рассчитанными по удельным нагрузкам, от которых непосредственно через штепсельное присоединение питаются токоприемники. Как показали специально проведенные подсчеты, несмотря на то, что расчет по методу удельных нагрузок приводит к запасам в самой магистральной сети, в конечном счете, для сети в целом при такой системе даже получается некоторая экономия проводникового материала. Штепсельные шинопроводы могут сочетаться также с закрытыми шинопроводами на большие силы тока (до 2000 а). Таким образом создается действительно универсальная, гибкая и экономичная система внутрицехового распределения энергии. Следует при этом отметить, что надежность работы голых магистральных сетей подтверждается почти 15-летним опытом их эксплуатации в наиболее ответственных цехах металлургической и машиностроительной промышленности.

В настоящее время уже созданы промышленные конструкции штепсельных шинопроводов и смонтировано несколько цехов с их применением (метизный цех автозавода им. Сталина и др.). На автозаводе им. Сталина штепсельные шинопроводы изготовлены и установлены силами завода по чертежам Московского проектно-конструкторского управления (МПКУ) Центроэлектромонтажа. Здесь штепсельные шинопроводы изготовлены на рабочие токи до 600 а. На Московском заводе электромонтажных конструкций системы Главэлектромонтажа МСПТИ освоена производством конструкция штепсельного шинопровода на 250 и 350 а. Эта конструкция несколько отличается от конструкции МПКУ ЦЭМ, примененной на автозаводе

им. Сталина. Конструкция ГЭМ положена также в основу конструкции шинопроводов, изготавливаемых в настоящее время производственными мастерскими Главэлектромонтажа Минмашстроя. Эти шинопроводы выполняются на рабочие токи 100, 250 и 350 а.

В целях получения гибкой системы внутрицехового распределения энергии рекомендуется широкое применение штепсельных шинопроводов и в первую очередь в бесштановых пролетах, где шинопроводы могут размещаться линиями вероятного расположения станков и крепиться к перекрытию или фермам на подвесках. Штепсельные шинопроводы также должны найти применение и в цехах с крановыми пролетами. В этих случаях шинопроводы следует размещать в «мертвых» зонах крановых пролетов, т. е. вдоль колонн здания под подкрановыми балками.

Внедрение шинопроводов, рассчитанных по удельным нагрузкам, дает широкие возможности сохранить их универсальность на неограниченно длительный эксплуатационный период также за счет улучшения качества энергии путем возможной установки в процессе эксплуатации статических конденсаторов низкого напряжения.

Инж. П. П. Карочкин (автозавод им. Сталина) в докладе «Опыт изготовления и эксплуатации штепсельных шинопроводов» сообщил, что шинопроводы изготовлены, установлены и находятся в эксплуатации 500 м штепсельных шинопроводов. Конструкция шинопроводов (тип Б) изготовлена по чертежам МПКУ ЦЭМ, имеет следующую характеристику: номинальный ток шинопровода с предохранителями до 100 а, длина шинопровода 2 м, вес секции (без ответвительных коробок) 30 кг. Штепсельные (ответвительные коробки) могут устанавливаться по обеим сторонам шинопровода через каждые 0,2 м. Сейчас завод располагает полной оснасткой для изготовления таких шинопроводов. Двухмесячный опыт эксплуатации на заводе первой партии штепсельных шинопроводов позволяет сделать следующие выводы:

1. Большую часть неполадок и аварий, имевших место в начале работы шинопроводов, следует отнести за счет сложности условий монтажа (монтаж шинопроводов выполнялся без перерыва производства) и «детских болезней» освоения новых изделий. После окончания пускового периода шинопроводы работают без единой аварии.

2. Часть неполадок объясняется еще недостатком совершенством отдельных элементов конструкции шинопроводов, а именно: примененные способы болтового соединения отдельных секций не гарантируют надежного электрического контакта по всей длине короба шинопровода. Принятые расстояния от токоведущих частей до корпусов ответвительных коробках недостаточны, термоустойчивость установленных рубильников в ответвительных коробках недостаточна и др.

3. Применение штепсельных шинопроводов создает большие эксплуатационные удобства, в соответствии с которыми намечается оборудовать ими еще ряд цехов.

Касаясь схемы электроснабжения цехов с применением штепсельных шинопроводов и голых магистралей в цехах с точки зрения эксплуатации, докладчик выдвинул следующие пожелания:

1) для учета энергии по цехам и отделениям необходимо проработать конструкцию установки трансформатора тока в расщелку шинопроводов;

2) следует обсудить целесообразность отказа от использования короба шинопровода в качестве магистрального для этой цели самостоятельного магистральной сети заземления;

3) если в местах ответвления от голых или закрытых магистралей к штепсельным шинопроводам устанавливается автомат, то последний должен иметь выдержку времени, так как опыт эксплуатации на ЗИС показал неселективное отключение автоматов мгновенного действия при коротких замыканиях возле двигателей — до перегорания ламп вставок в двигательных ответвлениях;

4) использование силовой сети для местного освещения станков заменить системой группового местного освещения от самостоятельного источника тока (небольшой индивидуальный трансформатор на группу станков) с прокладкой специальной для этих целей распределительной

5) применение открытых голых магистралей должно применяться только в тех случаях, где это не мешает производству ремонтных работ в цехе.

Инж. С. В. Френкель (Главэлектромонтаж) в докладе «Опыт изготовления и монтажа штепсельных шинопроводов» подробно остановился на конструкции шинопроводов, выполняемых в настоящее время производственными мастерскими Главэлектромонтажа. Номенклатура выпускаемых шинопроводов следующая: 1) распределительные трехметровые шины на 100, 250 и 350 а; 2) ответвительные (штепсельные) коробки до 100 а и 3) переходные элементы (фитинги) 3 типов: угольник, крест и тройник.

Кроме указанного, мастерскими выпускаются магистральные шинопроводы на токи 500 и 700 а глухого типа без штепсельных ответвлений. Отбор мощности осуществляется установкой кабельных ответвительных коробок в местах стыкования секций или переходом с помощью соответствующего фитинга на распределительную секцию. Конструкция магистрального шинопровода принята с двойными шинами. Такое расположение шин увеличивает динамическую устойчивость по токам короткого замыкания и снижает индуктивное падение напряжения.

Таким образом, выпускаемая в настоящее время номенклатура изделий для комплектного шинопровода позволяет полностью осуществить схему «блок трансформатор — магистраль» для трансформаторов мощностью до 100 кВА (при выводе мощности от трансформатора на обе стороны). Но такими шинопроводами задача внутреннего распределения энергии решается частично, так как и по существу, могут применяться лишь как распре-

делительные в поточной технологии. Ведутся работы по освоению штепсельных шинопроводов на большие силы тока.

В процессе налаживания производства шинопроводов пришлось: а) освоить изготовление малогабаритных насыпных предохранителей с достаточно сложной технологией; б) преодолеть трудности по качественной окраске шинопроводов.

Выпуск первой партии шинопроводов выявил ряд конструктивных и производственных недостатков, над исправлением которых в настоящее время ведутся работы. В частности, испытания показали, что шины обладают значительным индуктивным сопротивлением, что в значительной степени снижает значение тока короткого замыкания уже за первыми секциями. Кроме того, оказалось, что шины обладают значительной неравномерностью индуктивных сопротивлений, достигающей 35%, что ставит вопрос о необходимости транспозиции.

Пока остается до конца неразрешенным вопрос зачистки коробов шинопровода и ответвительных штепсельных коробок. Рекомендуемое крепление секций шинопровода помощью, так называемых, «царапающих» гаек едва ли гарантирует необходимый контакт. Докладчик предложил: освоенную производством конструкцию штепсельных шинопроводов Главэлектромонтажа и Главэлектромонтажа принять как стандартную для промышленных установок; добиться разрешения вопроса о плановом снабжении материалами для изготовления шинопроводов; углубить работы по усовершенствованию существующих типов шинопроводов и рекомендовать всем проектным организациям принимать в проектах освоенную конструкцию шинопроводов, максимально расширяя область применения схем «блок трансформатор — магистраль».

В прениях единодушно приветствовались мероприятия по внедрению в практику проектирования и монтажа совершенных систем внутрицехового распределения энергии с применением штепсельных шинопроводов как элемента, наиболее полно отвечающего современным требованиям эксплуатации крупных металлообрабатывающих цехов с часто перемещаемым технологическим оборудованием.

В принятой Советским Союзом резолюции отражены вопросы, затронутые в докладах и прениях.

Инж. Е. Ф. ЖУРАВЛЕВ



Научно-техническая сессия по экономии электроэнергии

На состоявшейся в Москве в IV квартале 1949 г. по инициативе МОНИТОЭ и Мосэнергосбыта научно-технической сессии по вопросам экономии электроэнергии в машиностроительной и текстильной промышленности было обсуждено 19 докладов и сообщений. В работе сессии приняло участие свыше 200 специалистов, в числе более 100 делегатов, командированных из других городов.

В докладе «Экономия электроэнергии на промышленных предприятиях Москвы и области» инж. В. Н. Буденный (Энергосбыт Мосэнергосбыта) подчеркнул значение внедрения новых методов обработки металлов и электротермических процессов для экономии электроэнергии.

Инж. А. К. Шадрин (МОНИТОЭ) остановился на итогах Всесоюзного конкурса 1948 г. на лучшее предложение по экономии электрической и тепловой энергии.

Инж. А. А. Тайн (Энергометаллургпром) в докладе «Методы нормирования удельных расходов электроэнергии» разобрал вопросы, связанные разработкой и внедрением среднепрогрессивных нормальных расходов энергии, которые должны создаваться на основе анализа энергобалансов и опытных энергетических характеристик оборудования при наиболее экономичном распределении нагрузок между отдельными агрегатами (механизмами относительных приростов).

В докладе кандидата техн. наук М. М. Морозова (конденсаторный завод) «Производство статиче-

ских конденсаторов и их эксплуатация» было указано, что на каждую тысячу киловатт новой мощности генераторов необходимо вводить 200—250 кВА дополнительной реактивной мощности. Докладчик ознакомил участников с проектом статических конденсаторов второго габарита мощностью в 25 кВА (при пропитке маслом) и 40 кВА (при пропитке соволом).

Инж. Г. А. Другов (завод электросчетчиков МЭП) сделал доклад «Состояние и перспективы производства электроизмерительных приборов».

В докладе кандидата техн. наук, доц. А. С. Сандлеа (МЭИ им. Молотова) «Регулируемый электропривод мощных механизмов с вентиляторным моментом» было сообщено о разработанном в МЭИ регулируемом асинхронном приводе с поворотным статором, который может быть использован для экономического регулирования скорости вентиляторных механизмов без значительного усложнения существующих конструкций асинхронных двигателей. Для ряда установок сравнительно небольшой мощности целесообразно применение электромагнитных муфт скольжения.

Доклад «Современное состояние техники индукционного нагрева металлов и экономия электроэнергии» сделал ст. научный сотрудник М. Г. Лозинский (Институт металлургии им. Байкова АН СССР), который указал, что расход электроэнергии на нагрев конструкционной стали составляет для поверхностной закалки 0,35—0,45 кВт/кг, для пайки

медью 0,4—0,45 кВтч/кг и для штамповки иковки 0,45—0,65 кВтч/кг.

В докладе инж. А. С. Тихомирова (Автомобильный завод им. Сталина) «Автоматическое управление металлоорежущими станками» был освещен опыт завода по автоматизации управления металлоорежущими станками, в особенности в связи с организацией поточных линий по обработке отдельных деталей и узлов.

Доктор техн. наук Б. Р. Лазаренко (НИИ МЭП) представил доклад «Электроискровая обработка металлов», в котором сообщил о схемах питания установок электроискрового действия в свете требований экономии электроэнергии.

Доклад «Высокочастотная сушка древесины» сделал инж. Х. Р. Палян (Энергосбыт Арменэнерго), который обратил внимание на важность определения предельно допустимой температуры и предельного градиента поля для повышения концентрации мощности, уточнения конечной влажности и величины оптимальной частоты.

Доклад «Экономия электроэнергии при внедрении передовой технологии в машиностроении» сделал на секции машиностроения и металлообработки инж. Т. А. Титов (Автомобильный завод им. Сталина), который отметил, что в заготовительных цехах завода были внедрены для очистки литья высокопроизводительные дробеструйные аппараты взамен пескоструйных камер, электрические вибраторы взамен пневматических, а также инжекционные горелки на пламенных печах. В литейных цехах автоматизированы технологические процессы. В механических цехах внедрены автоматические линии, заменена обработка резанием обработкой на высодочных станках, изменена технология изготовления штампов. Все это обеспечило значительную экономию электроэнергии, расходуемую на единицу продукции.

В докладе «Опыт экономии электроэнергии на Коломенском паровозостроительном заводе им. Кузнецова» инж. А. А. Филатов отметил, что мероприятия по экономии электроэнергии были направлены на обеспечение рационального режима работы компрессорных установок, сокращение расхода сжатого воздуха и кислорода, улучшение работы электропечей и ликвидацию холостых ходов станков, кранов и т. п. В котельных цехах завода 50% всех сварочных работ переведено с ручной на автоматическую сварку, в ряде цехов запущены десятки поточных линий. В докладе отмечаются мероприятия по переводу на скоростные методы обработки металлов, переводу со свободнойковки на штамповку, установке выключателей холостого хода, изготовлению и внедрению приспособлений для лучшей загрузки электропечей.

Доклад «Пути экономии электроэнергии и рациональная мощность печей сопротивления для термообработки металлов» сделал кандидат техн. наук, доц. А. Д. Свенчанский (МЭИ).

Доклад «Экономия электроэнергии в электродуговых печах» сделал доц. Б. С. Барский (ММПИ).

В докладе «Автоматизация в текстильной промышленности» кандидата техн. наук Б. П. Козлова (НИИЛТЕКМАШ) на секции текстильной промышленности были рассмотрены вопросы автоматизации подготовительных, прядильных и ткацких производств, а также контроля и автоматического регулирования температуры, уровня влажности в отделочных фабриках.

Доклад «Высокочастотная сушка» сделал кандидат техн. наук С. А. Абаев (ВТИ), который привел принципиальные схемы ламповых генераторов и высокочастотных сушильных установок, а также указал области применения диэлектрического нагрева в текстильной промышленности.

В докладе кандидата техн. наук, доц. Н. И. Конова (Ивановский энергетический институт) «Прогрессивное нормирование расхода электроэнергии в текстильной промышленности» было указано на необходимость дифференцирования по статьям электробаланса общей нормы, установленной для каждого предприятия. Дифференцированные электробалансы и уточненные нормы расхода электроэнергии были успешно внедрены на ряде текстильных предприятий.

Доклад «Опыт экономии электроэнергии на комбинате «Трехгорная мануфактура» им. Дзержинского» сделал инж. Г. Л. Соболев, который сообщил об электротехнических и технологических мероприятиях, реализованных на комбинате с целью экономии расхода электроэнергии.

В докладе «Опыт экономии электроэнергии на фабрике «Победа Октября», инж. П. А. Лопатин указал, что на фабрике был выполнен перевод ватеров на текснопную передачу вместо ременной, привода ткацких станков на текснопную передачу с приводом и муфтой сцепления, что позволило уменьшить мощность двигателя с 1,5 кВт до 0,8 кВт; были установлены магнитные пускатели на сновальных машинах ткацких станках с ограничителями холостого хода. В 1949 г. на фабрике введено люминесцентное освещение.

Сессией была принята резолюция, в которой подчеркивается необходимость усиления контроля за внедрением предложенных и быстрее распространения сборников премированных предложений. Необходимо расширение производственной базы по изготовлению статических конденсаторов улучшенных электрических счетчиков, регистрирующих приборов, как Дитце, магнитных пускателей и ограничителей холостого хода. Отмечена необходимость создания технической базы удельных норм расхода электроэнергии, на основе анализа энергетических характеристик и баланса, внедрения передовой технологии, создания оптимальных режимов работы и оптимального использования оборудования.

По механической обработке металлов. Должны внедряться новые методы обработки металлов: электроискровые методы, скоростное резание, замена процесса резания холодной высадкой, применение гидравлической клепки холодным способом, автоматизация технологических процессов путем внедрения автоматических линий.

По электродуговым печам. Необходимо определять оптимальные электрические параметры установок с учетом новейших исследований в этой области, внедрять реконструкцию электромагнитных печей старой конструкции, широко использовать кислый процесс электроплавки, метод работы на переплаве, расширение дуплекс-процессов электроплавки.

По термическим печам сопротивления. Необходимы организация и увеличение производства высокоэффективных теплоизоляционных материалов (ультралегковесы, пенодиатомовые изделия, шлаковаты, вермикулитовые изделия). Получение большой экономии электроэнергии возможно путем форсировки процесса, уменьшения простоев, введения непрерывной работы, обеспечения полной нагрузки.

По индукционному нагреву. Рекомендуется широкое внедрение метода поверхностной местной закаливания участков стальных деталей токами высокой частоты. Необходима организация участков высокочастотной пайки твердыми припоями.

По сушке неметаллических материалов высокочастотным нагревом. Следует расширять работы по выяснению целесообразности высокочастотного нагрева для сушки различных неметаллических материалов, в частности, отмечена целесообразность осуществления опытной установки для сушки шерсти методом высокочастотного нагрева. Обращено внимание Госэнергоинститута на необходимость издания литературы по вопросам высокочастотной сушки неметаллических материалов.

По автоматизации процессов в текстильной промышленности. Обращено внимание опытных НИТО на предприятиях на необходимость оказания содействия быстрейшему освоению приборов и механизмов автоматизации. Отмечена необходимость разработки конструкции регулятора прядения для работы его с коллекторными электродвигателями для привода к кольцевальным машинам.

По внедрению ламп дневного света. Отмечена необходимость быстрейшей разработки Ивановским институтом охраны труда типовой расстановки светильников дневного света на текстильных предприятиях.

Инж. А. А. Тай



Обсуждение книг по электрическим машинам во ВНИТОЭ

В конце 1949 г. в Ленинграде на секции электрических машин ВНИТОЭ были обсуждены книги доктора техн. наук, проф. М. П. Костенко «Электрические машины. Специальная часть» и доктора техн. наук, проф. А. Е. Алексеева «Конструкция электрических машин».

М. П. Костенко сообщил о том, как составлялась его книга, какие принципы были положены в основу создания ее, и указал особенности методики изложения в ней основных вопросов. Он отметил, что в данной книге в большой степени отразились взгляды автора на целый ряд вопросов. В специальной части курса позиция автора может быть проявлена весьма существенно; однако, основные вопросы, связанные с современной теорией электрической машины, при этом были учтены.

По книге М. П. Костенко был заслушан отзыв доктора техн. наук, проф. Л. Н. Грузова¹. В прениях выступили: Я. Бергер, И. М. Постников, Е. А. Паль, Е. Я. Казовский.

А. Я. Бергер отметил, что выход в свет книги М. П. Костенко является большим событием в области литературы по электрическим машинам. Книга содержит ряд оригинальных идей, концепций, методов, отличается преобразовательной компоновкой материала и использованием огромной литературы. А. Я. Бергер считает, что по некоторым вопросам отсутствует современная трактовка, как, например, по вопросам коммутации; применяя операторный метод, нужно пользоваться преобразованиями Лапласа, а не Карсона. Знаки уравнений при коротком замыкании трансформатора в первой и второй части книги не соответствуют друг другу.

И. М. Постников, соглашаясь с общей высокой оценкой Л. Н. Грузова по книге М. П. Костенко, отметил отдельные недостатки книги. Автор поставил задачу охватить в одной книге чрезвычайно большой объем современных знаний не только в области машин, но и в ряде смежных областей (выпрямители, волновые процессы в трансформаторах и др.). Отдельные разделы книги настолько кратки, что становятся недостаточно убедительными. И. М. Постников тем не менее считает, что в основном недостатки имеют стилистический и редакционный характер.

Е. А. Паль отметил, что М. П. Костенко в своей книге создал единую теорию рассеяния и объединил большое количество вопросов, изложенных до опубликования этой книги в большом количестве работ. Роль советских ученых и инженеров-электриков в развитии электрических машин в книге М. П. Костенко получила широкое отражение.

Е. Я. Казовский зачитал решение Бюро секции электрических машин ВНИТОЭ, высоко оценивающее книгу М. П. Костенко. По мнению Е. Я. Казовского, в книге имеются отдельные неточности при применении операторного метода. Так, например, уравнение (1559) при переменных скорости вращения формально неправильно; оговорки о постоянной скорости вращения в книге нет.

Перед обсуждением книги А. Е. Алексеева ее автор также информировал о том, как создавалась обсуждаемая книга. Он указал, что эта книга является результатом многолетней работы автора в области конструирования электрических машин. Объем книги, подготовленной к печати, составил первоначально 60 печатных листов. По требованию издательства книгу пришлось сократить до 46 листов, поэтому отдельные подразделы, в частности, вопросы методики проектирования электрических машин и большое количество числовых примеров, были исключены.

С сообщением о книге А. Е. Алексеева выступил кандидат техн. наук Б. Н. Красовский, который отметил, что в книге, с достаточной для изучения студентами втузов полнотой, изложен материал, дающий ознакомление конструктивными формами электрических машин,

с взаимосвязями конструктивных принципов электромашиностроения и вопросов электрического расчета машины, нагрева, вентиляции, с различными методами производства и др. Расположение материала книги по 14 ее главам вполне рационально с методической точки зрения. В книге отчетливо выявлена роль советских инженеров в деле завоевания первенства в области крупного электромашиностроения. Б. Н. Красовский подчеркнул, что «учитывая конкретность примеров и простоту изложения, можно с уверенностью сказать, что рассматриваемая книга будет отличным пособием для новаторов производства и персонала эксплуатации на местах применения электрических машин». В числе недостатков книги Б. Н. Красовский отметил: недостаточное внимание, уделенное автором брызгозащищенному исполнению электрических машин; отсутствие освещения вопросов о водяном охлаждении электрических машин посредством пропуска воды через рубашки на корпусе, в подшипниковых щитах и через ротор, о воздушных воздухоохладителях и об охлаждении электрических машин посредством циркуляции масла, о динамической балансировке роторов электрических машин в собственных подшипниках. Автор опустил рассмотрение вопросов, касающихся экономических и весовых соотношений в электрических машинах; вопросы эти в настоящее время становятся особо актуальными не только для крупных единичных серий машин, но и для мелких серий специализированных машин, в основу проектирования которых кладутся те или иные специальные требования, например, достижение наименьшего общего веса или максимально возможного к. п. д.

В прениях выступили А. Я. Бергер, И. М. Постников, М. П. Костенко и Е. Я. Казовский.

А. Я. Бергер считает, что появление книги, посвященной конструкции электрических машин, имеет большое значение для наших высших учебных заведений. Отмечая отдельные недостатки книги, он указал, что в ней ничего не сказано о газоохладителях и уплотнениях водородных машин. Напрасно опущена глава об оптимальных весовых соотношениях и методике расчета. Следовало дать более углубленную теоретическую базу для тепловых расчетов, а также более подробное рассмотрение переходных тепловых режимов.

И. М. Постников, высоко оценивая книгу А. Е. Алексеева, отметил, что она является первой попыткой серьезного обобщения конструкторской мысли. Высоко оценил И. М. Постников представленный в книге расчет вентиляции, хотя этот раздел изложен недостаточно полно: отсутствует рассмотрение вентиляционных потерь в машинах, не затронут вопрос о выборе вентиляторов, нет указаний о необходимых скоростях воздуха в машине. Наиболее существенным недостатком книги является отсутствие в ней вопросов экономики.

М. П. Костенко считает, что в книге сочетаются глубокие знания конструкций с глубокими знаниями теории электрических машин. Такое сочетание — важнейшее достоинство книги.

Е. Я. Казовский остановился на отдельных недостатках книги, подчеркнув, что она рассчитана на исключительно большой контингент читателей. Ясность и доступность изложения, легкость нахождения того или иного вопроса в книге А. Е. Алексеева стоят на высоком уровне. Распределение же материала неравномерно. Число таблиц в книге недостаточно; некоторые таблицы не имеют ссылок на действующие стандарты. В главе по материалам много места уделено металлам; об электроизоляционных же материалах в книге почти ничего не сказано. Непонятно с методической точки зрения, почему в книге изложены основы теплового расчета, но отсутствуют современные данные в области механического расчета, учета усталости металлов, их пластических свойств и др.

Председатель секции электрических машин ВНИТОЭ Е. Я. КАЗОВСКИЙ

¹ Рецензию Л. Н. Грузова см. на след. странице (Ред).



М. П. КОСТЕНКО. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ¹. Специальная часть. Допущено МВО СССР в качестве учебного пособия для энергетических и электротехнических втузов и факультетов. 712 стр., ц. 35 руб. 25 к. Госэнергиздат, 1949.

Круг вопросов, освещаемых в нормальных курсах электрических машин, в достаточной степени установился и в последнее время почти не подвергался изменениям. С другой стороны, за последнее время появилось много новых методов исследования электрических машин, много новых типов машин специального исполнения и назначения, много новых вопросов, связанных с теорией нормальных машин. Весь этот круг вопросов освещался в журналах или же в книгах, выпускаемых небольшим тиражом ведомственными издательствами. Таким образом, давно назрела потребность в выпуске книг, посвященных новым разделам общей теории электрических машин, специальными машинам, переходным процессам в электрических машинах. Труднейшую и почетную задачу объединения в одну книгу подобного материала взял на себя член-корр. Академии наук СССР, проф. М. П. Костенко.

Трудность задачи, стоявшей перед автором, заключалась в необходимости объединить в одну книгу, с максимально возможным единообразием изложения весьма разнообразный материал. Значительное количество вопросов, освещаемых в книге, позволило каждому из них уделить сравнительно небольшое количество страниц, что требовало сжатости изложения. С этой точки зрения следует признать правильным принятое автором изложение материала по отдельным вопросам, а не по типам машин.

Первый раздел книги посвящен специальным электрическим машинам. Описание машин поперечного поля дается здесь с точки зрения общих свойств этих машин, что позволяет уделить каждой машине небольшое место при достаточно полном изложении принципа действия этой машины. Принцип действия и теория потенциальных регуляторов даются более полно, чем в уже имеющихся учебниках. Приводятся схема и основная теория потенциального регулятора с соединением обмоток статора и ротора в общий треугольник, что позволяет не иметь сдвига фаз между первичным и вторичным напряжениями без применения двояженных регуляторов.

Достаточно просто и наглядно выводятся основные уравнения однофазных сельсинов. Новыми являются параграфы, посвященные коллекторному двигателю переменного тока Бенедикта и коллекторным генераторам автора книги, в том числе коллекторному генератору с резонансной схемой возбуждения. Можно иногда не соглашаться с автором в части выбора типов описываемых специальных машин. Вопрос их выбора решается в зависимости от профиля специалиста, для которого ведется изложение, и от личных вкусов автора, и у разных авторов всегда будет различие.

Однако, установку на изложение основных идей, на которых основана специальная машина и ее принципы действия, следует считать правильной, так как подробное изложение теории специальных машин возможно лишь в книге, полностью посвященной этим машинам, и не является необходимым для широкого круга инженеров-электриков.

Дополнительным главам общей теории электрических машин посвящены разделы II—VI, VIII, XI и XII.

Во втором разделе весьма полно и с современных точек зрения дана теория ряда специальных обмоток машин постоянного и переменного тока. Новым и интересным является материал, посвященный искусственно замкнутым волновым обмоткам, уравнивающим соединением третьего рода, обмоткам с переключением числа полюсов.

¹ См. на предшествующей странице отчет об обсуждении книг по электрическим машинам во ВНИТОЭ *Ред.*

Третий раздел посвящен вопросам коммутации коллекторных машин постоянного и переменного тока. Дается весьма полное исследование уравнения коммутации машин постоянного тока; освещается энергетическая сторона вопроса. Просто и понятно изложены вопросы коммутации коллекторных машин переменного тока.

Четвертый раздел посвящен современному положению способов определения параметров электрических машин. Особенно много автор уделяет вопросам добавочного рассеяния электрических машин и дифференциального рассеяния. Эти вопросы в литературе по электрическим машинам впервые даны столь подробно.

Пятый раздел посвящен изложению теории геометрических мест и эквивалентных схем машин переменного тока. В этом разделе широко отражены известные работы автора в области эквивалентных схем и круговых диаграмм асинхронных машин нормального типа, асинхронных машин с параметрами ротора, зависящими от скольжения, регулируемых двигателей, коллекторных машин переменного тока и каскадных соединений асинхронной машины с коллекторными машинами. Этот раздел вполне мог бы составить монографию, посвященную излагаемому вопросу.

Шестой раздел книги посвящен работе трансформаторов и электрических машин переменного тока при несимметричных условиях. В начале раздела излагаются основные положения об особенностях применения метода симметричных составляющих к исследованию электрических машин и вносимая ясность в понятия о параметрах различной последовательности машин. Большую ценность представляет § 98, в котором выводятся уравнения потокоцеплений синхронных машин, широко применяемые в журнальной литературе для исследования установившихся и переходных режимов этих машин, но впервые приводимые в книге, посвященной электрическим машинам. В конце этого параграфа с помощью уравнений потокоцеплений производится обобщение векторной диаграммы синхронной машины при несимметричном напряжении на зажимах. Достаточный объем уделен несимметричным режимам трансформаторов и асинхронных двигателей.

Восьмой раздел посвящен опытным определениям параметров синхронных машин и в сжатой форме дает основные методы подобного определения.

Одиннадцатый раздел, посвященный вычислению добавочных потерь в электрических машинах и трансформаторах, представляет значительный интерес для специалистов в области проектирования и исследования электрических машин.

Двенадцатый раздел посвящен нагреву, охлаждению и вентиляции электрических машин. Раздел содержит некоторые элементарные сведения, известных из общих курсов электрических машин, но не вошедших в основной курс автора. Часть места уделена тепловым эквивалентным схемам и методу наложения превышений температуры.

Менее оправдано помещение в книгу раздела, посвященного выпрямителям, так как элементарные сведения, изложенные в четырнадцатом разделе, меньше объема курса выпрямителей, читаемого общими энергетическими втузами.

Материалы, посвященные переходным процессам в электрических машинах, сосредоточены в разделах VII, IX, X и XIII.

В седьмом разделе автор дает изложение переходных процессов в электрических машинах постоянного тока и изложение переходных режимов в машинах переменного тока, причем в последнем случае автор пользуется, главным образом, упрощенными уравнениями и физическими соображениями. Раздел начинается с рассмотрения самовозбуждения коллекторных машин постоянного и переменного тока. Достаточно подробно и современным языком изложены переходные процессы в машинах постоянного тока. Большая часть места здесь уделена упрощенному рассмотрению вопроса без учета насыщения, коммутационных токов и т. д. Ясное решение приводится только по методу И. Касьянова. Дается приближенное исследование переходных процессов в двигателях постоянного тока.

Большой интерес представляет § 116, в котором наглядно рассмотрена физическая картина явлений, происходящих при внезапном коротком замыкании генератора постоянного тока.

В девятом разделе достаточно подробно и полно излагаются вопросы возникновения высокочастотных колебаний и перенапряжений в электрических машинах и трансформаторах. Весь материал подан современным техническим языком и вполне достаточен для инженеров, работающих в области электрических машин.

В десятом разделе автор останавливается на дополнительных моментах и усилиях, возникающих в электрических машинах за счет высших гармоник м. д. с., за счет вибраций, при коротком замыкании и т. д.

В тринадцатом разделе автор дает более подробное, чем в седьмом разделе, математическое исследование переходных процессов в электрических машинах. При этом автор все выводы производит с применением операционного исчисления. Автор затрачивает места на вывод основных формул операционного исчисления, справедливо считая, что основы этого исчисления изучаются в настоящее время во всех электротехнических вузах. Все же надо признать весьма полезным список основных формул, приводимый автором в начале раздела.

Уравнения Горева-Парка выводятся автором в общем виде для синхронных и асинхронных машин, а затем приводятся для каждой из этих машин в отдельности. Можно приветствовать помещение этих уравнений в книге по электрическим машинам и их подробное решение, выполненное на базе работ Р. А. Лютера, Е. Я. Казовского и др. Оригинальный и, насколько мне известно, еще не опубликованный материал представляет § 139, посвященный переходному режиму ударного синхронного генератора.

Из недостатков, неизбежных в столь трудной для написания и большой по объему книге, и пожеланий к будущим изданиям можно отметить следующее:

Приведенные в § 98 уравнения потокоцеплений и в § 194 уравнения Горева-Парка являются достаточно общими для синхронных и асинхронных машин уравнениями,

пригодными для вычисления как установившихся, так и переходных режимов. Этим уравнениям желательно было посвятить отдельный раздел книги.

В § 11, 194 и др. автор исходит из наличия у машин двухфазных обмоток, а затем в ряде случаев полученные результаты распространяет на трехфазные машины. Желательно было дать приведение трехфазной машины к эквивалентной двухфазной, что повысило бы общность результатов.

Изложение переходных процессов дается в три этапа: в общем курсе электрических машин (физические понятия), седьмом разделе (упрощенное рассмотрение) и тринадцатом разделе (подробное исследование). Мне кажется рациональным иметь физическое рассмотрение картины явлений в общем курсе и сразу полное исследование вопроса в специальной части с привлечением операторного анализа. Желательно уточнение вопроса о правильности рассмотрения режима работы однофазной машины как частного случая несимметрии напряжения трехфазной машины (стр. 337) и получение уравнений однофазной машины при переходном режиме из уравнений Горева-Парка.

Необходимо пояснение в части возможности использования статических характеристик электрических машин при исследовании качаний и других переходных режимов (§ 123, 142 и др.). Желательно было приведение нового взгляда на множественные однократно замкнутые обмотки, описанные автором в его основном курсе машин. Заслуживало внимания описание процессов, происходящих под щеткой электрической машины во время коммутации. Возможность применения уравнений трансформатора для исследования переходных режимов в электрических машинах (§ 121, 122, 126, 127 и др.) заслуживает более подробного обоснования. Могут быть уточнены определения потенциального регулятора (стр. 42, 49), определения применимости метода симметричных составляющих для исследования синхронных машин (§ 98), вопрос о применении линейных преобразований при выводе уравнений электрических машин (стр. 420) и некоторые другие. Некоторые разделы хотелось бы видеть в более широком изложении, например: определение параметров машин постоянного тока, исследование несинхронных режимов работы синхронной машины, применение метода наложения превышений температуры и т. д.

Отмеченные второстепенные недостатки неизбежны при опубликовании такой книги. Работа, сделанная автором, громадна и, безусловно, с ней мог справиться только крупный ученый, лично много работающий почти во всех затрагиваемых в книге областях.

Можно надеяться, что в дальнейшем книга будет переиздана в виде трех отдельных книг (специальные машины, дополнительные главы теории электромашин, переходные процессы в электрических машинах), что даст возможность в еще большей полноте и единообразии изложить весь поданный в книге материал.

Доктор техн. наук, проф. Л. Н. ГРУЗОВ



С. А. ФАРБМАН И И. Ф. КОЛОБНЕВ. ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.

Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия для вузов.
540 стр., ц. 19 руб. Металлургиздат, 1949.

Книга С. А. Фарбмана и И. Ф. Колобнева вышла третьим изданием. В то время как в первых двух изданиях (1933 и 1936 гг.) изложение ограничивалось плавкой цветных металлов, последнее издание рассматривает выплавку в индукционных печах также и черных металлов. Эта книга — наиболее полная в нашей литературе по печам со стальным сердечником. Она рассчитана на широкий круг читателей и написана доступным языком.

Книга состоит из трех частей. «Общая часть» посвящена рассмотрению огнеупорных материалов (глава I) и типов индукционных печей (глава II). В этой части имеются некоторые недостатки.

В разделе, посвященном индукционным печам со стальным сердечником, авторы совершенно правильно упоминают об опытах использования печей с закрытым каналом для переплавки отходов чугуна; эти опыты дали в

основном положительные результаты. Тем более странным кажется заявление (стр. 19), что такие печи непригодны для плавки черных металлов. Авторы (стр. 25) приходят к выводу, что печи с горизонтальным каналом, имея меньшее металлостатическое давление, «облегчают» тепловую циркуляцию металла и плавят садку быстрее, чем печи с вертикальным каналом. С этим никак нельзя согласиться, ибо только силы вихревого характера способны вызвать циркуляцию металла в замкнутом объеме. Встречаются и отдельные досадные вульгаризации, например: «...проводник, по которому протекает ток, испытывает сжимающее действие от упругих силовых линий магнитного поля».

Наибольшая по объему вторая часть книги посвящена печам со стальным сердечником. Эта часть наиболее удачна. Тем не менее и здесь имеются некоторые недостатки, которые следует устранить в последующих

изданиях. Прежде всего следует сказать о методах расчета этих печей. Здесь мы видим самую важную задачу в определении реактивного сопротивления рассеяния и активного сопротивления металла в плавильном канале. Расчет активного сопротивления канала производится по Релею с использованием понятия «глубины проникновения тока». Как многократно отмечалось, такой подход ошибочен; поэтому нет ничего удивительного, что истинное сопротивление плавильного канала сильно отличается от расчетного. Еще хуже освещен вопрос о расчете индуктивного сопротивления рассеяния. Индукционная печь со стальным сердечником представляет собой весьма своеобразный трансформатор. Перу советских ученых принадлежат ведущие работы по теории рассеяния трансформаторов. Поэтому неясно, почему авторы рекомендуют для расчета сопротивления рассеяния (стр. 218) формулу Нагаока, пригодную для цилиндрических однослойных катушек без стали. Методы расчета рассеяния, применяемые в трансформаторостроении, следует развить и приспособить к нуждам проектировщиков электрических печей со стальным сердечником. С другой стороны, авторы пытаются некоторые «геометрические» законы трансформаторостроения перенести на печи со стальным сердечником. Это не оправдано потому, что печь является, в первую очередь, металлургическим агрегатом, и законы геометрии трансформаторов применительно к этим печам должны быть несравненно более гибкими.

Имеются отдельные противоречия. Так, например, на стр. 204 рекомендуется методика подсчета сопротивления первичной обмотки печного трансформатора, причем для учета поверхностного эффекта рекомендуется увеличивать сопротивление постоянному току на 15%. Это неправильно, ибо поверхностный эффект зависит от геометрического размера обмоточной меди и ее расположения по отношению к сердечнику. В этом авторы отдают себе полный отчет и приводят на стр. 216 выражение, позволяющее в первом приближении определить сопротивление первичной обмотки. Однако, из этого не делается никаких практических выводов применительно к конструкции первичной обмотки. Ее следует делать многослойной и притом так, чтобы радиальный размер обмоточной меди не превосходил 9—10 мм (при частоте 50 гц), а аксиальный размер диктуется плотностью тока или, вернее, допустимым значением электрического к. п. д. и способом охлаждения первичной обмотки. Авторы, однако, рекомендуют обратное (стр. 98).

В главе 4, посвященной рассмотрению движения металла под действием электродинамических и термических сил, отсутствуют обобщения. Электродинамические силы, вызывающие различные эффекты (центробежный эффект, моторный эффект, эффект сжатия, эффект вихревых сил), рассматриваются только с точки зрения их частных проявлений. Поэтому и не рассматривается вовсе вопрос о необходимом условии, которому должно удовлетворять поле для того, чтобы имело место электродинамическое перемешивание. Нет и указаний на изменение величины давления (хотя бы в случае эффекта сжатия) с ростом сечения, или частоты тока.

При выводе формулы моторного усилия в треугольном канале неправильно пишется закон Био-Савара, но в дальнейшем делается еще одна ошибка при написании выражения для элемента длины проводника; в результате наложения этих двух ошибок получается верная формула (27).

Касаясь материалов для изготовления сердечников, авторы не упоминают о советских сортах текстурованной стали, которые благодаря малым потерям допускают применение больших индукций.

В двухканальных печах со стальным сердечником практикуется включение печного трансформатора по схеме Скотта. Неоднократно встречается утверждение (например, стр. 115), что эта схема обеспечивает равномерную нагрузку фаз в трехфазной сети. Это не верно, ибо вследствие разности числа витков «главного» и «вспомогательного» трансформатора сильно отличаются и приведенные сопротивления каналов. Так как схема вообще мало устойчива к перекосам нагрузки, то о равномерности нагрузки сети говорить нельзя.

Большое внимание уделено печам для плавки алюминия. Приоритет в использовании печей со стальным сердечником для плавки алюминия принадлежит СССР. Авторы сами немало потрудились над футеровочными ма-

териалами для канальной части печи. Они разработали футеровочные материалы, нейтральные к Al_2O_3 . Это достижение трудно переоценить. Главное препятствие к внедрению печей со стальным сердечником в алюминиевую промышленность состояло в том, что канальную часть приходилось часто чистить, иначе печь переставала брать нагрузку. Нейтральная футеровка делает чистку, если совсем излишней, то во всяком случае весьма легкой операцией. Несмотря на это, данный раздел написан неудачно. Следовало бы дать сравнение себестоимости тонны готового металла в индукционной печи, типа САН и газовой (или нефтяной). Ничего не скажешь об опыте по работе индукционных печей при переплавлении стружки. Обычно стружку переплавляют в нефтяных или газовых печах. Практика показала, что ее выгоднее плавить в печах со стальным сердечником, ибо при этом угар уменьшается примерно вдвое. Авторы, касаясь работанной ими футеровки, должны были показать среднюю стойкость на основе заводского опыта в условиях непрерывного процесса. Практика показывает, что футеровка авторов применяется далеко не повсюду, что можно объяснить только слабой осведомленностью цеховых работников.

Кроме этого в этой части есть несколько ошибок. Например, естественный $\cos \varphi$ печей Аякс оценивается величиной 0,4—0,5 (стр. 125) вместо 0,35—0,37. Средняя плотность тока в канале печи для плавки алюминия оценивается авторами (стр. 115) в 3—4 a/mm^2 . Но есть печи (например, Аякс), в которых средняя за период плавки плотность тока доходит до 6,3 a/mm^2 ; поэтому мощность канала может быть заметно повышена. Однако, в конечном итоге это зависит от конструкции печи, т. е. от формы зеркала металла.

Третья часть книги посвящена индукционным печам без стального сердечника. Она написана несколько менее удачно, чем вторая, однако и она содержит богатый теоретический и практический материал.

Основным недостатком теоретической части является некоторая вульгаризация процесса передачи энергии электромагнитной индукцией в садку печи. Авторы трактуют нагрев садки вихревыми токами по принципу воздушного трансформатора. Это в известных случаях допустимо, в других просто вредно (когда глубина проникновения становится соизмеримой с диаметром садки). Для большинства плавильных печей это допустимо, однако следует всегда иметь в виду ограниченность такой теории. Поэтому надо указать границы ее применимости. На стр. 105 утверждается, что модуль плотности тока (в оригинале «плотность тока») при достаточно большой частоте убывает в цилиндрическом проводнике по логарифмическому закону (в действительности — по экспоненциальному).

Термин «глубина проникновения тока» уже введен и установлен. Авторы говорят о глубине «проникания» магнитного потока, причем они идентифицируют численную величину того и другого; однако, глубина проникновения магнитного потока отличается от глубины проникновения тока постоянным множителем. Авторам следовало бы предпослать всем теоретическим рассуждениям большую главу, посвященную электромагнитным волнам в металлической среде. Тогда устранились бы все недоразумения с терминологией, точно определены бы понятия глубины проникновения и выявилось влияние частоты шихты на поглощаемую садкой мощность.

На стр. 296 авторы пытаются выявить влияние неравномерности распределения аксиальной составляющей магнитного поля по высоте садки на генерацию тепла в ней. При этом они не учитывают, что тангенциальная составляющая магнитного поля убывает только в меру возмущения нормальной. Нормальная составляющая порождает вихревые токи, которые также разогревают садку. В этом авторы совершенно не упоминают.

При изложении вопросов, связанных с искровыми генераторами, следовало бы остановиться на двух основных схемах, которые значительно экономичнее одноконтурных. Необходимо было бы также упомянуть и о конденсаторных разрядниках со многими искровыми промежутками. Мало места уделено ламповым генераторам. В этом тексте появились неизбежные искажения физического процесса работы ламповых генераторов.

Весьма тщательно рассмотрены конструкции печей, а на доведенном материале.

Вакуумные печи стали промышленными агрегатами. Необходимо было показать. Почти все конструкции раздела (исключение составляет лишь печь И. Ф. Козлова) в значительной мере устарели. При расчете стоимости конденсаторов необходимо было бы исходить из современных типов. В области бумажномасляных и керамических конденсаторов произошли разительные изменения сторону уменьшения стоимости на 1 кВа и повышения удельной мощности в единице объема.

Весьма подробно освещены вопросы технологии соединения смесей для футеровок, набивки и сушки последних. Подробно рассмотрены вопросы технического оснащения литейных и вопросы технологии литья (например, непрерывное литье алюминиевых сплавов).

В книге дается ряд практических расчетов индукционных печей для плавки различных металлов. К сожалению, авторы не пользуются какой-либо определенной системой единиц. Некоторым предпочтением у них пользуется электромагнитная система, которая обычно не применяется в инженерной практике.

В приложениях дан большой и весьма полезный материал по физическим свойствам огнеупоров и расплавленных металлов.

Отмеченные выше отдельные недостатки не умаляют ценности данной книги, которая может быть использована лицами, работающими в области эксплуатации и проектирования индукционных печей.

Кандидат техн. наук. Г. В. ДЕРШВАРЦ



М. Г. ЛОЗИНСКИЙ. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА И ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ СТАЛИ. 460 стр., ц. 22 р. 70 к. Машгиз, 1949.

В последние годы вопросы поверхностной закалки и индукционного нагрева стали привлекают к себе большое внимание. Наиболее фундаментальными трудами в этом направлении, закрепляющими приоритет отечественной науки и технических усовершенствований, являются: книга П. Вологодина «Поверхностная индукционная закалка» (Машгиз, 1947 г.), книга Г. И. Бабата «Индукционный нагрев и его промышленное применение» (Госэнергоиздат, 1949 г.) и рецензируемая книга. Все указанные книги дополняют одна другую.

Рецензируемая книга разбита на восемь глав, в которых рассматривается весьма широкий круг вопросов, относящихся к областям металловедения, электротехники, технологии и конструирования и расчета разнообразных термических устройств для целей поверхностной закалки металлов.

Она предназначена для инженерно-технических работников машиностроительной и металлообрабатывающей промышленности и частично для студентов вузов. Эти соображения оправдывают целесообразность данного автором в первой главе книги обзорного изложения многих вопросов, обстоятельно разбираемых в курсах по металловедению, термической обработке, основам металлургии и механическим испытаниям металлов. Не вполне уместно рассмотрение в этой главе сложных электротехнических вопросов, например схемы автоматического фотопирометра или вопросов, связанных с электропроводностью и магнитными свойствами металлов, которые в изложенном виде в книге не используются.

Во второй главе описываются способы концентрированного нагрева для целей поверхностной закалки кроме индукционного способа, которому посвящена вся дальнейшая часть книги. Автор удачно изложил и богато иллюстрировал применение газового пламени, контактный электронагрев и нагрев в электролите.

В третьей главе приведены элементы общей теории электромагнитного поля в металлах, изложенной в трудах проф. В. К. Аркадьева, и рассматриваются со стороны неточностей элементы теории индукционного нагрева. Изложение этой главы ведется без достаточной ясности, рассматриваемых явлений и в форме, крайне затрудняющей для работников машиностроительной и металлообрабатывающей промышленности и даже упрощенной для электриков. Особенно излишним принятием профиле книги представляется включение графика о моделировании настила вихревых токов.

Другие замечания к третьей главе: однозначны формулы (14) и (15); искусственна формула (16), пользование которой может привести к погрешностям до 300% и не из-за неучета $\mu = \varphi(H)$, а также формул (25), (26) и других, пользование которыми также может привести к дезориентации работников промышленности. Основана ссылка к формулам (46) и (47) на книгу Г. Бабата, так как эта книга не является первоисточником и формулы приведены в ней с дополнительными поправками, что может вызвать недоумение у читателя. Беспредметно сравнение формулы (51) из книги П. Вологодина и предложенной автором рецензируемой

книги формулы (52), так как та и другая не дают однозначного решения и могут оказаться обе пригодны или обе непригодны для практических расчетов не только при поверхностной закалке, но и при сквозном индукционном нагреве при выборе частоты тока из условия $\eta_p \neq \varphi(f)$. Формулы (55), (56) и (57) для определения «оптимальной частоты тока» не отвечают их наименованию, так как получаемый по ним результат оказывается весьма завышенным и опровергается многими опытными данными.

В четвертой главе рассмотрены вопросы, относящиеся не только к проектированию и изготовлению индукторов, но и вопросы, относящиеся к самой технологии поверхностной закалки. Имеющиеся в данной главе элементы расчетов по определению таких величин, как $\cos \varphi$ индуктора, активных и реактивных мощностей и т. п., к сожалению, не систематизированы и не смогут быть использованы при конкретном решении задач. Основанием последнему заключению служит хотя бы утверждение автора (стр. 166): «Подбор оптимального числа витков индуктора обычно производится экспериментальным путем», тогда как в действительности расчет числа витков индуктора в значительной степени определяет расчет всех прочих элементов схемы высокочастотной установки.

Не вполне отвечают действительным условиям эксплуатации высокочастотных установок графики рис. 154, по которым значения емкости определяются в зависимости от ρ и μ нагреваемого металла, тогда как при индукционном нагреве изменение L происходит весьма незначительно, а следовательно, в процессе нагрева C практически остается постоянной.

Нельзя согласиться с рекомендацией автора выбирать толщину листа для магнитопроводов из соотношения

$$\Delta_{\max} < \approx \rho \sqrt{f} \text{ мм,}$$

из которого можно получить, что при частоте токов 50 гц толщина листов может быть взята около 3 мм вместо 0,35 мм.

Помещение в книгу стандартов на медные трубы, прутки, проволоку и листы мы также считаем излишним; было бы вполне достаточным сделать на них ссылки.

В пятой главе сосредоточены сведения о генераторах повышенной и высокой частоты. Автор, объективно излагая преимущества и недостатки каждого типа генераторов, по существу полностью отказывается от своих ранних и безусловно ошибочных утверждений о преимуществах ламповых генераторов во всем диапазоне применяемых частот (ВЭП, 1937—1938). Рассматриваются все типы возможных к применению преобразователей частоты тока, отличной от 50 гц, с основной входящей в их схемы аппаратурой и электрооборудованием.

Рассматриваемая глава по существу изложенного в ней доступна может быть только электрикам, но для них, изложение многих вопросов оказывается элементарным и требует значительных дополнений. Например, вопросы, касаю-

щиеся действительных режимов работы высокочастотных преобразователей частоты, не рассмотрены вовсе, а они имеют исключительно большое значение в деле промышленного освоения высокочастотных электротермических устройств.

§ 1 пятой главы, посвященный колебательным контурам, не может быть непосредственно использован для анализа или расчета режима работы высокочастотных электротермических устройств, так как в нем не введены в рассмотрение такие понятия, как коэффициент анодной связи в схемах с ламповыми генераторами или коэффициент автотрансформации в схемах с машинными или полупроводниковыми преобразователями. Нет понятия о вносимом активном сопротивлении и т. п.

Частные замечания к данной главе: В схеме рис. 248, а «стопорный дроссель 2» обычно включается с первичной стороны трансформатора и служит не как стопорный для высокой частоты, а как ограничивающий токи к. з. при пробое разрядника. Неверны размерности единиц в формуле (27) и в числовом примере к ней. Схемы рис. 256 без необходимости дублируют схемы рис. 258. Ошибочна ссылка на фиг. 153 вместо фиг. 154 (стр. 271). В табл. 33 нет данных о керамических конденсаторах 100 мкмкф производства завода «Пролетарий». Ошибочна ссылка на фиг. 146 вместо фиг. 145 (стр. 333).

Шестая глава посвящена станкам и приспособлениям для поверхностной закалки. Эта группа вопросов, менее других освещенная в литературе, является весьма уместной в данной книге.

Седьмая глава «Практика поверхностной закалки при высокочастотном нагреве» дополняет разнообразными сведениями главы II, III и др. и без ущерба для книги могла бы не быть самостоятельной.

Восьмая глава является заключательной и содержит некоторые сведения о применении индукционного на-

грева стали под другие виды пластической или термической обработки металлов, отличных от поверхностной закалки. В начале главы кратко рассмотрены установившиеся методы нагрева полых изделий с размещением внутри них специальных магнитопроводов. Несмотря на сравнительно широкое распространение этих устройств в промышленности, их как наиболее эффективных и относительно дешевых, безусловно, желательно.

Несколько подробнее в этой главе рассматриваются вопросы индукционного нагрева металлов непосредственно в электромагнитном поле для целей горячей штамповки.

Описанный опыт применения индукционного нагрева заготовок при пластической обработке металлов, несомненно, окажется использованным в нашей промышленности.

Отдельные замечания к восьмой главе: Указанные на стр. 415—416 значения $I_{\max}$ по фиг. 404 и формулам (21) и (22), всего в 6 раз увеличенные по сравнению с теми, что по формулам (21) и (23), не имеют практического смысла, так как при учете всей совокупности условий нагрева заготовок с внутренним источником тепла применительно к сквозному нагреву при ковке глубина проникновения тепла не оказывает столь существенного значения. Ссылка на стр. 416 о применимости частоты 50 гц для нагрева заготовок диаметром 150—200 мм является неточной и противоречит формуле (21) и фиг. 404.

Несмотря на отмеченные ошибки и неточности, труд безусловно привлечет большой интерес читателей различных специальностей и существенно поможет еще более широко внедрению индукционного нагрева в промышленность.

Кандидат техн. наук, доц. А. В. ДОНСКОЙ

Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике (Издания 1949 г.)

АЛЬПЕРТ Я. Л. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН. Специализированный библиографический справочник. 194 стр., ц. 15 руб. Изд-во Академии наук СССР.

АНФИМОВ М. А. СОСТАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ (Справочное руководство). 217 стр. 1-я вкладка, ц. 12 руб. Оборонгиз.

АРУТЮНОВ В. О. РАСЧЕТ И КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ. Допущено в качестве учебника для электротехнических техникумов. 324 стр., ц. 19 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

В книге рассматриваются вопросы теории и расчета электроизмерительных приборов и приводятся основные конструкции приборов и их узлов. Содержание книги разбито на 13 глав: общие свойства электроизмерительных приборов; погрешности электроизмерительных приборов; конструкции и расчет общих элементов электроизмерительных приборов; общая методика расчета электроизмерительных приборов; магнитоэлектрические приборы; магнитоэлектрические приборы с преобразователями; электродинамические приборы; электромагнитные приборы; индукционные приборы; электростатические приборы; логометры; самопишущие приборы; приборы для измерения сопротивления. В конце книги дан ряд приложений.

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается опубликование рецензий.

БАЛАКИРЕВ В. Ф. АВТОМАТИЗАЦИЯ ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ. 184 стр., ц. 10 руб. Госэнергоиздат.

БРЕСЛЕР С. Е. РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ. «Современные проблемы физики» под общей редакцией С. И. Виноградова, А. Ф. Иоффе, П. Н. Лукинского, В. А. Фока и И. И. Келдыша. 308 стр. + вкладка, ц. 11 руб. 40 коп. Гостехиздат.

* **БРЮХЕ, РЕКАНАЛЬ.** ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ. Вод под редакцией Н. А. Никитина. 584 стр., ц. 20 руб.

ВАВИЛОВ С. И. О. «ТЕПЛОМ» И «ХОЛОДОМ» СВЕТОЛЮЧЕНИЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ. (Академия наук СССР. Научно-популярная серия). 79 стр., ц. 2 руб. Изд-во Академии наук СССР.

ДЕВЯТКИН К. А. ПАМЯТКА АВТОЭЛЕКТРИКУ. (Министерство автомобильного транспорта РСФСР. Управление учебными заведениями «Трансэнергокадры»), 68 стр. + вкладка, ц. 3 руб. 50 коп. Изд-во МХ РСФСР.

ЕГОРОВ К. В. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ. Часть I. (Московский технический институт им. Молотова). 80 стр., бесплатно. Изд. МТИ.

ЕНОУТИН В. В. ШЕСТНАДЦАТЬ РАДИОЛЮБИТЕЛЕЙ (СХЕМ с питанием от осветительных сетей). (Массовая радиодлянка под общей редакцией А. И. Берга. Выпуск 44). 80 стр. + вкладка, ц. 2 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

ИНСТРУКЦИЯ ПО СУЩЕСТИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ (Министерство электростанций СССР. Технический отдел). 24 стр., ц. 1 руб. Госэнергоиздат.

ПОПРАВКА

В статье Е. Я. Казэвского «Переходные процессы при включении напряжения с изменяющейся частотой», опубликованной в № 11 за 1949 г., формула (4) должна иметь вид:

$$K_n = \sqrt{\frac{\pi}{2a}} \epsilon^{P_n t} \epsilon^{-j\gamma_{n0}} \int_{\gamma_{n0}}^{\gamma_n} j^{\frac{\pi}{2}} \gamma_n^2 d\gamma_n.$$

В статье Н. А. Сазонова «Переходные явления при пуске короткозамкнутых электродвигателей», опубликованной в № 12 за 1949 г., формула (23) должна иметь вид:

$$\frac{S_k}{S_n} = \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{1}{a^2}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{a^2}}}.$$