



4

1970

• ЭНЕРГИЯ •

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА
СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ, ЦП НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА
ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

К 100-летию со дня рождения В. И. Ленина

УДК 621.31+621.312(048)

Состояние и перспективы развития электроэнергетики и электропромышленности

Доктор техн. наук, проф. Г. В. АЛЕКСЕНКО
Москва

В ноябре 1917 г. через несколько дней после победы Великой Октябрьской социалистической революции В. И. Ленин выдвинул задачу сооружения мощных электростанций, а несколькими месяцами позже, в апреле 1918 г., он предложил разработать план экономического подъема России на базе электрификации. Только в 1920 г. удалось осуществить эту идею Ленина. План ГОЭЛРО являлся первым единым народнохозяйственным планом страны Советов, намечавшим создание материально-технической базы социалистического общества.

В докладе о деятельности Совета Народных Комиссаров 22 декабря 1920 г. на VIII Всероссийском съезде Советов В. И. Ленин говорил: «...нельзя работать, не имея плана, рассчитанного на длительный период и на серьезный успех»¹.

В. И. Ленин научно обосновал роль электрификации в восстановлении и развитии народного хозяйства и создании социалистического государства с мощной экономикой и промышленностью.

Развитие энергетики и электрификации стало генеральным направлением наших народнохозяйственных планов. Именно электрификация явилась тем мощным рычагом, который позволил нам в исторически короткие сроки преодолеть вековую отсталость России, превратить нашу страну в высоко развитое индустриальное государство, в страну передовой науки, техники и культуры. Неуклонно осуществляя ленинский курс на электрификацию, наша страна с одного из последних мест, которое

она занимала в начале двадцатых годов по выработке электроэнергии, выдвинулась в середине тридцатых годов (1935 г.) на второе место в Европе, а уже в конце сороковых годов (1947 г.) — на первое место в Европе и второе в мире. Сейчас Советский Союз производит электроэнергии больше, чем Англия, Франция, ФРГ и Италия вместе взятые.

Выработка электроэнергии в 1969 г. составила около 690 млрд. кВт·ч, что более чем в 345 раз превышает выработку в 1913 г. Установленная мощность электростанций Советского Союза на 1 января 1970 г. равна 154 млн. кВт. Диаграммы роста установленной мощности электростанций и выработки электроэнергии с 1913 по 1969 г. приведены на рис. 1.

В настоящее время 83%¹ электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях, немногим более 16% — на гидростанциях и менее 1% — атомными электростанциями. План 1970 г. составляет по выработке электроэнергии 740 млрд. кВт·ч, по вводу мощностей — 12 млн. кВт, т. е. ежегодный прирост мощности больше мощности всех электростанций, имевшихся в стране перед началом Великой Отечественной войны (1940 г. — 11,1 млн. кВт) или равен семи планам ГОЭЛРО.

Советский Союз, с территорией 22,4 млн. км² и с населением более 240 млн. чел., по ряду важнейших показателей энергетического строительства занимает передовые позиции в мире.

Сооружены крупнейшие тепловые электростанции — Приднепровская, Конаковская, Криворожская, Змиевская, Бурштынская ГРЭС мощностью

¹ В. И. Ленин, Собр. соч., т. 31, изд. IV, стр. 479.



Рис. 1.

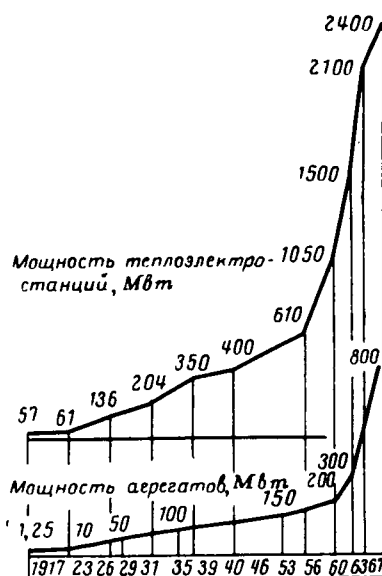


Рис. 2.

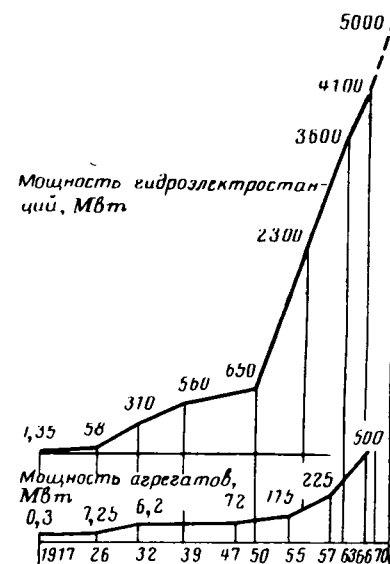


Рис. 3.

2400 Мвт каждая, Старо-Бешевская — 2300 Мвт, Луганская ГРЭС — 2100 Мвт и др.

Построены уникальные гидроэлектростанции: Днепровская ГЭС им. В. И. Ленина — 650 Мвт², Воткинская ГЭС — 1000 Мвт; Иркутская ГЭС — 660 Мвт; Волжская ГЭС им. В. И. Ленина — 2300 Мвт; Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС — 2530 Мвт; Братская ГЭС им. 50-летия Великого Октября — 4100 Мвт и многие другие.

Братская ГЭС в 1968 г. перекрыла годовую проектную выработку 22 млрд. кВт·ч и произвела 25 млрд. кВт·ч самой дешевой в мире электроэнергии. На гиганте энергетики Красноярской ГЭС устанавливаются агрегаты, каждый из которых по мощности почти равен мощности Днепровской ГЭС им. В. И. Ленина.

В 1969 г. закончено объединение всех энергосистем европейской части СССР, включая Урал, в Единую энергосистему европейской части СССР мощностью свыше 90 млн. кВт.

ЕЭС европейской части Союза — самая крупная система мира, которая объединяет работу свыше 550 электростанций. В нее входят семь объединенных энергетических систем: ОЭС Центра; ОЭС Северо-запада; ОЭС Среднего Поволжья; ОЭС Северного Кавказа; ОЭС Урала; ОЭС Юга; ОЭС Закавказья.

Кроме того, созданы: ОЭС Центральной Сибири, Средней Азии и Северного Казахстана суммарной мощностью около 30 млн. кВт. Изолированные энергосистемы, энергоузлы и децентрализованные районы имеют мощность 27,6 млн. кВт. Продолжается дальнейший рост централизации производства электроэнергии в стране, что видно из следующих значений:

1928 г.	1940 г.	1958 г.	1965 г.	1970 г.
39 %	81,2 %	85,5 %	92,8 %	95—96 %

Можно полагать, что к концу 1975 г. уровень централизации электроснабжения будет доведен до 97—98 %, а к 1980 г. — до 99 %.

² Мощность Днепровской ГЭС до Великой Отечественной войны была 560 Мвт и 650 Мвт после ее восстановления.

В недалеком будущем в пределах 10—15 лет все объединенные и изолированные электрические системы образуют Единую энергетическую систему Советского Союза — ЕЭС СССР.

Энергетические системы СССР связаны с девятью странами мира, в том числе с шестью странами — членами СЭВ: Народной Республикой Болгарии; Венгерской Народной Республикой; Германской Демократической Республикой; Польской Народной Республикой; Социалистической Республикой Румынии и Чехословацкой Социалистической Республикой. Центральное диспетчерское управление энергосистемами «Мир» находится в Праге.

ГЭС XI Карелэнерго имеет связь на напряжении 110 кВ с энергосистемой Финляндии, Борисоглебская ГЭС Кольской системы на напряжении 110 кВ с энергосистемой Норвегии, а подстанция 220 кВ на Юго-западе Азербайджана связана с энергосистемой Ирана.

Рост единичной мощности тепловых электростанций и турбоагрегатов дан на рис. 2.

Как видно из диаграммы, в 1913 г. самой мощной тепловой электростанцией была станция 57 тыс. кВт с агрегатами по 1250 и 5000 кВт. В 1931 г. были введены турбогенераторы 50 тыс. кВт завода «Электросила», в 1939 г. — 100 тыс. кВт, в 1953 г. на Черепети были установлены генераторы 150 Мвт. В 1960 г. — 200 Мвт на Урале, в 1963 г. — 300 Мвт, а в 1967 г. 500 Мвт одновальный блок на Назаровской ГРЭС и 800 Мвт двухвальный блок (500 и 300 Мвт) на Славянской ГРЭС.

Рост единичной мощности гидроэлектростанций и гидрогенераторов дан на рис. 3.

В дореволюционной России самая большая гидроэлектростанция имела мощность 1350 кВт (в Туркмении на р. Мургаб Гиндукушская ГЭС с агрегатами по 300 кВт). По плану ГОЭЛРО начали сооружаться первые советские гидроэлектростанции: Волховская ГЭС (1919 г.); Земо-Авчалская (1923 г.); Нижне-Свирская, Днепровская, Рионская (1927 г.) и др.

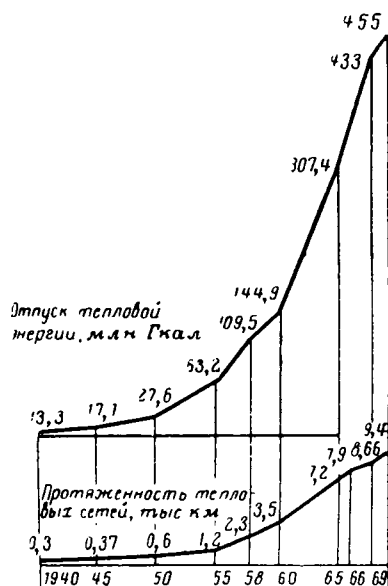


Рис. 4.

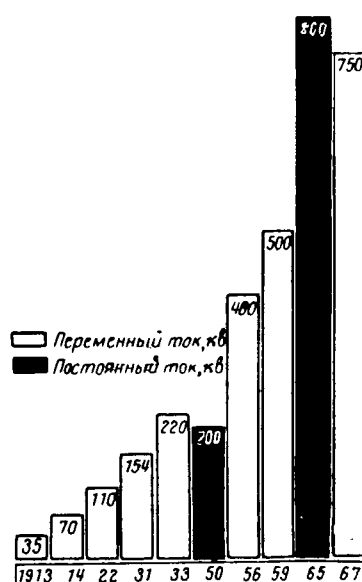


Рис. 5.

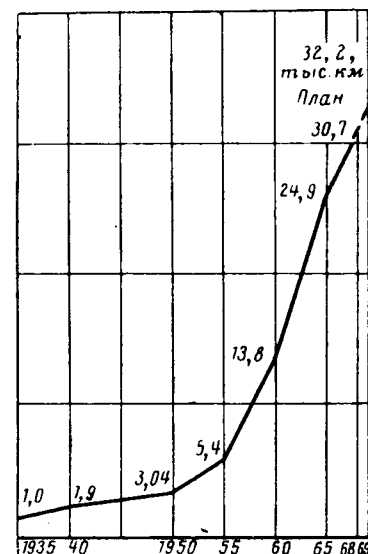


Рис. 6.

10 октября 1932 г. состоялось торжественное открытие самой мощной в Европе Днепровской гидроэлектростанции, построенной за 5 лет. Агрегаты Днепротэса мощностью по 62 Мвт в те годы были крупнейшими в мире.

В 1970 г. к 100-летию со дня рождения В. И. Ленина на Красноярской ГЭС будет установлено десять агрегатов по 500 Мвт, т. е. установленная мощность составит 5 млн. квт.

Остановимся на развитии теплофикации, которая является важным элементом структуры энергетического баланса.

Рост отпуска тепловой энергии районными ТЭЦ и протяженности магистральных тепловых сетей приведен на рис. 4.

Началом теплофикации в Советском Союзе следует считать 1924 год, когда в Ленинграде от ЛенГРЭС № 3 был проложен первый теплопровод к Обуховской больнице, а в Москве в 1928 г. — теплопровод от экспериментальной ТЭЦ ВТИ к заводам «Динамо» и «Парострой». Особое значение теплофикации состоит в том, что приведенный к. п. д. ТЭЦ составляет для турбин большой мощности 65—67% и выше, в то время как для ГРЭС — 30—34%, и только на современных установках достигает 38—39%, т. е. использование топлива на ТЭЦ почти в 2 раза выше, чем на конденсационных электростанциях.

С 1928 г. СССР по развитию теплофикации занимает первое место в мире. Мощность теплофикационных турбин в настоящее время составляет около 40 млн. квт или 35% от всех мощностей тепловых электростанций.

На ТЭЦ в настоящее время вырабатывается более 40% от общей выработки электроэнергии тепловыми электростанциями.

В 1968 г. все теплоэлектроцентрали (в том числе и районные) отпустили потребителям около 600 млн. Гкал тепла, что составляет более трети всего тепла, потребляемого в стране в виде пара и горячей воды. При этом была достигнута эконо-

мия условного топлива около 20 млн. т. Протяженность магистральных тепловых сетей в стране более 9 тыс. км. В эксплуатации находятся теплофикационные турбины мощностью 100 Мвт. В 1970 г. будет смонтирована и пущена уникальная турбина мощностью 250 Мвт на ТЭЦ-22 Мосэнерго.

Развитие теплофикации в Союзе стало возможно только благодаря социалистической форме управления народным хозяйством, когда вся энергетика находится в руках государства.

График роста напряжения линий электропередачи дан на рис. 5. Наивысшим напряжением до 1917 г. было напряжение 35 кв. Недолго существовало напряжение 70 кв (с 1914 до 1923 г.). В 1922 г. была построена на деревянных опорах первая линия электропередачи Кашира—Москва протяженностью 120 км с напряжением 110 кв. Это положило начало строительству дальних высоковольтных воздушных линий (ВЛ) в нашей стране.

В 1931 г. вступила в строй ВЛ 154 кв от Днепротэса, а в 1933 г. первая ВЛ 220 кв Свирская ГЭС—Ленинград длиной 240 км, далее в 1956 г. ВЛ 400 кв Куйбышев—Москва протяженностью около 1000 км, в 1959 г. эта линия передачи была переведена на 500 кв.

В настоящее время протяженность линий передачи на 500 кв превышает 10 тыс. км. В 1967 г. была включена под напряжение опытная ВЛ 750 кв Конаково—Москва протяженностью 90 км. Эта линия передачи уже работает более 2 лет и почти не происходило отказов в работе. Из линий передач на переменном токе следует отметить еще линии 330 кв, которые начали применяться у нас в стране после 1960 г. В 1960 г. были сооружены первые 1030 км этих линий главным образом в Прибалтике. Дело в том, что для расстояний 300—400 км напряжение 500 кв неэкономично, а сооружение линий 220 кв не обеспечивает необходимой пропускной способности. Применение напряжения 330 кв увеличило пропускную способность примерно в 2,3 раза по сравнению с ВЛ 220 кв.

В 1950 г. впервые в инженерной практике в Советском Союзе была сооружена и введена в работу опытная кабельная линия электропередачи постоянного тока Кашира — Москва с напряжением 200 *кв* (± 100 *кв*), длиной 112 *км* и пропускной способностью 30 *Мвт*. В 1965 г. включена межсистемная электропередача постоянного тока 800 *кв* (± 400 *кв*) длиной 475 *км* Волгоград — Донбасс проектной мощностью 750 *Мвт*.

За десять лет 1961—1970 гг. протяженность электрических сетей в Союзе напряжением 35 *кв* и выше возрастает в 2,5 раза и достигнет 467 тыс. *км*. Ежегодно вводится 25—30 тыс. *км* ВЛ 35 *кв* и выше.

Протяженность распределительных электрических сетей 0,4—10 *кв* в настоящее время составляет 3,2 млн. *км*. Ежегодный ввод этих сетей составляет 200 тыс. *км*.

Технический уровень электроэнергетического хозяйства нашей страны во многом выше, чем в других странах мира. Широко применяются различные устройства автоматики — автоматическое повторное включение (АПВ), автоматическая разгрузка потребителей при снижении частоты (АЧР), автоматическое включение резервного оборудования (АВР). Устойчивость и надежность работы энергосистем зависит в значительной мере от применения таких эффективных средств как регуляторы возбуждения сильного действия генераторов и синхронных компенсаторов, а также устройства противоаварийной и режимной автоматики.

В энергосистемах широко применяются также и средства телеуправления.

Электровооруженность труда в промышленности, т. е. потребление электроэнергии в среднем на одного рабочего за год, увеличилось за годы советской власти более чем в 45 раз, это дало возможность увеличить валовую продукцию промышленности почти в 80 раз.

Рост энергетических мощностей существенно изменил техническую вооруженность всех отраслей народного хозяйства. Особенно это заметно на примере электрификации железных дорог. На рис. 6 дана кривая роста протяженности электрифицированных железных дорог в тыс. *км*. Советский Союз занимает первое место в мире по протяженности электрифицированных железнодорожных линий (более 32 тыс. *км*). Их длина превышает суммарную длину электрифицированных железных дорог США, Франции, ФРГ, Англии и Японии вместе взятых. Первые электрифицированные участки в СССР были построены: в 1926 г. — Баку — Сабунчи — Сураханы; в 1929 г. Москва — Мытищи Северной железной дороги и в 1932 г. Хашури — Зестафони (Сурамский перевал).

В настоящее время в нашей стране имеются крупнейшие в мире электрифицированные железнодорожные магистрали: Москва — Байкал (5 500 *км*); Ленинград — Москва — Харьков — Тбилиси — Ленинакан протяженностью 3 500 *км* и др.

Проанализируем дальнейшее развитие энергетики на 1975 и 1980 гг. Считая, что и впредь электроэнергетика сохранит опережающие темпы развития по отношению к темпам роста народного хозяйства и будет развиваться ежегодно на 8,5—

9,0%, и принимая число часов использования оборудования в году равным 4 800—4 900, можно с достаточной степенью точности полагать, что эти цифры составят:

	1975 г.	1980 г.
Выработка электроэнергии, млрд. <i>квт·ч</i>	1 050—1 100	1 600—1 700
Установленная мощность на 31 декабря года, млн. <i>квт</i>	215—225	330—350
Ежегодный прирост мощности, млн. <i>квт</i>	15—16	20—25

За десять лет с 1970 по 1980 гг. выработка электроэнергии увеличится в 2,2—2,3 раза. До 1980 г. энергетика будет развиваться главным образом за счет строительства мощных тепловых и гидравлических электростанций, а также дальнейшего внедрения атомных электростанций. Большая часть электроэнергии до 80—83% будет вырабатываться на тепловых и атомных электростанциях, использующих органическое топливо (уголь, природный и попутный газ, торф) и ядерное горючее. Ниже кратко рассматриваются основные технические направления развития энергетики.

Теплоэнергетика. Основное направление технического прогресса — дальнейшее повышение мощностей оборудования, замена устаревших и морально изношенных машин и электростанций на более совершенные. Будет осуществляться также дальнейшая централизация электроснабжения и концентрация мощностей на районных тепловых электростанциях мощностью 2,4; 3,2; 4,0; 6,0 млн. *квт* и выше с установкой энергоблоков (котел — турбина — генератор — трансформатор) 300, 500, 800 и 1 200 *Мвт* на сверхкритические параметры пара 240 *ата*, 565/565°С. Мощные турбины (800, 1 200 *Мвт*) будут главным образом одновальные.

К середине 1969 г. в Советском Союзе работало около 180 блоков 150, 200 и 300 *Мвт* суммарной мощностью 36,7 млн. *квт*, которые вырабатывают 37% всей электроэнергии, получаемой на тепловых электростанциях. Из общего числа блоков 38 составляют крупные блоки мощностью по 300 *Мвт*.

Дальнейшее развитие получают ТЭЦ, т. е. тепловые станции с комбинированной выработкой электроэнергии и тепла. Широко будут использоваться мощные теплофикационные турбины 100 и 250 *Мвт* на высокие параметры пара. Надо полагать, что технический прогресс в этой области будет развиваться за счет увеличения радиуса действия передачи тепла при повышении скоростей теплоносителя. На этой основе достигается концентрация мощностей ТЭЦ и их основного оборудования при широком использовании специальных пиковых котлов.

Также будет продолжено сооружение ТЭЦ средней и малой мощности (25 и 12 *Мвт*) с турбинами с противодавлением.

Атомная энергетика. За сравнительно короткие сроки атомная энергетика в СССР достигла определенных успехов. Как известно, 27 июня 1954 г. под Москвой была пущена первая в мировой практике АЭС мощностью 5 000 *квт*. В апреле 1964 г. начал давать промышленный ток первый блок Белоярской АЭС мощностью 100 тыс. *квт* (90 *ата*, 500°С), а в сентябре того же года первый блок

Нововоронежской станции мощностью 210 тыс. кВт. Второй блок этой станции имеет мощность 365 тыс. кВт. Установленная мощность АЭС в Союзе составляет более миллиона киловатт.

Суммарная мощность АЭС во всем мире в настоящее время составляет около 20 млн. кВт*.

Ускорение развития АЭС является показателем технического прогресса в энергетике. Рост единичной мощности реакторов, переход от реакторов, работающих на тепловых нейтронах к использованию реакторов на быстрых нейтронах, существенно улучшает экономические показатели атомной энергетики. В планах намечается развитие и наращивание мощности АЭС, строительство которых будет производиться в первую очередь в тех районах, где испытывается дефицит обычных топливных ресурсов.

Расширение области применения атомной энергетики будет определяться прежде всего ее экономикой.

Использование ядерной энергии для опреснения воды открывает перспективы такого снижения стоимости опреснения воды, которое позволит использовать опресненную воду не только для водоснабжения, но и для орошения ценных сельскохозяйственных культур.

Поэтому ядерно-энергетические опреснительные установки будут применяться главным образом на станциях с опреснительными блоками производительностью в сотни тысяч и даже в миллионы кубических метров пресной воды в сутки. Такие установки будут применяться только для водоснабжения крупных промышленных центров с развитой промышленностью и большим населением. Например, в СССР в одном из крупных промышленных центров (г. Шевченко на полуострове Мангышлак) заканчивается строительство первой ядерно-энергетической опреснительной установки производительностью 120 тыс. м³/сутки. Эти установки могут быть построены как трехцелевые, т. е. как установки, вырабатывающие одновременно три вида продукции: электрическую энергию, тепло и пресную воду.

На ближайшие годы основными техническими направлениями в развитии атомной энергетики являются:

строительство двухконтурных АЭС с водоохлаждающими реакторами мощностью 440 и 1000 Мвт с турбинами насыщенного пара; первая из этих станций возможно будет построена в ближайшие годы;

строительство мощных одноконтурных АЭС с водоохлаждающими реакторами мощностью 1 млн. кВт с турбинами насыщенного пара;

строительство опытно-промышленных АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.

Сейчас трудно сказать, какой процент выработки электроэнергии будут давать АЭС в 1975 и 1980 гг.—одно совершенно очевидно: атомная энергетика в рассматриваемый период получит большое развитие и наша страна перейдет от опытных реакторов различных типов к широкому строи-

тельству атомных электростанций и в первую очередь для районов с дорогим привозным топливом.

Перспектива овладения управляемым термоядерным процессом обещает практически неисчерпаемые источники энергии.

Гидроэнергетика. Основными техническими направлениями в развитии гидроэнергетики являются: строительство мощных высоконапорных ГЭС с использованием наиболее эффективных гидроэнергоресурсов восточных районов страны;

строительство комплексных гидроузлов, решающих одновременно задачи развития энергетики, ирригации, водного транспорта, водоснабжения, рыбного хозяйства и других отраслей;

строительство в европейской части СССР пиковых, а также гидроаккумулирующих электростанций и установки дополнительных турбин на действующих ГЭС.

Новые источники электрической энергии. Сюда следует отнести газотурбинные установки (ГТУ), преобразование тепловой энергии в электрическую с помощью МГД-генераторов, парогазовые установки (ПГУ), использование геотермальных вод, использование энергии приливов и отливов в морях и океанах, топливные элементы, использование энергии солнца, ветра и другие направления. Рассмотрим некоторые из них.

а. Газотурбинные установки (ГТУ). Мы располагаем опытными образцами ГТУ мощностью 12,5, 25 и 50 Мвт, установленными в Харькове и Ленинграде. Вводится в эксплуатацию установка мощностью 100 Мвт на Краснодарской ТЭЦ.

ГТУ найдут применение как весьма мобильные установки для покрытия пиков нагрузок в электрических системах, а также для электроснабжения новых районов, где осваивается добыча газа и нефти. Задачами в техническом развитии ГТУ являются:

окончание опытных работ и выбор типа ГТУ для серийного производства;

разработка упрощенных, безрегенераторных ГТУ для использования в удаленных вновь осваиваемых районах;

разработка ГТУ с авиационными и судовыми газовыми турбинами для использования их в качестве пиковых и резервных агрегатов крупных электростанций и блокстанций;

повышение ресурса и надежности ГТУ при работе как в базовом режиме, так и при кратковременной нагрузке.

б. Преобразование тепла в электроэнергию с помощью магнетогидродинамических генераторов (МГД-генератор). В этом направлении в нашей стране в течение ряда лет проводятся исследования научными учреждениями, проектно-конструкторскими организациями и заводами.

Главным институтом по этой проблеме является Институт высоких температур Академии наук СССР (НИИВТ). Этим Институтом совместно с МЭИ СССР более 5 лет назад создана экспериментальная установка с МГД-генератором (У-02) мощностью 200 кВт, где отрабатываются и проверяются отдельные элементы схемы. В настоящее время НИИВТ сооружается под Москвой опытно-

* New Scientist, т. 42, № 646, 1969.

промышленная электростанция с МГД-генератором мощностью 25 000 кВт (установка У-25).

Пуск и эксплуатация опытно-промышленной электростанции с МГД-генератором установки У-25 даст возможность перейти к сооружению мощных промышленных установок с МГД-генераторами мощностью порядка 500 Мвт и коэффициентом полезного действия около 60—65%¹ и более.

МГД-генераторы особо экономичны как высокотемпературная надстройка к обычной паротурбинной установке, а также в сочетании с атомными электростанциями.

в. Парогазовые установки (ПГУ). Одним из направлений повышения экономичности тепловых электростанций является внедрение парогазовых схем. Перспективным может оказаться внедрение ПГУ по простейшей схеме со сбросом отработанных газов в топку паровых котлов.

Первая парогазовая установка с высоконапорным парогенератором по схеме Центрального котлотурбинного института (ЦКТИ) производительностью 120 т/ч, паровой турбиной мощностью 12 Мвт и газотурбинной установкой 4 Мвт в 1964 г. была пущена в опытную эксплуатацию на ГРЭС-1 Ленэнерго в качестве надстройки к существующей паровой турбине 30 Мвт.

В ближайшие годы будут проводиться дальнейшие исследования, разрабатываться новые схемы ПГУ, проверяться отдельные элементы схем с целью выявления лучших из них. В период до 1980 г. промышленного применения ПГУ в энергосистемах иметь не будут.

г. Использование геотермальных вод. В ряде районов Советского Союза централизованное теплоснабжение может быть осуществлено за счет использования подземной горячей воды (геотермальных вод) с температурой от 80 до 120—130°С. Источники с большим дебитом воды при ее высоких параметрах в СССР имеются на Камчатке, Курильских островах, в Дагестане и др.

В 1966 г. в опытную эксплуатацию на Камчатке был введен турбогенератор мощностью 2500 кВт — на Паужетской геотермальной электростанции, где проверяется возможность использования геотермальных вод для электроснабжения. Следует заметить, что геотермальные воды, как правило, содержат большое количество минеральных солей, поэтому рассчитывать на использование таких источников для получения электроэнергии в сколько-нибудь широких масштабах не приходится.

д. Использование энергии приливов и отливов. Ведется опытная эксплуатация построенной в конце 1967 г. Кислогубской приливной гидроэлектростанции в Баренцевом море небольшой мощности — 400 кВт. В ближайшее время в нашей стране приливные электростанции промышленного значения иметь не будут.

е. Использование энергии солнца и ветра. В большой энергетике эти виды энергии применения не найдут, они могут быть использованы для местных целей. Солнечную энергию в южных районах можно широко использовать для нагрева воды для нужд быта до температуры 50—60°С или для получения электричества с помощью полупроводни-

ковых элементов, что в сочетании с аккумуляторами и ветродвигателями может явиться достаточно надежной базой в небольших масштабах. Это может быть рентабельно для нужд сельского хозяйства в условиях отгонного животноводства, когда поблизости нет населенных пунктов.

Энергетические системы и линии электропередачи. Развитие электрических сетей, соединение электростанций на параллельную работу, создание электрических систем поставили перед энергетиками в новом свете ряд технических проблем: устойчивость параллельной работы, перенапряжения и защита от них, ограничение токов короткого замыкания и релейная защита, вопросы коммутации, регулирование режима энергосистем, управление электросетями и многие другие.

В связи с решением вопросов параллельной работы крупных гидро- и теплоэлектростанций предъявляются новые требования к работе агрегатов тепловых электростанций, а также выявляется важная роль объединения энергетических систем для наиболее эффективного использования мощности гидроэлектростанций и обеспечения более экономичных режимов работы тепловых электростанций.

Следует также учитывать, что в перспективе все больше и больше осложняется обеспечение топливом и энергией европейской части СССР и Урала. По данным академика Н. В. Мельникова³ на территории Советского Союза имеются большие запасы органического топлива, что выгодно отличает СССР от других стран мира. Так геологические запасы в нашей стране составляют в мировых запасах: по углю — свыше 55%; по торфу — 61%; по природному и попутному газу — свыше 30%; по нефти из общей мировой площади осадочных отложений в 32 млн. км² на долю СССР приходится 11,3 млн. км². Следовательно, Советский Союз является страной, наиболее обеспеченной запасами органического топлива. Однако 85%¹ наиболее экономичных топливо-энергетических ресурсов находятся в азиатской части Советского Союза, а основная часть потребителей электроэнергии — 80% в настоящее время сосредоточена в центральной части страны, на юге, западе и Урале. Это требует переборки на дальние расстояния больших потоков топлива и электроэнергии, что вызывает необходимость строительства линий электропередач очень высокого напряжения.

Будут продолжаться развитие Единой Европейской энергосистемы, объединенных энергосистем Северного Казахстана, Центральной Сибири и Средней Азии. По прогнозным проработкам проектных институтов Министерства энергетики и электрификации СССР мощность электрических станций ЕЭС европейской части к 1975 г. может возрасти до 160—170 млн. кВт, а к 1980 г. составит 230—250 млн. кВт.

Объединенная энергосистема страны должна строиться на базе мощных системообразующих энергетических связей постоянного и переменного тока сверхвысоких напряжений, для чего необхо-

³ Мельников Н. В., Минеральное топливо, изд-во «Недра», 1966.

димо в первую очередь решение проблем, связанных с созданием мощных передач постоянного тока напряжением 1500 кВ (± 750 кВ) и переменного тока напряжением 750—1200 кВ, а в дальнейшем передач постоянного тока 2000—2200 кВ (± 1000 —1100 кВ). Одна из первых уникальных ВЛ постоянного тока будет построена линия 1500 кВ Казахстан—Центр. Эта линия длиной 2414 км Экибастуз—Тамбов позволит передавать в центральную часть страны мощность порядка 6 млн. кВт и около 40 млрд. кВт·ч электроэнергии в год от тепловых электростанций, сооружаемых на базе использования дешевых углей Экибастузского угольного бассейна.

В рассматриваемый период до 1980 г. будут строиться также линии электропередачи переменного тока напряжением 750 кВ, в первую очередь, на юге европейской части СССР.

Также будут вестись проектные и опытные работы по строительству линии электропередачи переменного тока 1100—1200 кВ.

Создание мощных магистральных ВЛ постоянного и переменного тока потребует значительного расширения строительства новых линий электропередач 500, 330 и 220 кВ, а также распределительных ВЛ 110, 35 кВ и ниже.

Электробаланс народного хозяйства на 1970—1980 гг. в сравнении с 1913, 1940 и 1965 гг. приближенно представлен в таблице.

Годы	Произведено электроэнергии, %	Потреблено электроэнергии			
		промышленностью	транспортом	сельским хозяйством, коммунально-бытовыми и другими отраслями	Потери в сетях общего пользования
1913	100	77,3	0,8	18,5	3,4
1940	100	72,1	5,3	15,6	7,00
1965	100	69,0	7,35	16,7	6,95
1970	100	68,8	7,55	17,4	6,25

Наряду с абсолютным ростом потребления электроэнергии промышленностью и транспортом особенно быстрыми темпами будет увеличиваться электрификация сельского хозяйства и коммунально-бытовых предприятий.

Потребление электроэнергии на нужды сельского хозяйства в связи с переводом питания от энергетических систем в последние годы значительно возросло и если в 1968 г. потребление составляло 30 млрд. кВт·ч, то в 1970 г. оно превысит 60 млрд. кВт·ч. Электрификация сельского хозяйства в период 1970—1980 гг. явится одним из важнейших средств проведения комплексной механизации и широкой автоматизации сельскохозяйственного производства и улучшения культурно-бытовых условий сельского населения. Повышение технического уровня сельскохозяйственного производства предполагает широкую электрификацию технологических процессов, особенно в животноводстве и при первичной обработке продукции на стационарных установках. Однако в сельскохозяйственных технологических процессах электроэнергия используется пока еще недостаточно. Причина заклю-

чается в основном не в недостатке производства электроэнергии, а в том, что еще не организован серийный выпуск комплексов машин и механизмов с электрическим приводом, недостаточен выпуск электроприборов для сельского хозяйства, особенно для механизации работ на животноводческих фермах.

Значительно увеличилось потребление электроэнергии предприятиями, обслуживающими быт, городским транспортом, а также электробытовыми приборами.

Однако вопросы электрификации быта и предприятий бытового обслуживания городского и сельского населения заслуживают дальнейшего серьезного внимания.

В 1975 г. можно увеличить потребление электроэнергии на нужды быта почти в 3 раза по сравнению с 1965 г. Для более широкого использования электроэнергии в быту следует решить вопрос о целесообразности введения льготных тарифов на электроэнергию в ряде районов в определенные часы суток и расширить производство электроприборов новейшей конструкции.

Об электрическом освещении. На электрическое освещение в настоящее время расходуется около 80 млрд. кВт·ч в год—столько, сколько еще 20 лет тому назад вырабатывалось электроэнергии в нашей стране. Между тем расходуется эта электроэнергия весьма нерационально как за счет малого применения новых экономичных источников света, так и за счет использования плохой светотехнической арматуры и неудовлетворительного ухода за ее содержанием. Необходимо преодолеть эти недостатки.

Рост энергетики вызывает и рост продукции электротехнической промышленности. Электротехническая промышленность является многоотраслевой, изготавливая изделия, начиная от мощных турбо- и гидрогенераторов, силовых трансформаторов весом в несколько сотен тонн до изделий, вес которых определяется граммами. Номенклатура электротехнических изделий исчисляется сотнями тысяч наименований.

Электротехническая промышленность разрабатывает и выпускает современное высококачественное и надежное электрооборудование, предназначенное как для генерирования электрической энергии и передачи ее до потребителей, так и для преобразования в механическую, тепловую, световую энергию для широкого использования при электролизе и других технологических операциях.

Следует указать, что на киловатт вводимой генераторной мощности требуется выпуск 8—10 кВА силовых трансформаторов и более 3 кВт электродвигателей.

Основные направления развития научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по созданию новых видов электротехнического оборудования на период до 1975 г. определены постановлением Совета Министров СССР от сентября 1968 г. К их числу относятся:

Создание и освоение серийного производства комплексов нового высоковольтного оборудования для линий электропередачи постоянного тока напряжением 1,5 млн. в. Освоение серийного произ-

водства комплексов электрооборудования переменного тока напряжением 750 кВ; создание комплексов электрооборудования на напряжении 1 000—1 200 кВ.

Создание высоконадежных и экономичных турбогенераторов мощностью 800 и 1 200 Мвт, мощных турбогенераторов на 1 500 об/мин (главным образом для АЭС), гидрогенераторов мощностью до 700 Мвт в комплекте с полупроводниковыми статическими и бесщеточными системами возбуждения, с использованием высокоэффективных систем охлаждения, с применением новых конструкционных, изоляционных и проводниковых материалов. Создание макетного образца турбогенератора с применением криогенной системы охлаждения обмоток. Кроме того, будут окончены научно-исследовательские работы на первых турбогенераторах мощностью 500 Мвт Назаровской и 800 Мвт Славянской ГРЭС с целью усовершенствования и создания более совершенных конструкций серийного производства.

Электродвигатели переменного и постоянного тока потребляют около 75% вырабатываемой в стране электроэнергии, а количество ежегодно выпускаемых электродвигателей исчисляется миллионами. Вполне естественно, что повышению качества, надежности, увеличению срока службы, типизации, уменьшению электрических потерь, габаритов и весов электродвигателей придается большое значение. С этой целью намечены конструкторские и технологические мероприятия, в числе которых следует указать на следующие:

создание серии асинхронных электродвигателей А2 и АК2 мощностью от 100 до 1 000 кВт и единой серии асинхронных электродвигателей А4 и А04 общепромышленного применения мощностью от 0,6 до 100 кВт с улучшенными весовыми и энергетическими показателями;

создание и промышленное освоение более совершенных и экономичных электродвигателей постоянного и переменного тока нормальной серии, синхронных двигателей с современными системами возбуждения. Создание машин постоянного тока повышенной надежности единичной мощности до 15 000 кВт для электроприводов металлургических агрегатов;

создание новой серии взрывобезопасных электродвигателей повышенной надежности и бесшумных электродвигателей;

разработка и освоение промышленного выпуска электродвигателей переменного тока с регулируемой скоростью вращения;

создание серии электродвигателей переменного и постоянного тока и универсальных электродвигателей мощностью до 1 кВт на базе единого конструкционного ряда для систем автоматики, бытовых аппаратов и приборов.

В области трансформаторостроения намечается: повышение единичных мощностей силовых трансформаторов и автотрансформаторов до предельных рациональных значений (в трехфазном исполнении — до 1 000 Мва, в группе однофазных трансформаторов и автотрансформаторов — до 1 500 Мва);

создание новых серий силовых трансформаторов

и автотрансформаторов на напряжение до 500 кВ со сниженным на 15—20% весом и уменьшенными потерями за счет применения высококачественной холоднокатаной рулонной стали с жаропрочным изоляционным покрытием, новых изоляционных и конструкционных материалов, интенсивных систем охлаждения с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой;

создание комплектных трансформаторных подстанций и распределительных устройств на напряжение до 330 кВ различного назначения и для различных условий применения в промышленных установках, в том числе с выключателями на напряжение 6—10 кВ, номинальные токи 5 000—8 000 А, с отключающей мощностью 1 400—2 000 Мва;

окончание работ по созданию единой серии быстродействующих переключающих устройств для автоматического регулирования напряжения и тока трансформаторов и автотрансформаторов до 330 кВ и ток до 2 000 А.

В области силовой полупроводниковой техники: дальнейшее расширение области применения силовых полупроводниковых устройств для выпрямительных и инверторных установок, в том числе для линий электропередачи постоянного тока, электрификации железных дорог и городского электрифицированного транспорта, систем возбуждения электрических машин, устройств преобразования частоты для различных целей, систем электропривода, сварочной техники и т. д.;

создание мощных комплектных выпрямительных полупроводниковых устройств (в том числе регулируемых и встроенных в трансформаторы для питания якорных цепей реверсивных и неререверсивных двигателей) для черной и цветной металлургии, химической и других отраслей промышленности;

создание и освоение серийного производства силовых полупроводниковых приборов на токи 400—500 А и обратное напряжение до 2 000 В, в том числе для нужд электрифицированного транспорта, высокочастотных полупроводниковых приборов на частоты 50—100 кГц и более, роторных вентилях и т. д.;

создание и освоение производства комплектных полупроводниковых крупноблочных устройств с комплектными блоками регулирования на логических элементах, магнитными и другими усилителями для управления электроприводами;

создание электрооборудования для пассажирских электропоездов со скоростью движения до 200—250 км/ч, с использованием полупроводниковых систем импульсного и частотного регулирования;

разработка и создание электрооборудования для электромобилей.

В области электротермического оборудования намечается:

создание установок высокотемпературного нагрева (электроннолучевой, плазменной), высокоэффективных автоматизированных и механизированных дуговых сталеплавильных электрических печей емкостью 200—300 т с электромагнитным перемешиванием жидкого металла, закрытых рудно-термических электропечей мощностью до 60 тыс. кВа для получения ферросплавов, вакуум-

ных электропечей со степенью вакуума до 10^{-9} мм рт. ст. и более, индукционных электрических печей и миксеров промышленной частоты емкостью 16—40 т для плавки черных и цветных металлов, агрегатов для вакуумного и электрошлакового переплава слитков весом до 40 т и более.

Дальнейшее направление технического прогресса в области электротермического оборудования будет вестись по пути определения принципиально новых решений, дающих существенный экономических эффект в народном хозяйстве. В связи с этим научно-исследовательские и конструкторские работы должны быть направлены на решение следующих задач:

исследование возможности и экономической целесообразности создания дуговых сталеплавильных печей емкостью 500 т и выше. При этом необходимо рассмотреть возможность осуществления дуплекс-процесса с конвертером, применения полых электродов, значительного уменьшения реактивного сопротивления применением продольно-емкостной компенсации, комплексной механизации и автоматизации технологических процессов с применением вычислительной техники. Следует рассмотреть предложение проф. А. Д. Свенчанского о применении постоянного тока для дуговых сталеплавильных и рудно-термических печей. Также следует изучить возможность использования эффекта сверхпроводимости применительно к мощным электропечным установкам;

разработка и освоение производства новых типов рудно-термических печей, в частности печей для фосфора мощностью 96 Мва и закрытых печей для ферросилиция мощностью 24 Мва. Следует рассмотреть технико-экономическую целесообразность строительства крупных электродомов, применение электроплавки для переработки бедных комплексных руд, имея в виду извлечение попутных элементов, например, ванадия, титана, хрома и др.

Будут вестись также научно-исследовательские, конструкторские и технологические работы в области индукционных плавильных и нагревательных печей и устройств, вакуумных дуговых печей, плазменного нагрева, электронно-лучевого нагрева и печей сопротивления.

В области светотехники намечается:

создание и освоение в 1970 г. производства новых высокоэкономичных газоразрядных источников света, в том числе люминесцентных ламп со световой отдачей 80 лм/вт и сроком службы 10 000 ч и к 1975 г. со световой отдачей до 90 лм/вт и сроком службы 15 000 ч, ртутно-кварцевых ламп с добавками иодидов металлов со световой отдачей до 130 лм/вт и сроком службы до 7 000 ч, натриевых ламп высокого давления со световой отдачей до 150 лм/вт, ксеноновых ламп высокого и сверхвысокого давления, светящихся электролюминесцентных панелей и рулонных электролюминесцентных материалов для сигнальных огней, указателей и др.;

создание и освоение производства люминесцентных ламп мощностью 120—200 вт с обычными, винтообразными и желобковыми колбами, люминесцентных ламп круглой, эллипсоидной, У-образ-

ной и других форм, люминесцентных миниатюрных ламп мощностью 4—13 вт, эритемных ламп мощностью 40 вт и выше, дуговых ртутно-кварцевых ламп мощностью 1 000 вт и выше с улучшенной цветностью, ксеноновых ламп мощностью 5, 10, 20 кВт и выше, прожекторов с различными видами ламп накаливания, местных светильников, фоторелейных устройств, новых серий осветительной арматуры, в том числе для взрывоопасных помещений.

Из других задач электропромышленности можно указать на следующие:

разработка и освоение производства новых серий бесконтактных низковольтных аппаратов и комплектных устройств на основе применения полупроводниковых приборов и магнитных усилителей;

создание бесконтактных систем управления и систем комплексной автоматизации с использованием управляющих машин для электроприводов металлургической и химической промышленности, машиностроения и других отраслей народного хозяйства с использованием мощных полупроводниковых источников питания, в комплектном крупноблочном исполнении, включающем аппаратуру управления, автоматизации, регулирования и программирования;

создание новых видов высокопроизводительного электросварочного оборудования, различного назначения, в том числе для сварки различных металлов и пластмасс, оборудования для плазменной сварки, новых видов источников питания с применением выпрямителей на тиристорах со стабилизацией и программным управлением, нового оборудования для сварки токами радиочастоты;

разработка и освоение комплексов специализированного электрооборудования для угольных шахт, для горнорудной, нефтяной и химической промышленности, для сельского хозяйства с учетом различных зон и условий применения, в том числе электрооборудования с автоматическим управлением для механизации и автоматизации технологических процессов на животноводческих и птицеводческих фермах, комбикормовых заводах, заводах первичной переработки сельскохозяйственной продукции, для парникового и тепличного хозяйства, а также для полива и орошения сельскохозяйственных культур;

создание и промышленное освоение тяговых железно-никелевых аккумуляторов с повышенными на 30—40% удельными характеристиками, стартерных аккумуляторных батарей для автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных машин и другого подвижного транспорта с применением новых видов синтетической сепарации и сроком службы до 5 лет в условиях эксплуатации, а также дальнейшее улучшение удельных электрических параметров, снижение веса и объема одноразовых источников тока и аккумуляторов, повышение их емкости и сроков службы;

создание электрохимических генераторов цинк-водородной и других систем для электромобилей, электрохимических генераторов (топливных батарей) различного назначения мощностью от 2 до 100 кВт и на их основе автономных энергетических

В. И. Ленин и электротехническая наука

В. Г. БИРЮКОВ

Москва

Исполняется знаменательная и дорогая для всех советских людей дата — 100-летие со дня рождения В. И. Ленина.

В области науки и техники гением В. И. Ленина были начертаны пути, по которым советская наука, в том числе электротехническая, развивалась в течение всей истории нашего государства.

Дореволюционная Россия дала человечеству немало славных имен ученых, однако это были гениальные одиночки, поскольку отсутствовали научные школы. Исследования, открытия, изобретения не получали никакой поддержки со стороны консервативных правителей дореволюционной России и косной русской буржуазии.

В результате научные открытия во многих областях электротехники, а также физики и химии, приоритет в которых принадлежал русским ученым и изобретателям, или вовсе не находили промышленной реализации, или же использовались в первую очередь за границей.

Широкое развитие науки, формирование научных школ, создание мощной научно-исследовательской и экспериментальной базы, подготовка высококвалифицированных научных отечественных кадров получило у нас широкое развитие только после Великой Октябрьской революции.

Наука стала государственным делом и важнейшим элементом социалистического планового хозяйства.

Еще летом 1918 г., когда Советская власть существовала реально только на небольшом клочке огромной страны, В. И. Ленин набрасывает план-задание Академии наук, в котором ставит перед наукой и техникой вопросы сугубо практической важности и кладет их в основу плана научно-технических работ, неуклонно проводившихся им в жизни.

установок для нужд народного хозяйства с коэффициентом полезного действия 50—60% и сроком службы 4—5 тыс. ч;

создание и освоение производства сверхвысоковольтных кабелей на напряжение переменного тока до 750 кВ и постоянного тока до 1500 кВ для передачи больших количеств электроэнергии с минимальными потерями, сверхпроводящих кабелей и сверхпроводящих проводов для мощных соленоидов и других магнитных устройств;

создание новых видов кабельных изделий, предназначенных для беструбной прокладки во взрывобезопасных помещениях, кабелей с негорючими покровами, освоение серийного выпуска обмоточных проводов повышенной нагревостойкости, высокопрочных эмальпроводов с полиимидной и други-

В этом плане, написанном рукой Владимира Ильича, было указание:

«Академии наук, начавшей систематическое изучение и обследование естественных производительных сил России, следует немедленно дать от Высшего Совета Народного Хозяйства поручение образовать ряд комиссий из специалистов для возможно быстрого составления плана реорганизации промышленности и экономического подъема России. В этот план должно входить: рациональное размещение промышленности в России ...

Обращение особого внимания на электрификацию промышленности и транспорта и применение электричества к земледелию. Использование непервоклассных сортов топлива (торф, уголь худших сортов) для получения электрической энергии с наименьшими затратами на добычу и перевоз горючего.

Водные силы и ветряные двигатели вообще и в применении к земледелию»¹.

В. И. Ленин в подлинном смысле этого слова был творцом социалистической электрификации. Изучая в 1899—1916 гг. разнообразную литературу по электричеству, пристально наблюдая за бурным ростом практического использования электроэнергии, он ясно представлял себе техническую революцию, которую вызовет применение электричества в развитии производительных сил. В. И. Ленин создал учение об электрификации как материально-технической базе бесклассового общества, являющееся неотъемлемой частью всего ленинизма.

В 1920—1921 гг. он развил свое учение об электрификации, венцом которого явилась гениальная формула «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны».

¹ В. И. Ленин, Собр. соч., изд. 5, т. 36, стр. 228—231.

ми видами изоляции класса нагревостойкости С, эмальпроводов медных, алюминиевых и из сплавов сопротивления диаметром 10—50 мм.

Здесь дан только краткий перечень наиболее важных электротехнических изделий, относящихся к различным отраслям электротехнической промышленности. Всего предусматривается освоить до 1975 г. более 5000 наименований нового электротехнического оборудования. До 1980 г. почти вся продукция электропромышленности, выпускаемая в настоящее время, будет, вероятно, обновлена.

Наша страна встречает знаменательную дату — 100-летие со дня рождения В. И. Ленина.

Энергетики страны и работники электротехнической промышленности в это благодарное движение внесут свой достойный вклад.



В плане ГОЭЛРО были воплощены ленинские идеи электрификации всей страны.

В письме Г. М. Кржижановскому 23 января 1920 г. В. И. Ленин дает задание начать разработку плана электрификации страны и в конспективной форме намечает все основные принципиальные направления этого плана.

Создание комиссии ГОЭЛРО из виднейших специалистов-электротехников и разработка грандиозного, первого в истории человечества, научно-обоснованного государственного плана электрификации страны в течение очень короткого времени — пример ленинского метода организации коллективной научной работы, положившей начало осуществления грандиозного плана индустриализации страны и превращения отсталой России в величайшую индустриальную державу мира.

Примечательно, что в ленинском учении об электрификации страны важнейшее место уделяется развитию отечественной электротехнической науки и электропромышленности.

Следует напомнить о последовательности подписания В. И. Лениным постановлений об утверждении плана ГОЭЛРО, организации Государственного экспериментального электротехнического института (ГЭЭИ), развитии электротехнической науки и промышленности. План ГОЭЛРО был одобрен VIII съездом Советов РСФСР в декабре 1920 г.

Для того чтобы ознакомить с планом ГОЭЛРО широкие круги инженерно-технической общественности и привлечь их к более активному участию в осуществлении этого плана, В. И. Ленин принял решение о созыве первого при советской власти (VIII) Всероссийского электротехнического съезда.

После признания электротехническим съездом плана ГОЭЛРО правильной схемой В. И. Ленин проводит через Совет Народных Комиссаров постановление (21 декабря 1921 г.), окончательно утверждающее план электрификации. В этом постановлении указывается список 31 электростанции мощностью 1500 Мвт, подлежащих строительству в течение 10—15 лет, намечаются также подлежащие электрификации железнодорожные линии. В постановлении подчеркнуто важнейшее значение создания машиностроительной базы электрификации и предложено поставить электротехническую промышленность наряду с такими важнейшими отраслями промышленности, как топливная и металлургическая.

Таким образом, план ГОЭЛРО был окончательно оформлен как государственный план развития народного хозяйства страны на базе электрификации.

Научно-технический отдел ВСНХ через Президиум ВСНХ внес в Совет Труда и Оборона (СТО) предложение об организации Государственного экспериментального электротехнического института (ГЭЭИ), в задачи которого должны были входить разработка и испытание широкой номенклатуры электротехнического оборудования для развития энергетики и электрификации страны и подготовка высококвалифицированных научных электротехнических кадров, т. е. обеспечение выполнения задач, поставленных планом ГОЭЛРО, помощь в создании отечественной электропромыш-

ленности, энергетики. Это предложение 5 октября 1921 г. было включено в повестку дня Совета Труда и Оборона РСФСР.

Докладывал по этому вопросу сам В. И. Ленин, который кратко, но ясно изложил суть дела и предложил утвердить предложение об организации ГЭЭИ.

Аргументация В. И. Ленина была настолько исчерпывающая, что, по свидетельству академика В. С. Кулебакина, который вместе с первым директором института чл.-корр. АН СССР К. А. Кругом был приглашен на это заседание СТО, им не пришлось дополнять выступление В. И. Ленина.

Постановление Совета Труда и Оборона об учреждении Государственного Экспериментального электротехнического института

В целях научно-экспериментального изучения и разработки всех вопросов электротехники, выдвигаемых текущей жизнью и проведением электрификации республики, а также для подготовки высококвалифицированных специалистов Совет Труда и Оборона постановил: учредить в Москве при научно-техническом отделе ВСНХ Государственный Экспериментальный электротехнический институт, возложив на ВСНХ координирование деятельности института с прочими научными учреждениями республики.

Председатель Совета
Труда и Оборона

В. Ульянов (Ленин)

Секретарь Совета
Труда и Оборона

Л. Фотиева

Москва, Кремль, 5 октября 1921 г.

11 октября было утверждено Коллегией НТО первое положение об институте, а 30 ноября — Президиум ГЭЭИ в составе: директора К. А. Круга и помощников директора — К. И. Шенфера и В. С. Кулебакина.

Первое время институт находился в необычайно трудных и неблагоприятных условиях: институт не имел ни своего помещения, ни соответствующих штатов сотрудников, отсутствовало оборудование, а также необходимые для его приобретения средства, в том числе валютные. Лица, поставленные во главе ГЭЭИ, являлись в то же время основными работниками электротехнического факультета МВТУ (К. А. Круг был деканом этого факультета).

Москва в то время была бедна научными электротехническими силами, так как до первой мировой войны и Октябрьской революции центром электротехнической мысли был Ленинград.

Кроме того, необычайно тяжелые условия жизни в Москве в этот год, обусловленные топливным и продовольственным кризисом, не способствовали успешному привлечению к научно-исследовательской работе в ГЭЭИ тех немногих квалифицированных специалистов — электротехников, которые имелись в стране. Коренного перелома в сознании интеллигенции еще не произошло.

Институт приютился и без того в тесном помещении старой электротехнической лаборатории МВТУ, находившейся в первом этаже физического

Сотрудники подбирались главным образом из молодых преподавателей и только что окончивших инженеров и студентов МВТУ.

К этому времени в Москве возник ряд родственных ГЭЭИ учреждений, между которыми дробились скромные средства, отпускаемые НТО по бюджету, и, кроме того, во многих этих учреждениях предполагалось проводить работы в тех же областях, что и в ГЭЭИ.

Отсюда вытекала необходимость объединения всех этих научных учреждений в целях более планомерного проведения работ, концентрации сил и сокращения общих накладных расходов. Как ни ясна была целесообразность такого объединения, она встречала резкое противодействие со стороны этих учреждений. В конце концов это противодействие было продолжено и в ГЭЭИ влился целый ряд существовавших до того времени самостоятельных институтов и лабораторий, а именно:

Физико-технический институт (ГОФТИ), возглавляемый проф. В. И. Романовым;

Рентгенотехническая лаборатория, возглавляемая проф. Н. Е. Успенским;

Магнитометрическая лаборатория проф. Аркадьева.

Акустическая лаборатория (Комзвук) во главе с А. И. Широким и проф. Н. Н. Андреевым, бывшая до этого межведомственной лабораторией;

Лаборатория ультрафиолетовых лучей И. И. Яроцкого.

В результате такого слияния к началу 1925 г. значительно увеличилось число отделов института:

Машиноаппаратный (проф. К. И. Шенфер, Гороховская, 23);

Измерительный с подотделами: светотехническим и магнитным (проф. В. С. Кулебакин, Гороховская, 23);

Магнитометрический (проф. Аркадьев, Московский университет);

Высокого напряжения (проф. Л. И. Сиротинский, Гороховская, 29);

Материаловедения (проф. П. А. Флоренский);

Вакуумтехнический (проф. В. И. Романов);

Рентгенотехнический (проф. Н. Е. Успенский, в Плехановском институте);

Рентгенотехнический (Вульф, Афанасьевский пер.);

Ультрафиолетовых лучей (И. И. Яроцкий, Афанасьевский пер.);

Радио (проф. М. В. Шулейкин, Гороховская, 23);

Акустический (А. И. Ширский, Гороховская, 23);

Слабых токов (проф. В. И. Коваленков, М. Ю. Юрьев, Гороховская, 23);

Промышленных испытаний (А. Н. Ларионов, Гороховская, 23).

Институт вырос в крупное по тому времени научно-исследовательское учреждение с числом сотрудников, доходившим до 150 чел., работавших в самых разнообразных областях электротехники.

В связи с необычайным уплотнением помещений ГЭЭИ вновь созданными отделами перед институтом встал вопрос о строительстве нового, специально приспособленного для нужд института

здания. Еще в 1924 г. был разработан эскизный проект такого здания, причем предполагалось построить его по соседству с главным зданием ГЭЭИ на углу Гороховской ул. и Демидовского пер. Однако по бюджету тогда не были отпущены средства, и этот проект не был осуществлен.

В 1925 г. вышло постановление межведомственной комиссии, в силу которого Нижегородская лаборатория, организованная постановлением Совнаркома РСФСР в декабре 1918 г., переводилась из Наркомпочтеля в ведение НТО ВСНХ. Научно-технический отдел предусматривал строительство в Москве объединенного Всесоюзного электротехнического института, в который должна быть включена и Нижегородская радиолaborатория.

Для организации такого объединенного института при НТО ВСНХ была создана специальная комиссия (зам. пред. ее был К. А. Круг), которая энергично взялась за дело.

Был создан Совет содействия из представителей ведомств и хозяйственных организаций. При содействии Московского Совета на месте бывшей Анненгофской рощи в Лефортове за будущим строительством был закреплен большой участок земли площадью 18 га. Был также составлен общий план строительства ВЭИ, определивший состав и объем отдельных зданий, и разработаны эскизные проекты всех зданий. Для осуществления строительства была выделена рабочая тройка в составе проф. К. А. Круга, А. В. Винтера и М. А. Бонч-Бруевича. Ведение строительства ВЭИ было поручено Шатурской станции, перешедшей к тому времени в МОГЭС, директором которой был А. В. Винтер.

Однако строительство с самого начала не могло вестись быстрыми темпами, так как отпущенных Электробанком из Ленинского фонда 50 тыс. руб. было явно недостаточно для развертывания работ. Ассигнования на строительство были отпущены в 1927 г., и в июне этого года заложены корпуса отделов высокого напряжения и машиноаппаратного. Для ведения строительства пришлось создать собственную строительную организацию, так как МОГЭС с уходом А. В. Винтера на руководство Днепростроем, занятый собственными стройками, отказался от договора, заключенного с ВЭИ.

Здания ГЭЭИ строились по проектам архитектора проф. Кузнецова под непосредственным руководством К. А. Круга и при участии заведующих отделами и всех научных сотрудников института.

Строительство шло успешно. Осенью того же 1927 г. был заложен электрофизический корпус и построены центральные мастерские, призванные обеспечивать как потребности научных отделов, так и все нужды строительства института. НТО предложило руководству ГЭЭИ приступить в том же 1927 г. к закладке радиоинститута. Однако недостаточность средств и другие причины не позволили тогда и в последующие годы начать строительство радиоинститута.

Радиотехнические лаборатории и лаборатории проводной связи в ГЭЭИ успешно работали до второй половины 30-х годов, когда они стали отделяться от ВЭИ и превращаться в специализированные институты.

ГЭЭИ в 1930 г. был переименован в ВЭИ.

Одновременно со строительством зданий ГЭЭИ в Лефортове были ассигнованы крупные средства в валюте на приобретение за границей оборудования (около 300 000 руб.) для строившихся в первую очередь лабораторий отделов высокого напряжения и машиноаппаратных корпусов. За счет замены, где это только было возможно, импортного оборудования отечественным удалось приобрести оборудование и для других лабораторий, в частности, для лабораторий, входивших в состав физико-технического института (ЭФК). Тогда же было приобретено оборудование и для первой в СССР лаборатории низких температур.

В 1927 г. был создан Отдел сельскохозяйственной электрификации в совхозе Дубровицы близ Подольска. Этот отдел возглавил проф. М. А. Евреинов.

В 1930 г. были построены здания управления института и два жилых корпуса, а в 1931 г. — новое здание опытно-электромеханического завода. Таким образом, в течение 1927—1931 гг. было завершено проектирование, строительство и в значительной степени оборудование крупнейшего в мире, первого в СССР комплексного научно-исследовательского электротехнического института.

Проектирование лабораторий, экспериментальных установок и оборудования, его изготовление и монтаж производились силами молодых, не имеющих никакого опыта, специалистов и студентов-дипломников под руководством первых организаторов и руководителей института.

Огромный вклад в организацию, строительство и становление ВЭИ как научного института сделали: его первый директор чл.-корр. АН СССР К. А. Круг, его заместители — академики В. С. Кулебакин, К. И. Шенфер, заведующий отделом высокого напряжения проф. Л. И. Сиротинский, заведующий отделом промышленных испытаний чл.-корр. АН СССР проф. А. Н. Ларионов.

К десятилетию своего существования, совпавшего с десятилетием утверждения плана ГОЭЛРО Советом Народных Комиссаров РСФСР, ВЭИ им В. И. Ленина объединил в своем составе все родственные научно-исследовательские организации и научные кадры Москвы. К этому времени было закончено строительство большого комплекса современных лабораторий с уникальными экспериментальными установками.

В рапорте XVII Всесоюзной партийной конференции ВКП(б) о выполнении первой пятилетки электропромышленностью досрочно (в 3 года) подписанном председателем правления ВЭО И. П. Жуковым и управляющим ВЭСО В. И. Романовским, в разделе «Советская электропромышленность на путях технического перевооружения» дается высокая оценка деятельности ВЭИ по всем направлениям. Отмечаются научно-исследовательские и конструкторские разработки в области электрических машин, трансформаторов, высоковольтной коммутационной и защитной от перенапряжений аппаратуры, изоляторов, исследований перенапряжений и аварийных режимов в энергосистемах и аппаратура для их расчета (модели сетей для расчетов сложных электрических сетей, столы для расчетов токов коротких замыканий, катодные ос-

циллографы), осветительные лампы и фотоэлементы, приемники и передатчики на ультракоротких волнах, первые телевизионные аппараты, с помощью которых производились первые телепередачи, оборудование для звукового кино, химические источники тока, электротехнические материалы, инертные газы и др.

В ВЭИ велись работы по теоретическим основам электротехники, электрическим машинам, технике высоких напряжений, радиотехнике и электронике. Были созданы научные основы электропривода, автоматического регулирования и управления электроприводами и электрическими системами. Осуществлен прием большого количества энергетического импортного оборудования (турбогенераторов, трансформаторов, высоковольтного оборудования, комплектного электропривода), результаты которого во многих случаях послужили основой арбитражных решений в пользу СССР.

Строго выполняя указание В. И. Ленина об электрификации страны, ВЭИ обеспечил разработку многочисленных теоретических проблем электротехники и создание большой номенклатуры электротехнического оборудования с высокими параметрами для развития отечественной энергетики, электрификации всех отраслей народного хозяйства и обороны страны в период выполнения плана ГОЭЛРО, в довоенные годы, во время Великой Отечественной войны и в послевоенный восстановительный период.

Тесная связь ВЭИ с заводами электропромышленности и высшими учебными заведениями с первых лет его деятельности способствовала освоению новых видов электротехнического оборудования, техническому прогрессу отечественной энергетики и пополнению ВЭИ молодыми специалистами.

В процессе выполнения ленинского плана электрификации в ВЭИ были подготовлены высококвалифицированные кадры молодых научных сотрудников, способных решать сложные комплексные научные задачи по развитию электропромышленности, энергетики, электрификации страны, созданию разнообразных видов оборудования слаботочной и силовоточной электротехники.

В ВЭИ начали свою научно-исследовательскую деятельность и сформировались как ученые: 20 академиков, 8 чл.-корр. АН СССР, 3 академика и чл.-корр. союзных республик, 78 докторов физико-математических и технических наук и около 300 кандидатов наук.

Таким образом, ВЭИ им. В. И. Ленина выполнил и возложенное на него задание СТО РСФСР о подготовке высококвалифицированных специалистов.

В дальнейшем своем развитии ВЭИ им. В. И. Ленина стал родоначальником многочисленных научно-исследовательских институтов и лабораторий различных ведомств: электропромышленности слаботочной и силовоточной, энергетических, связи, оборонной и других отраслей промышленности и академических.

На базе лабораторий ВЭИ были созданы крупнейшие научно-исследовательские институты страны: электромеханики, электропривода, электрони-

Электрификация и автоматизация в станкостроении за годы Советской власти

Академик В. И. ДИКУШИН, кандидаты техн. наук В. Г. ЗУСМАН и В. А. НАИДИС

Москва

Советский народ, осуществляя по заветам великого творца первого в мире Советского государства В. И. Ленина научно-техническую революцию во всех областях народного хозяйства и культуры нашей страны, создал могучее, всеобъемлющее машиностроение — основу развития материально-технической базы нового общественного строя.

Советское станкостроение, определяющее главные технологические возможности машиностроения, за 40 лет социалистического строительства поднялось от производства 2 000 простых станков в год до 200 000 станков любого назначения и размера, в частности, высокоавтоматизированных, с числовым программным управлением, особо высокой точности.

Решение проблем комплексной механизации и автоматизации производственных процессов машиностроения является основным научным направлением нового количественного и качественного повышения производительности труда, интенсивности и непрерывности работы оборудования, подготовленным за предшествующие годы, на основе развития электрификации страны, роста машиностроительной базы и развития образования и науки в стране.

Основой автоматизации циклов работы станков и машин является электропривод и управление движением рабочих органов.

В развитии электропривода и систем управления в станкостроении определяющими являются металлообрабатывающие, в частности, металлорежущие станки. Они относятся к той группе рабочих машин, которые предназначены для выполнения заданной (в виде чертежа, кода и др.) программы обработки металлической заготовки детали резанием.

Энергетика технологического процесса обработки в металлорежущих станках предопределяет специ-

фику способа преобразования электрической энергии в механическую и управления этим преобразованием.

Особенностью электроприводов металлообрабатывающих станков, отличающей их от металлургических, горных и других машин, являются сравнительно небольшие мощности приводов (максимум до 200 кВт) при относительно большом их типаже и количестве, что требует унифицированных решений и комплектного изготовления приводов на специализированных заводах.

Другой особенностью построения систем электропривода и управления металлорежущих станков является высокая точность осуществляемых перемещений (сотые и тысячные доли миллиметра), что характерно также для металлообрабатывающих электроэрозионных и электрохимических станков.

Направления развития электропривода станков. Уже в начале 30-х годов групповой привод отечественных металлообрабатывающих станков от трансмиссии был заменен индивидуальным электроприводом. В те годы сначала в основном применялись нерегулируемые асинхронные однодвигательные, а затем многодвигательные приводы станков, переходу к которым соответствовала замена ручного управления автоматическим с релейно-контакторной автоматикой.

Переход к многодвигательному электроприводу, позволяющему дистанционно управлять любым функциональным органом, явился вехой в механизации станков; с его применением значительно упростилась конструкция универсальных станков и облегчились процессы их сборки.

В конце 30-х годов был разработан и испытан регулируемый ионный привод постоянного тока малой мощности (до 5 кВт) с использованием тиратронов — первый отечественный станочный привод с системой автоматического регулирования.

ки, проводной связи, радиотехники и телевидения, автоматики и телемеханики, счетно-решающих машин, источников тока, светотехники, кабельной техники и др. Многие научные направления, основы которых были заложены в ВЭИ в первые годы его деятельности, в дальнейшем получили широкое развитие в многочисленных отраслевых научно-исследовательских институтах электропромышленности и других отраслей промышленности. Все эти научно-исследовательские организации с полным правом могут считать себя прямыми наследниками ВЭИ им. В. И. Ленина.

Научно-технический потенциал во всех направлениях отечественной электротехнической науки по

сравнению с намеченным планом ГОЭЛРО неизмеримо возрос. Электротехнические научно-исследовательские организации страны в настоящее время способны решать любые задачи, которые возникают перед народным хозяйством в процессе бурного его развития.

В. И. Ленин стоял у истоков развития электротехнической науки и сыграл в ее становлении и развитии огромную роль, масштабы которой особенно наглядно видны в итогах выполнения плана ГОЭЛРО, дальнейших планах электрификации и индустриализации нашей страны, создании материально-технической базы коммунистического общества.



На базе развития электромашинной автоматики и теории автоматического регулирования в 40-х годах были созданы регулируемые электроприводы станков с двигателями постоянного тока с использованием электромашинных усилителей в качестве возбудителей и генераторов (системы Г—Д с ЭМУ и ЭМУ—Д). Эти приводы с замкнутыми системами авторегулирования обеспечили разделение механизмов главного движения и подач станков (в основном тяжелых) и способствовали существенному упрощению конструкции станков.

Разработка регулируемых электроприводов постоянного тока поставила перед станкостроителями задачу: установить конкретные требования к электроприводам главного движения и подач металлорежущих станков по диапазону регулирования, статическим и динамическим показателям. Эти требования являлись компромиссными между максимальными требованиями, определяемыми механизмами станков и возможными характеристиками электроприводов на данном этапе развития, при приемлемой сложности, надежности, габаритах и стоимости электрооборудования.

В первых тяжелых станках электроприводы главного движения разрабатывались как приводы постоянной мощности с регулированием скорости двигателей путем ослабления поля возбуждения с целью уменьшения габаритов и массы электромашинных преобразователей и улучшения энергетических характеристик приводов. По мере развития приводы главного движения стали выполняться с двухзонным регулированием, при этом регулирование скорости вращения двигателя вниз от номинальной в диапазоне (до 10—30) при постоянном моменте использовалось в основном при включении первой ступени коробки скоростей.

Для 50-х годов характерно непрерывное повышение диапазонов регулирования приводов подач от десятков до 1—2 тысяч при сохранении примерно постоянной требуемой точности регулирования с соответствующим увеличением коэффициента усиления систем регулирования. В эти годы в тяжелых и прецизионных станках широко внедряются электроприводы с электромашинной автоматикой и обратными связями по противоз. д. с., а затем по скорости, с промежуточными ламповыми, а в дальнейшем с транзисторными усилителями. Технические требования к широкорегулируемым электроприводам были установлены исходя из возможностей этих приводов и касались главным образом статической точности и в меньшей степени быстродействия.

На базе широкорегулируемых электроприводов были разработаны и внедрены в ряде копировально-фрезерных станков следящие приводы с высоким быстродействием. В тяжелых карусельных и токарных станках нашли применение системы синхронного электрического вала на постоянном и переменном токе.

Развивались конструкции электромагнитных муфт и расширялось их применение в приводах, в первую очередь для дистанционного управления скоростью движения в станках с шестеренными коробками скоростей и для слежения в копировальных станках.

До 1960 г. высокопроизводительные многооперационные агрегатные станки, автоматические линии и другие средства автоматизации создавались в основном на релейных системах управления функциональными узлами.

Наряду с электроприводом развивался и гидропривод, нашедший, в частности, широкое применение в механизмах подачи плоско-шлифовальных и других станков и в следящих системах копировальных станков.

Для станков с числовым программным управлением, потребовавших создания простого малоинерционного привода, во второй половине 50-х годов в СССР впервые был разработан шаговый электрогидравлический привод, получивший за последние годы широкое применение в отечественной и мировой практике.

Электромашинная автоматика двойного преобразования электрической энергии в механическую обладала принципиальным недостатком: с дополнительными потерями, значительным шумом машин и затратами дефицитных металлов. Появление селеновых выпрямителей на токи в единицы — десятки ампер и магнитных усилителей, обеспечившее создание регулируемых приводов постоянного тока со статическими преобразователями, привело к вытеснению электроприводов по системе ЭМУ—Д мощностью до 2 кВт в механизмах станков, не требующих реверса и быстродействия при изменении скорости и нагрузки в процессе обработки. В настоящее время в станкостроении применяется примерно одинаковое количество регулируемых электроприводов с электромашинной и электромагнитной автоматикой, а регулируемые двигатели постоянного тока в металлорежущих станках составляют около 5% от общего числа применяемых электродвигателей.

Повышение степени автоматизации станков и линий вызвало значительный рост производства релейно-контакторных аппаратов и привело к применению малогабаритных слаботочных реле, а в дальнейшем — систем бесконтактного управления на магнитных логических элементах. Совершенствовались и системы проводки в шкафах управления; получили развитие проводка в перфокоробах, X-монтаж и др. Если применение электромагнитной техники привело лишь к частичному вытеснению электромашинной автоматики в регулируемых электроприводах, то развитие силовой полупроводниковой техники (кремниевых диодов и тиристоров) в сочетании с полупроводниковыми элементами управления способствовало полной замене преобразовательных агрегатов статическими. Последние годы ознаменованы разработкой большого количества серий регулируемых тиристорных приводов постоянного и переменного тока, в том числе и специализированных приводов для станкостроения.

Поскольку около 90% станочных приводов имеют мощность до 10 кВт, собственные разработки в станкостроении относятся главным образом к электроприводам малой мощности. Особенностью тиристорных приводов указанных мощностей является значительно меньшая зависимость габаритов, массы и стоимости преобразователя от мощности

привода, чем у электромашинных агрегатов. Эти показатели тиристорного преобразователя мало зависят также от соответствия принятого закона электрического регулирования требованиям механизма. Например, для приводов главного движения габариты, масса и стоимость преобразователя могут оказаться даже ниже при однозонном регулировании скорости вращения двигателя постоянного тока по сравнению с двухзонным, что невозможно осуществить при применении электромашинной автоматики.

Исходя из новых разработок электроприводов, можно охарактеризовать следующим образом технический уровень электрооборудования опытных образцов современных станков, серийное производство которых начнется в ближайшие 2—3 года.

Несмотря на существенное развитие регулируемых приводов, можно предположить, что еще в течение длительного времени в механизмах главного движения массовых универсальных станков токарной, сверлильной, фрезерной и зуборезной групп будут в основном применяться наиболее экономичные асинхронные двигатели в сочетании с быстро переключаемыми шестеренными коробками скоростей, и особенно с заменой ручного переключения автоматическим с помощью электромагнитных муфт с полупроводниковым управлением или электрогидравлических сервоприводов. Такие устройства уже внедряются в производство.

Благодаря уменьшению габаритов и массы, а в перспективе и стоимости тиристорных преобразователей, в разработках новых гамм станков средних размеров (расточных, шлифовальных, прецизионных токарных и др.) асинхронные приводы заменяются на регулируемые электроприводы постоянного тока с целью плавного регулирования скорости. В этих станках скорость вращения двигателя постоянного тока изменяется в диапазоне 2—4 при постоянной мощности путем ослабления поля возбуждения, а на начальном участке используется регулирование при постоянном моменте с помощью изменения напряжения на якоре двигателя. При этом в станках токарной и расточной групп остаются шестеренные коробки скоростей с 2—4 механическими ступенями, а в шлифовальных и заточных станках весь диапазон регулирования обеспечивается только за счет электропривода.

Тиристорные приводы постоянного тока, получающие широкое применение в механизмах подачи тяжелых и прецизионных станков с диапазоном регулирования от 10 в шлифовальных станках до 2000 в расточных, обеспечивают удобство выбора оптимальной подачи и автоматизацию перемещения при значительном упрощении конструкции механизма подачи.

При этом оказывается возможной замена реверсивных приводов с магнитными усилителями и реверсивных приводов по системе ЭМУ—Д тиристорным приводом, что способствует уменьшению габаритов приводов и улучшению их стабильности и особенно быстродействия.

Тиристорный преобразователь постоянного тока мощностью до 5 кВт даже в настоящее время выполняется в виде куба со стороной 20—25 см. С применением в схемах управления малогабарит-

ных элементов удастся в ближайшие годы еще в большей степени уменьшить эти размеры, а также значительно снизить стоимость преобразователя, что приведет к расширению области применения регулируемых электроприводов в механизмах подачи консольно-фрезерных, зуборезных и ряде других станков.

В настоящее время в станках с числовым программным управлением широкое применение нашли упомянутые выше электрогидравлические сервоприводы с шаговым электродвигателем с транзисторным управлением. Они имеют значительное преимущество, заключающееся в отсутствии обратных связей, и допускают работу при предельных частотах 8—16 кГц, обеспечивая минимальные подачи в долях миллиметра и скорости быстрого хода до 5—10 м/мин.

В станках с числовым управлением находят также применение следующие тиристорные приводы постоянного тока на базе трехфазных реверсивных преобразователей с питанием от сети 50 Гц, однофазных реверсивных с питанием от частоты 800—1000 Гц и широтно-импульсных преобразователей постоянного тока. В сочетании с малоинерционными двигателями постоянного тока с гладкими и печатными якорями двигатель разгоняется до максимальной скорости за 30—50 мсек.

Значительное развитие получают системы бесконтактного управления на базе полупроводниковых логических элементов с применением комплектов силовых тиристорных устройств мощностью до 10 кВт. Такие устройства позволяют управлять процессами пуска, торможения, реверса, переключения скорости, шагового и вибрационного режимов асинхронных двигателей и создавать оптимальные режимы по плавности разгона, значению тока в переходных процессах и др. При этом, несмотря на усложнение системы управления, значительно увеличивается надежность привода из-за исключения релейно-контакторной аппаратуры и облегчения работы двигателей при частых включениях. Бесконтактные системы управления еще слишком дороги, но по мере освоения промышленностью массового изготовления полупроводниковых приборов, логических элементов и комплектных тиристорных устройств их стоимость будет уменьшаться.

Разрабатываются электроприводы с силовыми шаговыми двигателями с тиристорным управлением, представляющие собой синхронно-реактивные двигатели, работающие в режиме дискретной пространственной переориентации н. с. В аналогичном режиме используются и асинхронные короткозамкнутые двигатели. Работа в указанных режимах, т. е. фактически при питании напряжением прямоугольной формы, отличается тем, что в импульсе переключения максимальный момент достигает больших значений, чем в режиме непрерывного перемещения оси н. с. с постоянной скоростью.

Применение тиристорных приводов постоянного и переменного тока, оказывается рациональным и для позиционных электроприводов, развившихся за последнее время в самостоятельную группу.

Для механизмов внутришлифовальных, заточных, абразивно-отрезных и других станков разработан ряд серий асинхронных регулируемых приводов переменного тока с частотным регулированием с двигателями мощностью до 0,5—10 кВт при скоростях вращения 100—10 000 об/мин соответственно. Тиристорные электроприводы переменного тока с частотным регулированием, использующие схемы инвертирования со звеном постоянного тока, в настоящее время по габаритам и стоимости в 2—3 раза превосходят регулируемые тиристорные приводы постоянного тока. Поэтому состояние и направление разработок новых регулируемых электроприводов в СССР и за рубежом позволяют предположить, что в первой половине 70-х годов регулируемые электроприводы постоянного тока найдут преимущественное применение в станках.

Внедрение интегральных элементов и схем управления, применение новых совершенных датчиков перемещений обеспечат переход к дискретному управлению широкорегулируемыми приводами. При этом весьма перспективными окажутся разработанные и внедренные в серийное производство тиристорные электроприводы постоянного тока с широтноимпульсными преобразователями, работающие при частоте до 2 000 гц; по мере совершенствования тириستоров возможно и дальнейшее повышение частоты.

В дальнейшем в связи с развитием полупроводниковой техники положение может измениться в пользу автоматизированных электроприводов переменного тока, поскольку большие габариты и стоимость двигателей постоянного тока являются постоянно действующими факторами, а различие в габаритах и стоимости статических преобразователей постоянного и переменного тока будет постепенно уменьшаться. Значительным препятствием к установке регулируемых электроприводов в универсальных станках средних размеров являются большие габариты приводных двигателей постоянного тока закрытого исполнения. Даже разработка новой серии двигателей (П2) коренным образом не изменит существующего положения. В этих станках особенно эффективен переход на привод с асинхронным двигателем с частотным регулированием.

Опыт отечественного станкостроения по применению комплектных приводов с магнитными усилителями, а также зарубежная практика показывает целесообразность внедрения в станках комплектных регулируемых электроприводов с техническими характеристиками (по диапазону регулирования, допустимой нестабильности скорости вращения и быстродействию), гарантированными заводами-изготовителями. Необходимость уменьшения стоимости приводов определяет требования к их крупносерийному выпуску; приводы должны быть достаточно универсальными, построены по блочно-модульному принципу и пригодны для многих отраслей промышленности.

Создание новых серий электроприводов требует широкой проектной и производственной кооперации заводов отраслей электротехнической и электронной промышленности.

Переход от электромашинных преобразователей к тиристорным в системах электропривода осуще-

ствлялся сначала с целью прямой их замены с воспроизведением лишь всех ранее получаемых функций двигателя. Современные исследования возможности реализации в приводах характеристик и режимов работы, отвечающих вновь возникающим техническим требованиям к станкам, находят свое развитие в усовершенствовании двигателей и систем управления. Пересматриваются технические требования к серийным электродвигателям и создаются новые серии специализированных двигателей, обеспечивающих выполнение новых функций, например: двигателей постоянного тока с гладкими и печатными обмотками якоря, шаговых и синхронно-реактивных двигателей, реверсивных двигателей прямолинейного движения и др. Можно прогнозировать постепенное стирание различий между машинами постоянного и переменного тока, так как полупроводниковые коммутаторы позволяют выполнить бесколлекторные двигатели постоянного тока. Очевидно, в перспективе приводы можно будет строить на базе единой системы двигателей с управляемыми полупроводниковыми коммутаторами при оптимальном управлении.

Перспективы программного управления металлообрабатывающими станками и машинами. Задачи выбора наиболее рационального способа переноса информации управления в рабочую машину приводят к созданию систем автоматизации цикла работы и формообразования. Технология требует все меньшей затраты человеческого труда, все большей механизации производства, большей степени автоматизации машин и многостаночной работы. При систематическом снижении машинного времени обработки одной из главных задач становится уменьшение необходимого вспомогательного времени, особенно на перестановку инструментов и деталей и их измерение. Это привело к созданию автоматизированных многооперационных станков с программным управлением, в частности с магазинами сменяемых инструментов для последовательных операций обработки.

К настоящему времени уже определилась предпочтительность в определенных условиях задания и предварительной переработки информации в числовой форме.

Для массового и крупносерийного машиностроения с редкоизменяемой программой работы оборудования задача автоматизации металлообработки рентабельно решается применением универсальных, специализированных, специальных и агрегатных полуавтоматов и автоматических линий, станков с кулачковой программой, с электромеханическими и электрогидравлическими системами управления. Большая длительность и трудоемкость, а иногда и невозможность перенастройки некоторых станков на обработку других изделий окупаются их сравнительной простотой и высокой производительностью, что сохранит их значение надолго и в будущем.

Для мелкосерийного и серийного производства, составляющего 60—70% общего объема производства в машиностроении, с частой сменой программы работы оборудования необходимы станки и машины, переналаживаемые достаточно быстро. Это требование с учетом большого объема исходной

информации управления и относительно высокой скорости ее переработки (при типовой дискретности перемещения 0,01 мм и скорости движения до 6 м/мин рабочая частота 10 кГц) трудно выполнять, используя электромеханические устройства и релейно-контактную аппаратуру.

В послевоенные годы развитие вычислительной техники и электроники позволило создать системы управления с вводом и переработкой исходной информации в числовой форме и автоматизированные металлорежущие станки с числовым управлением, достаточно универсальные и переналаживаемые. Системы числового программного управления обеспечивают выполнение в необходимой последовательности цикловых команд, режимов обработки и формообразующих движений рабочих органов.

Уже к концу 50-х годов в СССР были разработаны и организовано серийное производство нескольких моделей фрезерных и токарных станков с непрерывными системами числового управления. С целью сокращения объема электронного оборудования, располагаемого непосредственно у станка, в качестве программносителя была использована магнитная лента с декодированной записью информации в виде унитарного кода либо фазовой записи. В качестве приводов механизмов подачи были применены для средних и малых станков шаговые электрогидравлические механизмы в сочетании с винтовыми парами качения, а для крупных станков — следящие электрические и гидравлические приводы с регулируемыми двигателями в сочетании с линейными и круговыми датчиками обратной связи. Эти решения позволили уже в первом периоде применения числового управления создать сравнительно простые и надежные станки, хорошо зарекомендовавшие себя в условиях производственной эксплуатации.

Снижение стоимости и повышение надежности электронных приборов, а также стремление увеличить гибкость и расширить технические возможности систем управления предопределили дальнейший переход к кодированному вводу информации с использованием в качестве программносителя перфорированной ленты.

Широкий диапазон требований, предъявляемых к станкам различных групп, а следовательно, и к системам числового управления, по количеству программируемых и одновременно управляемых осей, по диапазону перемещений, по точности и дискретности, по виду интерполяции, по содержанию и объему коррекций и т. д., приводит к весьма широкой номенклатуре систем управления, либо к созданию дорогих и сложных систем с большой избыточностью. Задача решается путем построения систем управления на основе принципа агрегатирования, который позволяет на базе нескольких конструктивных исполнений и применения ограниченного числа типовых узлов за счет их различных сочетаний получить необходимое число исполнений систем.

Основными являются следующие агрегаты: ввода, интерполирования, позиционирования, накопителей.

Различные сочетания указанных агрегатов позволяют компоновать системы:

позиционную и прямоугольную с вводом программы в приращениях, включающую агрегаты ввода и позиционирования;

то же, но с вводом программы от одной базы — агрегаты ввода, позиционирования и накопителей; непрерывную — агрегаты ввода и интерполирования;

универсальную — агрегаты ввода, интерполирования и накопителей.

Каждая из систем, в свою очередь, агрегируется по числу координат, виду привода, объему коррекций и т. д. за счет схемного комплектования блоков внутри каждого из агрегатов.

Агрегат ввода обеспечивает: считывание информации с перфорированной ленты с помощью фотоэлектрического устройства, контроль правильности ввода информации на четность и длину слов, автоматический поиск любого кадра программы, ручной ввод информации по адресной системе от двух групп переключателей, одна из которых определяет адрес информации (перемещение по любой из осей координат, скорость шпинделя и т. д.), а другая — ее знак и объем. В агрегате ввода предусматриваются узлы управления скоростями шпинделя, сменной инструмента и рядом вспомогательных функций, а также узлы коррекций геометрических данных программы, связанные с возможным изменением длины, радиуса или положения инструмента или с неучтенными в программе деформациями узлов станка, инструмента или обрабатываемой детали.

Агрегат позиционирования обеспечивает управление и контроль достижения заданной позиции рабочими органами станка при числе программируемых осей координат до пяти, из них для одновременной отработки до двух.

На базе сравнения заданного и фактического положений рабочих органов станка формируется скоростная диаграмма приводных механизмов, обеспечивающая выход в заданную позицию с требуемой точностью в минимальное время. Предусматривается также автоматизация различных рабочих циклов сверления и резьбонарезания (функции ИСО G80—G89), что существенно сокращает объем программы.

Агрегат интерполяции обеспечивает функциональную связь между перемещениями по различным координатным осям, необходимую для заданного формообразования обрабатываемого изделия, в том числе и резьбонарезания по программе. При линейной интерполяции предусматривается возможность одновременного управления при числе координат до пяти, а при линейно-круговой интерполяции — две координаты в любой координатной плоскости при круговой интерполяции и до пяти координат при линейной.

При круговой интерполяции предусматривается возможность автоматического расчета эквидистантного контура, а следовательно, возможность коррекции диаметра инструмента при контурной обработке.

Агрегат накопителей обеспечивает возможность ввода информации не в приращениях, а от одной базы, введение плавающего нуля отсчета в пределах всего диапазона перемещений рабочих органов

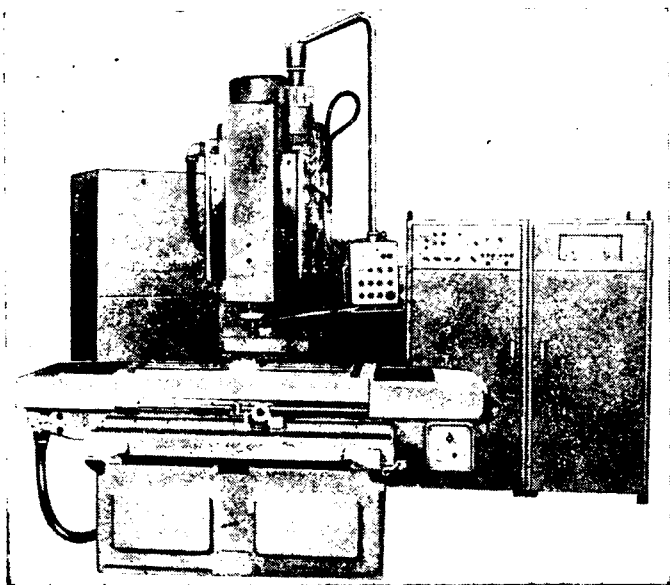


Рис. 1. Общий вид вертикально-фрезерного станка с числовым программным управлением модели МА655.

станка и визуальную цифровую индикацию любой информации, перерабатываемой в системе (заданное и текущее положение рабочих органов по любой из координат, режим обработки и т. д.).

В зависимости от вида привода подачи и типа устройств контроля перемещений в системе управления предусматриваются соответствующие узлы управления. При шаговом электрическом или электрогидравлическом приводе, который обеспечивает не только регулирование скорости в весьма широком диапазоне, но и дозируемые перемещения, предусмотрены кольцевые коммутаторы обмоток двигателей. Следует ожидать в ближайшее время расширения применения силовых электрических шаговых двигателей.

При следящем электрическом или гидравлическом приводе контроль перемещений осуществляется с помощью датчиков обратной связи. В качестве последних наиболее широко применяются обычные или многополюсные вращающиеся транс-

форматоры, а для особо точных или тяжелых станков линейные фотоэлектрические или индуктивные датчики соответственно.

Первые системы числового управления были выполнены на обычных дискретных ламповых и полупроводниковых элементах. В разработках последних лет находят применение интегральные элементы с малой и средней степенью интеграции. Снижение стоимости интегральных элементов позволит завершить в ближайшие 2—3 года переход к следующей стадии развития систем управления, выполненных на базе элементов со средней и высокой степенью интеграции. Важным звеном в общем комплексе вопросов рациональной эксплуатации станков с числовым управлением является служба расчета и подготовки программ.

Ручные методы подготовки программ могут быть использованы лишь в простейших случаях обработки. Разработанные системы автоматической подготовки программ с использованием вычислительных машин позволяют автоматизировать расчет не только геометрической части программы для токарной, сверлильно-расточной и фрезерной (2,5 координаты и частично многокоординатной) обработки, но и осуществить выбор оптимальных режимов обработки. В настоящее время системы ориентированы на применение средних вычислительных машин («Минск-32»). В ближайшие годы следует ожидать перехода к использованию больших вычислительных машин, что значительно расширит технические возможности оптимизации процесса обработки и снизит стоимость подготовки программ.

Опыт эксплуатации первых образцов станков с адаптивным управлением показывает значительные возможности повышения производительности станков и точности обработки.

В качестве иллюстрации современного уровня электропривода и управления приведем примеры отечественных автоматизированных металлорежущих станков.

1. Вертикальный фрезерный станок с крестовым столом с числовым управлением модели МА655 (рис. 1) со структурной схемой управления движением (рис. 2) имеет следующие технические характеристики: максимальные размеры обрабатываемых по трем координатам изделий $500 \times 1250 \times 500$ мм, пределы подачи станка от 0 до 700 мм/мин с дискретностью 0,01 мм, точность обработки 0,05 мм; мощности двигателей: главного привода 5,5 кВт, подачи стола 2×2 кВт, подачи шпинделя 1 кВт. На станке установлены тиристорные приводы и управляющая машина.

Тиристорный следящий электропривод постоянного тока серии ПТЗРС состоит из силового трехфазного трансформатора (СТ), питаемого от сети 50 гц, к которому включен тиристорный преобразователь (ТП), собранный по реверсивной трехфазной схеме с нулевым выводом. На структурной схеме (рис. 2) показаны блоки усилителей постоянного тока (УП—обратной связи по пути, УС—обратной связи по скорости, УПТ—промежуточный усилитель, блоки фильтров БФП и БФС и корректирующие устройства КУ₁ и КУ₂). Все эти блоки

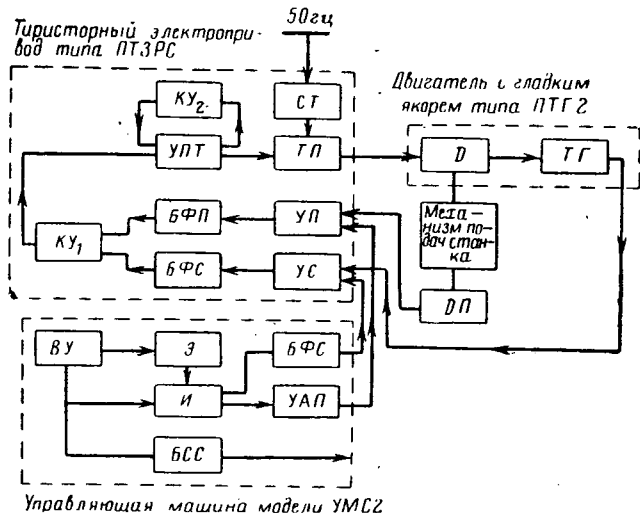


Рис. 2. Структурная схема управления движением стола модели МА655 по одной координате.

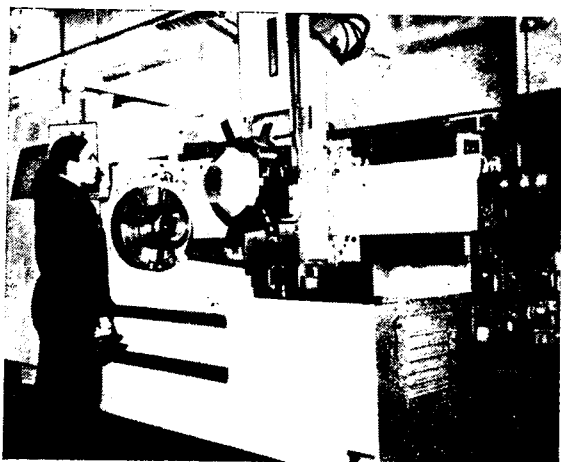


Рис. 3. Общий вид токарного полуавтомата с револьверной головкой с числовым программным управлением модели МА1750.

установлены в тиристорном преобразователе с габаритными размерами $360 \times 320 \times 630$ мм.

Двигатель постоянного тока серии ПГТ малоинерционный с гладким якорем (Д) имеет встроенный тахогенератор с гладким якорем (ТГ) и пристроенный вентилятор — наездник. В качестве датчика пути (ДП) используется вращающийся трансформатор. В шкафу управления (рис. 1 слева) установлены три тиристорных преобразователя для управления механизмами подачи станка.

Управляющая машина УМС-2 имеет следующие основные технические характеристики: точность расчета эквидистанты $\pm 0,01$ мм, точность интерполяции $\pm 0,01$ мм, максимальная скорость до 6 м/мин, мощность, потребляемая из сети 0,5 кВА, габаритные размеры $1400 \times 600 \times 1600$ мм и вес 300 кг.

Управляющая машина обеспечивает линейную и круговую интерполяцию контура при одновременном управлении по трем координатам. Ввод программы производится через вводное устройство (ВУ) со скоростью 600 строк/сек на перфоленте. Интерполяция производится линейно-круговым интерполятором (И) методом оценочной функции, что обеспечивает высокую точность. Расчет эквидистанты производится по данным основного контура, вводимым от программы, и величине радиуса фрезы с помощью специального блока (Э).

Управляющая машина УМС-2, предназначенная для управления следящим приводом, имеет дополнительные блоки управления БФС (блок формирования скорости) и ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь). Машина обеспечивает плавный разгон и замедление скорости и автоматическое поддержание постоянства контурной скорости. Блок БСС (связи со станком) передает на станок 27 технологических и вспомогательных команд. Управление станком осуществляется с подвесного пульта на стойке и с панели управления, помещенной на дверце шкафа машины УМС-2.

2. Токарный полуавтомат с револьверной головкой с числовым управлением модели МА1750 (рис. 3) со структурной схемой управления движением (рис. 4) имеет следующие технические характеристики: наибольший диаметр обработки 500 мм.

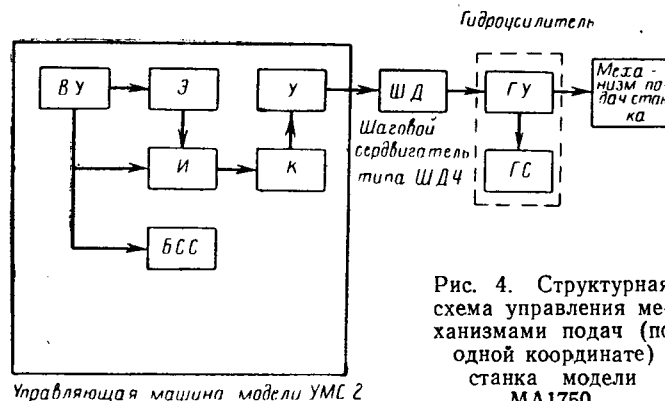


Рис. 4. Структурная схема управления механизмами подачи (по одной координате) станка модели МА1750.

пределы изменения скорости вращения шпинделя 50—800 об/мин, мощность главного привода 22 кВт, пределы изменения подачи 5—500 мм/мин с дискретностью 0,01 мм, точность обработки 0,05 мм.

Установленная на станке управляющая машина УМС-2 работает по тому же принципу, что и описанная выше, но рассчитана на управление шаговым электрогидравлическим приводом. В ней ряд блоков, предназначенных для управления следящими приводами (ЦАП и БФС), заменены блоками управления (У) и питания (К) шагового серводвигателя (ШД) с приемистостью до 2 кгц и предельной частотой 8 кгц. Шаговый серводвигатель управляет гидроусилителем (ГУ), питающимся от гидростанции (ГС), — на момент до 10 кгс.

В настоящее время автоматизация станков развивается в следующих основных направлениях:

1. Обеспечение концентрации и автоматизации параллельно или последовательно выполняемых на одном станке или линии станков операций с целью повышения комплексности, сокращения времени и повышения точности обработки, а также упрощения планирования и организации серийного производства изделий. Для решения этой задачи создаются унифицированные средства технологической оснастки и автоматической смены инструмента.

2. Применение в станках самонастраивающихся систем управления регулируемые приводами и средств управляющего контроля, в частности адаптивных устройств коррекции режимов обработки и положения инструмента, с целью получения наибольшей производительности и предельной точности обработки.

3. Внедрение в автоматизированные станки систем числового управления, построенных на базе нормализации и агрегатирования блоков программного управления. Возможность унифицировать основные параметры функциональных блоков систем числового управления облегчит их серийное освоение и подготовку персонала для работы на этих станках.

4. Создание комплексных автоматических линий станков, цехов и производств, управляемых от вычислительных машин.

Развитие технического прогресса систем электропривода и управления на базе внедрения полупроводниковых силовых преобразователей тока и информационно-вычислительных машин является новым современным этапом реализации в машиностроении ленинской идеи о необходимости полной электрификации страны.

Новые направления в развитии аппаратов высокого напряжения

В. В. АФАНАСЬЕВ и Л. К. ГРЕЙНЕР

Ленинград

Характерной особенностью развития современной энергетики является непрерывный рост единичных мощностей генераторов, отдельных электростанций и целых энергосистем, а также значительное увеличение дальности передачи электроэнергии и повышение номинального напряжения линий электропередач. Для обеспечения надежной работы таких энергосистем должны быть разработаны соответствующие аппараты высокого напряжения.

По данным проектных организаций при установлении предельных параметров аппаратов высокого напряжения следует исходить из следующих положений.

1. Передача электроэнергии на большие расстояния будет осуществляться при напряжении 1 200 кВ переменного и 1 500 кВ постоянного тока. В перспективе рассматриваются вопросы о повышении напряжения переменного тока до 1 500—1 800 кВ и постоянного тока до 2 000 кВ. Повышение напряжения при переменном и постоянном токе обуславливается не только значительным увеличением дальности передачи энергии, но и необходимостью передачи значительных мощностей на сравнительно небольшие расстояния.

2. Номинальные токи аппаратов на генераторное напряжение (20—25 кВ), установленных в цепях сверхмощных генераторов, увеличатся до 25 000—30 000 А.

3. Номинальные токи аппаратов на напряжение 110 кВ и выше увеличатся до 4 000 А; возможно, что при напряжениях 1 200—1 800 кВ окажется необходимым увеличить номинальный ток до 6 000 А.

4. Амплитуда предельного сквозного тока короткого замыкания достигнет 750 000—1 000 000 А при генераторном напряжении и 160 000—250 000 А при напряжениях 110 кВ и выше.

5. Ток отключения составит 180 000—200 000 А при генераторном напряжении и 63 000—100 000 А при напряжениях 110 кВ и выше.

6. Время отключения выключателей на напряжение 500 кВ и выше не должно превышать 0,04 сек.

Разработка аппаратов на указанные выше параметры по аналогии с установившимися «классическими» схемами аппаратов высокого напряжения встречает большие трудности, а в ряде случаев становится невозможной. Поэтому последние годы во многих странах проводятся интенсивные поисковые работы по созданию высоковольтных аппаратов, основанных на новых принципах. Многие из этих направлений стали возможными в результате быстрого развития радиоэлектроники, химии и физики.

Однако не всякое новое направление в развитии аппаратостроения сразу же находит общее признание и применение. Во многих случаях реализация нового более прогрессивного направления в начальный период времени приводит к созданию ме-

нее экономичных и менее надежных аппаратов, чем аппараты, основанные на старом принципе. Такое положение является вполне закономерным, так как для реализации каждой новой идеи необходимо проведение больших научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Кроме того, реализация новой идеи зависит от уровня развития других отраслей техники, от технологических возможностей, а иногда и от психологических причин. История развития техники показывает, что многие новые идеи и изобретения реализуются не сразу после их возникновения, а сначала забываются на долгие годы. Когда же возникнут соответствующие потребности, обеспеченные надлежащими материальными и психологическими условиями, они как бы вновь рождаются, но уже на более высоком качественном уровне.

Так например, дейонные решетки М. О. Доливо-Добровольского, изобретенные в 1910—1912 гг., нашли практическое применение по предложению И. Слепьяна в конструкции выключателей только в 1928 г. Заслугой И. Слепьяна является также теоретическое объяснение принципа действия этого эффективного дугогасительного устройства.

Первые опыты с гашением дуги в вакууме проводились еще в 20-х годах. Однако лишь в 50—60-х годах в связи с развитием техники высокого вакуума удалось создать работоспособные конструкции вакуумных выключателей [Л. 1].

Из сказанного выше следует, что при определении тенденций развития какой-либо отрасли техники необходимо опираться на анализ предшествующего хода ее развития. На таком анализе, применительно к выключателям, как самым сложным аппаратам высокого напряжения, мы и остановимся.

По мере достижения высокой степени совершенства того или другого типа выключателя и исчерпания возможностей дальнейшего количественного развития, неизбежно наступает качественный скачок, подготовленный параллельным развитием других, более совершенных принципов действия. Процесс развития выключателей различных типов наглядно иллюстрируется схемой, изображенной на рис. 1.

Первым типом выключателя, получившим широкое промышленное применение был масляный (жидкостный) выключатель. Первоначальный выбор минерального масла в качестве среды для гашения электрической дуги был, разумеется, не случайным. Решающее значение имели его высокие изоляционные свойства, влияние которых на процесс гашения длительное время, впрочем, переоценивалось. Но так как трансформаторное масло обладает пожаро- и взрывоопасностью, то вскоре были начаты поиски негорючих жидкостей (вода, позднее — экспансия и др.). Однако трансформа-

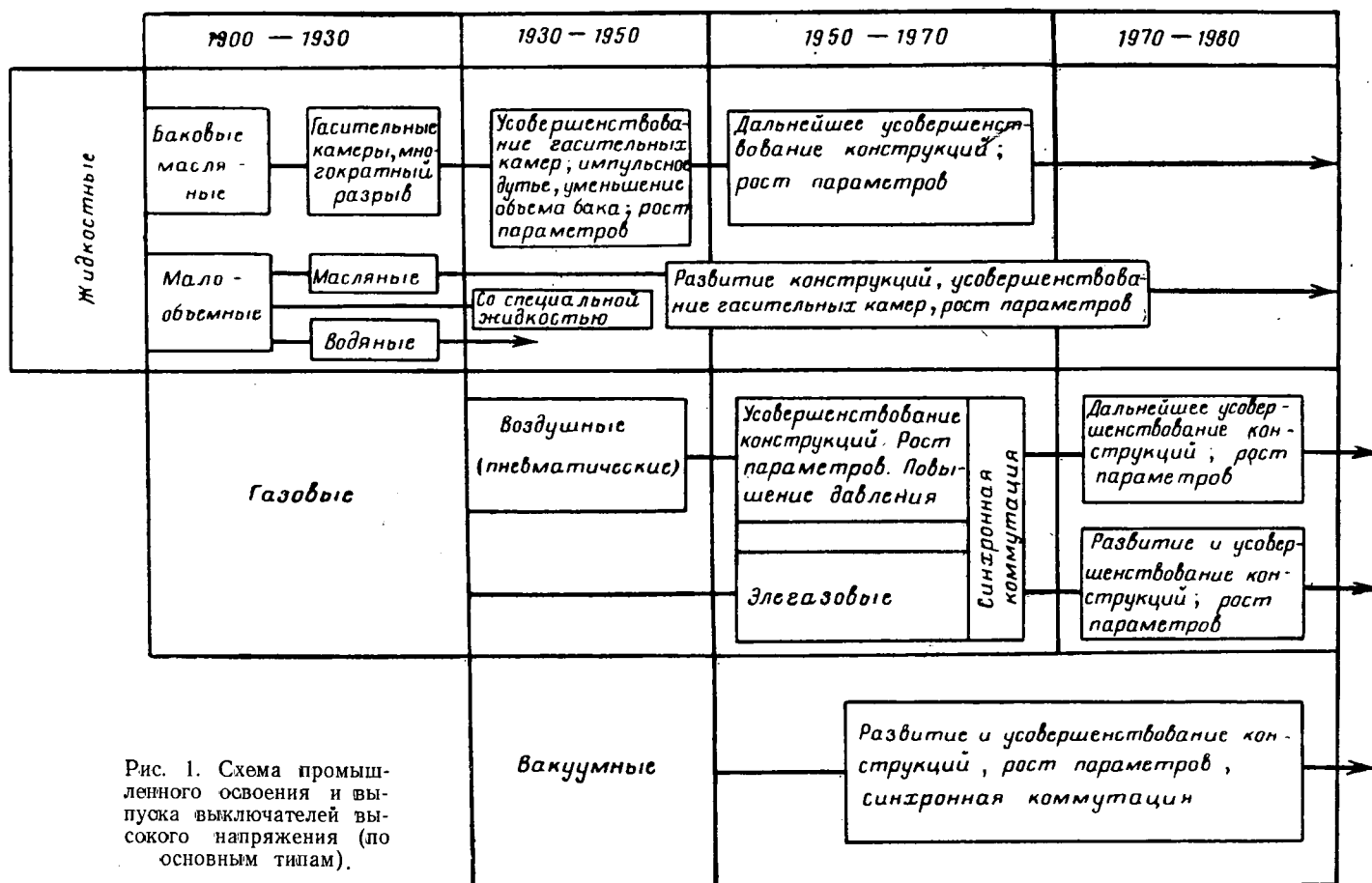


Рис. 1. Схема промышленного освоения и выпуска выключателей высокого напряжения (по основным типам).

торное масло, несмотря на все свои недостатки, до сих пор используется в качестве дугогасящей среды в большинстве жидкостных выключателей. Повышение основных параметров масляных выключателей (номинального напряжения, номинального тока, тока отключения) обеспечивалось коренным усовершенствованием отдельных узлов (появление простых гасительных камер, гасительных камер с масляным дутьем, шунтирование разрывов, возникновение импульсного дутья, применение многократного разрыва, уменьшение количества масла и пр.).

Поскольку применение любых жидких дугогасящих сред связано вообще с определенными эксплуатационными неудобствами (необходимость заливки и спуска жидкости при ревизиях, потребность в емкостях для их хранения, периодический контроль изоляционных свойств и защита масла от увлажнения и т. д.), дальнейшие поиски были направлены в сторону изыскания газовых сред. Так, появились газовые (воздушные) выключатели. Гашение дуги в струе воздуха повышенного давления было впервые предложено в 1926 г., в то время как первые опыты в этом направлении были проведены еще в 1897 г. Использование этого принципа гашения дуги в конструкциях выключателей началось лишь с 1930 г. Первоначальные конструкции воздушных выключателей были значительно сложнее, дороже и менее надежны, чем масляные выключатели.

Однако работа по усовершенствованию воздушных выключателей продолжалась весьма интенсивно и в настоящее время воздушные выключатели

по своим основным параметрам превосходят масляные выключатели, хотя они и сейчас еще сложнее и дороже масляных выключателей.

Промышленное производство воздушных выключателей в различных странах проходило по-разному. Так например, в США переход на более безопасные — воздушные выключатели — задержался по сравнению с Европой более, чем на 20 лет.

Несмотря на доступность атмосферного воздуха, его осушка, компрессия и хранение потребовали достаточно сложного оборудования. По мере развития конструкций воздушных выключателей повышение их мощности отключения достигалось посредством интенсификации воздушного дутья (до сверхзвуковых скоростей потока) и постепенным повышением давления. В настоящее время за рубежом выпускаются выключатели с рабочим давлением до 55 атм и готовятся к выпуску — с давлением 70 атм. Дальнейшее повышение давления представляется нежелательным, в частности, по соображениям техники безопасности, трудности осуществления надежных уплотнений и резкого возрастания звукового эффекта при отключении. Таким образом, воздушные выключатели в этом отношении, по-видимому, подошли к своему «потолку».

Параллельно с применением сжатого атмосферного воздуха в мировом аппаратостроении проводились исследования других газов, особенно так называемых «электроотрицательных». Такие газы, как CCl_4 , CF_4 , N_2 , CCl_3 не нашли практического применения в выключателях. Зато газ — шестифтористая сера (SF_6), открытый еще в 1889 г., ока-

зался необыкновенно перспективным ввиду его совершенно исключительных дугогасящих и изоляционных свойств. Впервые обстоятельное исследование этого газа с точки зрения электротехнических свойств было произведено Б. М. Гохбергом в Ленинградском физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе [Л. 2]. Автором исследования было предложено назвать этот газ «элегазом» — электротехническим газом.

Начиная с середины 50-х годов в ряде стран (США, Япония, ФРГ, Италия) были разработаны и выпущены элегазовые выключатели нагрузки и мощные выключатели на все ступени напряжений вплоть до 765 кВ. Пятнадцатилетний опыт эксплуатации этих выключателей в целом оказался положительным.

Аналогичная тенденция распространяется и у нас на коммутационные аппараты, предназначенные для отключения рабочих токов (автоматические отделители). Великолукский завод высоковольтной аппаратуры готовится к серийному выпуску элегазовых отделителей на напряжения до 220 кВ.

Следует попутно отметить, что никаких препятствий к широкому производству элегазовых аппаратов с точки зрения обеспечения элегазом нужд электропромышленности в нашей стране нет. Имеющиеся производственные мощности используются пока в минимальной степени.

Ввиду значительной стоимости элегаза работа выключателей строится по замкнутому циклу с одной или двумя ступенями давления.

Надо полагать, что далеко не все возможности использования элегаза в электротехнике уже выявлены, и расширение его применения в других аппаратах имеет большие перспективы.

К газовым выключателям следует отнести выключатели с твердым дугогасящим веществом. Они изготавливаются на напряжения до 15 кВ и имеют небольшой ток отключения. Эти выключатели получили ограниченное распространение и являются неперспективными.

Наряду с применением газов повышенного давления, велась поисковая работа и в противоположном направлении — по гашению электрической дуги в разреженной среде (10^{-5} — 10^{-6} мм рт. ст.). Так появились вакуумные выключатели. Практическая реализация принципа гашения дуги в вакууме в промышленном масштабе велась в 50—60-х

годах в СССР, США, Англии. Вакуумные выключатели еще находятся в начальной стадии своего развития. Они сложны по конструкции и могут пока отключать небольшие токи; опыт эксплуатации вакуумных выключателей еще очень небольшой.

Следует еще остановиться на электромагнитных выключателях. Эти выключатели применяются на напряжения не выше 20 кВ. Ток отключения их не превышает 25 000 А.

Такова эволюция развития отдельных направлений в выключателестроении. Оценка пути развития выключателей высокого напряжения за 75—80 лет их существования показывает, что этот путь был достаточно логичным и обоснованным, хотя его отдельные этапы в силу ряда технико-экономических причин слишком затянулись.

Одной из важнейших проблем при создании аппаратов на сверхвысокие напряжения является разработка рациональных изоляционных конструкций. При этих напряжениях размеры изоляционных конструкций получаются очень большими [Л. 3]. Так например, высота опорной изоляционной конструкции, т. е. расстояние между ее токоведущими и заземленными частями, при напряжении 1 200 кВ составляет 10 000—11 000 мм, а при напряжении 1 500 кВ — 14 500÷15 500 мм; длина подвесной конструкции, т. е. расстояние между ее токоведущими частями и заземленным порталом, при напряжении 1 200 кВ составляет 6 500—7 000 мм, а при напряжении 1 500 кВ — 8 000÷9 000 мм; расстояние между разомкнутыми контактами одного полюса разъединителя при напряжении 1 200 кВ достигает 10 000—12 000 мм, а при напряжении 1 500 кВ — 16 000—17 000 мм. Изоляционные промежутки между фазами при напряжении 1 200 кВ равны 13 000—14 000 мм.

Из приведенных данных видно, что изоляционные расстояния от частей, находящихся под напряжением, до заземленного портала будут значительно меньше, чем до земли. Поэтому весьма вероятно, что аппараты на напряжения 1 200 кВ и выше целесообразнее конструировать подвесного типа, чем опорного типа с установкой на фундаменте. Возможно, что распределительное устройство на сверхвысокие напряжения будет представлять сочетание подвесных и опорных аппаратов (рис. 2).

Особенно большие трудности возникнут при проектировании внутренней изоляции аппаратов на сверхвысокие напряжения, например, бумажно-масляной или литой в трансформаторах тока.

Сложные вопросы предстоит решить при создании аппаратов на номинальные токи 25 000—30 000 А. Необходимо будет разработать рациональный профиль токоведущих частей, позволяющих при наименьшем расходе материала пропустить наибольший ток; выбрать систему охлаждения (очевидно, что при таких токах неизбежно применение принудительного охлаждения); сконструировать комммутирующие контакты, обладающие большой устойчивостью при токах короткого замыкания.

Не менее сложной задачей является отключение токов порядка десятков и сотен тысяч ампер, о которых говорилось выше, и обеспечение высокой

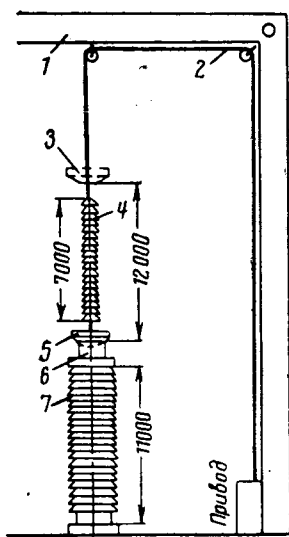


Рис. 2. Подвесной разъединитель на 1200 кВ, совмещенный с трансформатором тока.

1 — портал; 2 — стальной трос; 3 — подвижные контакты разъединителя в отключенном положении; 4 — гирлянда, на которой подвешены подвижные контакты разъединителя; 5 — подвижные контакты разъединителя во включенном положении; 6 — неподвижные контакты разъединителя; 7 — трансформатор тока.

электродинамической и термической устойчивости аппаратов. Решение этой проблемы может быть достигнуто путем создания специальных аппаратов значительно ограничивающих величину тока короткого замыкания (токоограничителей); новых аппаратов высокого напряжения, обладающих достаточно большой электродинамической и термической устойчивостью, и коммутационных аппаратов, обладающих, кроме того, и значительной отключающей способностью.

Работы по созданию аппарата, значительно ограничивающего величину тока короткого замыкания, были начаты еще в конце 30-х годов в ВЭИ. Однако начавшаяся Великая Отечественная война 1941—1945 гг. прервала эти работы. После окончания войны они продолжены не были. В настоящее время предложен ряд схем таких аппаратов с применением специальных реакторов и управляемых вентилей. Разработка токоограничивающих аппаратов и их дальнейшее усовершенствование является весьма перспективным направлением, так как применение их может существенно снизить требования к большинству аппаратов высокого напряжения по токам короткого замыкания.

Проблемы изоляции, нагрева при номинальном токе и устойчивости при токах короткого замыкания являются общими для всех аппаратов высокого напряжения на предельные параметры (кроме разрядников). Использование новых принципов наиболее наглядно сказывается на конструкции выключателей, контрольно измерительных трансформаторов и комплектных распределительных устройств.

Выключатели. Разработка выключателей, способных отключать токи в несколько десятков или сотен тысяч ампер является весьма сложной задачей, которая может быть решена либо путем разработки высокоэффективных дугогасительных устройств, либо созданием выключателей, которые производили бы отключение тока в момент, предшествующий его прохождению через нулевое значение. Второе направление является более перспективным, чем первое.

Начало размыкания контактов обычного выключателя может соответствовать различным моментам данного полупериода отключаемого тока (нарастание тока, максимальное его значение, убывание тока, прохождение через нуль). Поэтому минимальное время гашения дуги в этих выключателях составляет от 0,005 до 0,015 сек. Энергия, выделяемая в дуговом промежутке, будет зависеть от величины отключаемого тока и времени горения дуги. Условия гашения дуги при размыкании контактов в начале полупериода тока будут более тяжелыми, чем при размыкании контактов в момент, предшествующий переходу тока через нуль.

Отключение цепи всегда за один и тот же промежуток времени до момента перехода тока через нуль называется синхронным, а выключатели, основанные на этом принципе, называются синхронными выключателями [Л. 4 и 5].

Если энергию, которая выделяется в дуговом промежутке за время горения дуги в течение одного полупериода (10 мсек), принять за 100%, то энергия, которая выделится в дуговом промежутке

при размыкании контактов за 3 мсек до перехода тока через нуль составит 21%, а при размыкании контактов за 2 мсек — 10%. Уменьшение энергии, выделяющейся в дуговом промежутке, ускоряет процесс деионизации и позволяет значительно повысить отключаемый ток по сравнению с обычным дугогасительным устройством при одинаковых условиях (диаметр сопла, давление сжатого воздуха и т. д.).

При тех значениях отключаемых токов, которые в ближайшие годы будут иметь место в наших энергосистемах (180 000 — 200 000 а при генераторном напряжении и 63 000 а при напряжениях 330—750 кВ), идея синхронного выключателя является весьма плодотворной. Следует отметить, что в Японии разработаны и находятся в эксплуатации воздушные синхронные выключатели на 120—500 кВ. Интенсивно ведутся работы по синхронным выключателям в СССР, Франции, ФРГ и других странах.

Целесообразно разрабатывать синхронные выключатели как с сжатым воздухом, так и с элегазом, учитывая хорошие дугогасящие свойства последнего.

На рис. 3 приведена схема синхронного выключателя. Синхронизирующее устройство 2 через трансформатор тока 3, включенный последовательно с основными контактами 8 и 9 выключателя, следит за кривой тока в цепи, периодически посылая импульсы в приемное устройство 4, за определенный период времени (2—3 мсек) до перехода тока через нуль. При подаче команды на отключение выключателя замыкаются контакты 1. Однако осуществление этой команды начнется лишь после того, как в приемное устройство 4 поступит очередной импульс из синхронизирующего устройства. Поступление этого импульса при замкнутых контактах реле 1 вызывает вспышку импульсной лампы. Световой поток по светопроводу 5 поступает к устройству, которое вызывает пробой искрового промежутка 6. При этом конденсатор 11 разряжается на катушки 7 и 10, которые обеспечивают размыкание контактов 8 и 9. Перемещение подвижных контактов происходит за 1,5—2 мсек. Дуга, возникающая между контактами, гасится сжатым воздухом.

Зарядка конденсатора 11 производится от источника 15 через трансформаторы 13 и 14. Вентиль 12 не дает возможности разряда конденсатора на трансформатор 13.

Выключатели с синхронным отключением могут найти применение в сетях с генераторным напря-

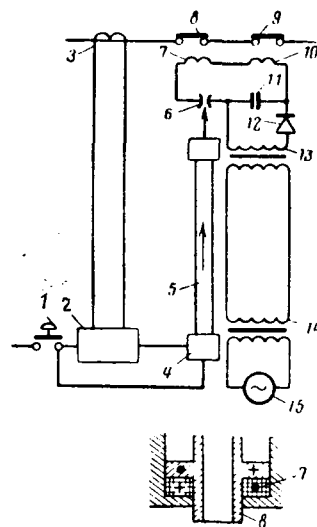


Рис. 3. Принципиальная схема синхронного выключателя.

жением (20—24 кВ) и сетях с напряжением 220 кВ и выше.

Синхронное отключение может оказаться особо эффективным в вакуумных выключателях, которые очень чувствительны к величине отключаемого тока. Небольшой ход контактов в вакуумных выключателях легко позволяет обеспечить их синхронное отключение.

Наряду с синхронным отключением цепи представляет большой интерес и проблема синхронного включения, так как это позволяет значительно снизить коммутационные перенапряжения, возникающие при включении выключателем длинной линии.

В последние годы проявляется большой интерес к бездуговой коммутации. Разработка и освоение производства управляемых полупроводниковых вентилей на напряжения в несколько киловольт позволит создать выключатели с бездуговой коммутацией. Электрическое разъединение обесточенной цепи по соображениям безопасности может осуществляться простейшими коммутационными аппаратами типа отделителей. Конечно, для создания таких выключателей необходимо дальнейшее усовершенствование и повышение надежности управляемых полупроводниковых вентилей. Первое время такие выключатели будут рассчитаны на напряжения 6—10 кВ и небольшие токи. Они будут, по всей вероятности, дороже и сложнее соответствующих масляных, воздушных или электромагнитных выключателей. Но со временем их конструкция будет совершенствоваться, их надежность будет повышаться, а стоимость уменьшаться.

Контрольно-измерительные трансформаторы. В последние годы уделяется много внимания созданию оптико-электронных трансформаторов тока и напряжения, основанных на модуляции светового потока при изменении величины тока и напряжения. В этих трансформаторах световой поток является связующим звеном между первичными и вторичными обмотками. Измерение тока в таких трансформаторах основано на использовании различных методов.

Применение эффекта Фарадея. Работы по использованию явления вращения плоскости

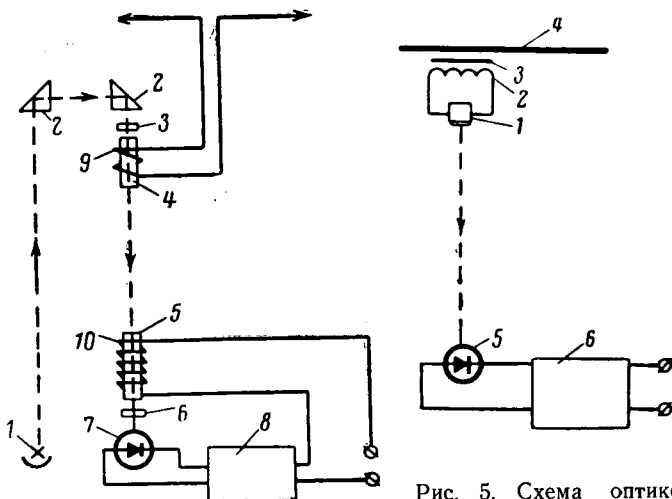


Рис. 4. Схема оптико-электронного трансформатора тока с использованием эффекта Фарадея.

Рис. 5. Схема оптико-электронного трансформатора тока на полупроводниковых источниках тока.

поляризации светового потока под действием магнитного поля [Л. 6 и 7] для измерения тока проводились в 1953—1956 гг. в ВЭИ. Однако они не были доведены до стадии создания образцов трансформаторов тока. Принципиальная схема такого трансформатора тока показана на рис. 4. Световой поток, создаваемый источником света 1, расположенным на потенциале земли, посредством двух зеркал 2 направлен в поляроид 3. Из поляроида 3 поляризованный световой поток проходит через кристаллы 4 и 5 к поляридоу 6. Из последнего световой поток попадает на фотоэлемент 7, соединенный с усилителем тока 8.

Кристалл 4 расположен в зоне магнитного потока первичной обмотки 9 (т. е. обмотки высокого напряжения) трансформатора тока таким образом, чтобы магнитное поле проходило вдоль этого кристалла 2. На кристалл 5 намотана вторичная обмотка 10, которая соединена с усилителем 8 и внешней цепью нагрузки трансформатора (т. е. цепью, в которую включаются измерительные приборы и токовые реле).

При изменении тока в первичной обмотке 9 меняется напряженность поля в кристалле 4, что вызывает поворот плоскости поляризации светового луча на некоторый угол.

Метод измерения заключается в том, чтобы постоянно приводить плоскость поляризации света в исходное положение (при отсутствии тока в первичной цепи) с помощью кристалла 5 и вторичной обмотки 10. Ток, протекающий по вторичной обмотке, создает магнитный поток, противоположный магнитному потоку первичной обмотки. Ампер-витки первичной и вторичной обмоток равны по величине.

Разница между первичными и вторичными ампер-витками проявляется как изменение силы света, падающего на фотоэлемент 7. Фотоэлемент воздействует на вход усилителя 8, который изменяет вторичный ток так, чтобы восстановилось равенство в первичных и вторичных ампер-витках. Таким образом, усилитель создает ток, являющийся точным изображением тока в первичной обмотке.

Использование такого способа измерения тока позволяет создавать как трансформаторы переменного тока, так и трансформаторы постоянного тока. Вес трансформатора тока с использованием рассмотренного способа примерно от 3 до 10 раз меньше веса обычного трансформатора тока с бумажно-масляной изоляцией на одни и те же параметры. Так например, вес трансформатора тока на 765 кВ фирмы Мерлен-Жерен с использованием этого принципа составляет всего лишь 1 000 кг. Вес обычного трансформатора тока на 765 кВ, но с бумажно-масляной изоляцией составляет примерно 9 000 кг. Значительно уменьшается и трудоемкость изготовления трансформатора, так как отпадает изоляция первичной обмотки трансформатора кабельной бумагой.

Изоляцией трансформатора с использованием рассмотренного способа является колонка пустотелых изоляторов. В закрытых распределительных устройствах возможно, по-видимому, вообще обойтись без фарфоровой изоляции, расположив поляроид 3 и кристалл 4 непосредственно на шинах вы-

сокого напряжения, а приемное устройство на земле.

Применение полупроводниковых источников света. Принципиальная схема такого трансформатора представлена на рис. 5. Полупроводниковый источник света 1 подключен ко вторичной обмотке 2, намотанный на небольшой магнитопровод 3, первичной обмоткой является шина 4. Под действием протекающего по вторичной обмотке тока на источник 1 возникает луч света, который попадает на фотоэлемент, соединенный с усилителем 6. Получаемая при этом сила света достаточна для работы такого устройства при расположении фотоэлемента на расстоянии 10—15 м от источника [Л. 8].

Изоляцией трансформатора является колонка полных фарфоровых изоляторов. Вес такого трансформатора от 3 до 10 раз меньше веса обычных трансформаторов тока на одинаковые параметры.

Полупроводниковые источники света могут быть использованы для создания трансформаторов постоянного тока.

Использование радиопередающих и приемных устройств. Радиопередающее устройство устанавливается на шинах высокого напряжения (или соответствующих частях аппаратов), а приемное на потенциале земли. Развитие радиоэлектроники позволяет создать надежные и малогабаритные приемники и передатчики. В этом случае отпадает надобность во внешней изоляции. Сложность создания такого устройства заключается в трудности отстройки от различных помех.

Другие методы измерения тока. Для измерения тока могут быть использованы электродинамические силы, возникающие в специально выполненной обмотке при прохождении по ней тока.

Оптико-электронные трансформаторы напряжения основаны на изменении показателя преломления поляризованного света при прохождении света через электрооптическое вещество под действием электрического поля (эффект Керра или эффект Поккельса). Принципиальная схема оптико-электронного трансформатора напряжения представлена на рис. 6 [Л. 9]. Луч света от источника 1, установленного на земле, проходит через поляризатор 2, оптическую фазовую пластину 3, ячейку Поккельса 4, анализатор 5, призмы 6 и попадает на фотоприемник 7. Фототок усиливается. К выходным зажимам усилителя 8 подключается вольтметр.

Изменение показателей преломления вещества ячейки Поккельса пропор-

ционально приложенному напряжению. Напряжение на ячейку Поккельса подается от делителя напряжения 9.

Комплектные распределительные устройства. Огромное развитие как по конструкциям, так и по объему производства должны получить крупноблочные типовые электроустановки — комплектные распределительные устройства (КРУ) для напряжений до 220 кВ и выше.

В качестве изоляции в КРУ применяется атмосферный воздух. Замена воздуха более совершенной изоляцией — твердой (для ошиновки) или газовой (SF_6) дает возможность получить исключительно компактные и высоконадежные конструкции КРУ. Это позволяет вместе с применением специальной малогабаритной совмещенной аппаратуры уменьшить объем ячейки КРУ в 2—3 раза. Принципиальные и технико-экономические преимущества герметизированных КРУ с элегазовой изоляцией настолько очевидны, что к проектированию их следует приступить безотлагательно [Л. 10].

Ближайшие перспективы развития аппаратостроения (1970—1980 гг.) можно представить в следующем виде.

Выключатели:

- постепенное сокращение дальнейших разработок баковых масляных выключателей на все ступени напряжений;

- постепенное свертывание разработок по малогабаритным выключателям большой мощности, в том числе генераторных;

- завершение разработки и освоение новых серий воздушных выключателей, дальнейшее повышение давления до 50—70 атм, применение глушителей;

- увеличение токов отключения до 180—200 кА для генераторных выключателей до 70—80 кА для остальных;

- рост номинальных токов до 30 кА (с использованием принудительного охлаждения);

- интенсивное развертывание разработок серий синхронных выключателей с элегазом на все ступени напряжений;

- развитие работ по созданию и организации серийного выпуска мощных вакуумных выключателей с синхронным отключением и включением на все ступени напряжений;

- развитие работ по электромагнитным выключателям.

Другие виды аппаратов:

- создание новых серий выключателей нагрузки, отделителей и короткозамыкателей (элегазовых и вакуумных) на 35 кВ и выше;

- развертывание разработок и освоение КРУ со специальной совмещенной аппаратурой, в том числе герметизированных КРУ с элегазовой изоляцией на 10—220 кВ и выше; постепенное свертывание выпуска КРУ обычного исполнения с серийной аппаратурой;

- сокращение выпуска аппаратуры «россыпью» по мере роста выпуска КРУ новых типов;

- разработка и освоение современных закрытых шинопроводов с принудительным охлаждением и специальной встроенной аппаратурой для них на номинальные токи по шкале для генераторных выключателей, в том числе с концентрическим распо-

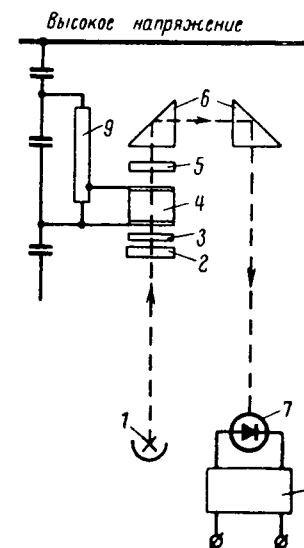


Рис. 6. Принципиальная схема оптико-электронного трансформатора напряжения.

ложением шин (по предложению проф. В. Б. Романовского);

создание новых комплексов аппаратуры для сверхмощных генераторов (более 1 000 Мвт).

Прогнозирование более отдаленных перспектив развития электроаппаратостроения представляет существенные трудности, поскольку оно не является автономной отраслью промышленности. Очевидно, что направление развития и прогресс этой отрасли неотделимы от развития энергетического машиностроения и системной энергетики в целом. Как известно, наметились следующие важнейшие направления в развитии энергетики, которые могут кардинально изменить дальнейший путь развития электрической аппаратуры:

- 1) развитие атомных электростанций;
- 2) прямое преобразование тепловой энергии в электрическую (МГД-генераторы и др.) с передачей энергии постоянным током или с преобразованием постоянного тока в переменный;
- 3) передача электроэнергии по сверхпроводящим кабельным линиям.

Если развитие атомных станций будет опережать развитие станций с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую, то атомные станции могут строиться непосредственно у мест потребления электроэнергии. В этом случае вопрос о передаче электроэнергии на большие расстояния в значительной степени будет снят. Следовательно, напряжения 1 000—1 200 кВ будут нужны только для межсистемных связей.

Станции с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую будут строиться на месте добычи дешевого топлива, а это может быть на значительном расстоянии от потребителей электроэнергии. Передача энергии от таких станций может осуществляться по сверхпроводящим кабельным линиям или по обычным воздушным линиям. Если такие станции будут быстро развиваться и передача энергии от них будет производиться по сверхпроводящим кабельным линиям, то перед аппаратостроителями возникнут сложнейшие задачи построения аппаратов на чрезвычайно большие номинальные токи (при относительно невысоком напряжении), причем коммутация рабочих и особенно аварийных токов в таких цепях также исключительно усложнится (постоянный ток).

В отличие от силовых трансформаторов и кабелей для аппаратов вряд ли окажется целесообразным применение глубокого охлаждения до состояния сверхпроводимости, так как тепловые потери в аппаратах неизмеримо меньше.

Однако не подлежит сомнению, что аппараты с номинальными токами в десятки и сотни килоампер не могут быть созданы без применения интенсивного охлаждения (водой или спецжидкостями), и работы в этой области должны непрерывно развиваться.

Принцип дуговой коммутации переменного тока со временем, вероятно, полностью отомрет. Синхронная коммутация является промежуточной вехой на этом пути. Не исключено, что на смену выключателям придут управляемые полупроводниковые вентили (типа тиристоров).

Все указанные выше научно-технические проблемы нового десятилетия глубоко интересуют и волнуют нашу электротехническую общественность. Всестороннее обсуждение этих проблем с участием работников проектно-монтажных, эксплуатационных, научно-исследовательских и производственных организаций предполагается провести на предстоящем VI отраслевом научно-техническом совещании по высоковольтному аппаратостроению, организуемом Центральным правлением НТО энергетики и электротехнической промышленности совместно с заинтересованными министерствами.

Литература

1. Гусев С. А., Очерки по истории развития выключателей переменного тока, Госэнергоиздат, 1958.
2. Гохберг Б. М., Исследование электрических свойств газов, «Электричество», 1941, № 2.
3. Александров Г. Н. и др., О выборе следующей после 750 кВ ступени напряжения электропередач переменного тока, «Электротехника», 1967, № 7.
4. Буткевич Г. В. и др., Синхронизированное отключение цепей переменного тока высокого напряжения, «Электричество», 1969, № 1.
5. Буткевич Г. В. и др., Наибольшее допустимое время расхождения контактов воздушных выключателей для синхронизированного отключения, «Электричество», 1969, № 8.
6. Голдобинский Г. В., Применение эффекта Фарадея для измерения токов, «Электричество», 1956, № 4.
7. Голдобинский Г. В., Электрооптические методы и аппаратура для измерения токов и напряжений, «Электричество», 1963, № 4.
8. Афанасьев В. В. и др., Оптико-электронный трансформатор тока высокого напряжения, «Электричество», 1969, № 11.
9. Красина А. Д. и др., Электрооптическое устройство для измерения и осциллографирования напряжений, Авторское свидетельство № 240836, «Бюлл. изобр.», 1969, № 13.
10. Строкина С. С., Области применения различных типов распределительных устройств 110 кВ в ФРГ, «Энергохозяйство за рубежом», 1968, № 4.

[5.1.1970]



Анализ погрешности при решении с помощью ЦВМ задач оптимального распределения нагрузок

Доктор техн. наук, проф. В. А. ВЕНИКОВ,
инженеры Б. И. ГОЛОВИЦЫН, В. Д. КОВАЛЕВ,
И. С. РОКОТЯН и канд. техн. наук, доц. Д. А. ФЕДОРОВ

Московский энергетический институт

При нахождении оптимального распределения нагрузок¹ необходимо учитывать, что в мощных энергосистемах минимизируемая функция обычно оказывается весьма пологой в окрестности оптимального решения². С другой стороны, исходная информация о параметрах энергосистемы и ее режима содержит погрешности, природа которых определяется как разрешающей способностью средств сбора, передачи и обработки информации, так и стохастическим характером изменения отдельных исходных данных. Следует также иметь в виду, что при реализации результатов расчета¹ в энергосистеме возникает погрешность, значение которой, по-видимому, не меньше значения погрешности исходных данных. Одновременный учет пологости целевой функции вблизи минимума, погрешностей решения, найденных с учетом неточности исходной информации, а также погрешностей реализации результатов расчета в системе, позволяет сделать вывод о том, что существует область практически равноэкономичных режимов.

Влияние погрешности исходной информации на точность решения задачи оптимального распределения мощностей было рассмотрено в [Л. 1—4]. Однако окончательные выводы о значении экономического эффекта, получаемого при решении данной задачи, могут быть сделаны только после сопоставления как погрешностей метода, так и погрешностей исходной информации и реализации результатов расчета.

В данной статье предлагается методика анализа погрешностей решения на ЦВМ задачи экономического распределения нагрузок между станциями. Вопрос об оценке значения погрешности реализации результатов расчета в энергосистеме не является предметом рассмотрения.

При анализе полагаем, что суммарная погрешность решения задачи на ЦВМ состоит из методической погрешности и погрешности, вызванной неточностью исходной информации. Под методической погрешностью понимается погрешность, вносимая упрощенным математическим описанием, а также остаточная погрешность, обусловленная обрывом итерационного процесса. Следует иметь

¹ Здесь под оптимальным понимается такое распределение нагрузок между станциями (тепловыми) энергетической системы, при котором обеспечивается минимум суммарного расхода условного топлива (или его стоимости в денежном выражении) при обеспечении электроэнергией необходимого качества всех потребителей.

² Кривизна минимизируемой функции зависит от параметров системы и ее режима и, главным образом, от крутизны расходных характеристик агрегатов вблизи оптимальных значений мощностей. Как показывают расчеты, в мощных энергосистемах с крупными агрегатами (100 Мвт и более) минимизируемая функция весьма пологая вблизи экстремума.

в виду, что помимо указанных погрешностей при проведении расчетов на ЦВМ возникает погрешность, обусловленная разрядностью машины. Однако она оказывается много меньше указанных выше двух основных составляющих суммарной погрешности решения и в дальнейшем рассмотрении не учитывается.

Рассмотрим допустимость упрощений в методике оптимального распределения активных мощностей по принципу равенства удельных приростов расходов топлива с учетом потерь активной мощности в сетях на примере энергосистемы, приведенной на рис. 1. Упрощения будем вносить в расчет потерь и приростов потерь активной мощности в сетях, которые определяются по формуле потерь [Л. 5]. Если составляющая погрешности, обусловленная принятыми допущениями выбранного метода по крайней мере на порядок меньше, чем составляющая погрешности исходных данных, то в этом случае практически нужно считать точность используемого метода расчета достаточной. Очевидно, что в таком случае при необходимости повысить точность решения необходимо прежде всего уменьшить погрешности исходной информации применением более совершенных технических средств.

В МЭИ разработана программа оптимального распределения активных нагрузок для ЦВМ «Урал-2», реализующая вышеупомянутый метод расчета. В этой программе характеристики удельных приростов задаются линейными уравнениями вида

$$\varepsilon_i = b_i + 2c_i P_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots).$$

Анализируется погрешность, возникающая при использовании номинальных и действительных значений напряжений в формуле потерь. В табл. 1 приведены оба варианта коэффициентов потерь для исследуемой энергосистемы.

Погрешность метода, которая в данном случае может быть классифицирована как систематическая, определяется проведением сопоставительных

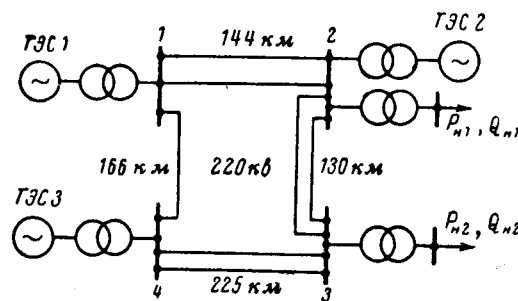


Рис. 1. Схема энергосистемы.

Таблица 1

Расчетное выражение	B_{ij}						
	B_{11}	B_{13}	B_{14}	B_{31}	B_{33}	B_{34}	B_{41}
$B_{ij} = \frac{R_{ij}}{ \dot{U}_i \dot{U}_j }$	$1,458 \cdot 10^{-4}$	$0,565 \cdot 10^{-4}$	$0,292 \cdot 10^{-4}$	$0,565 \cdot 10^{-4}$	$1,785 \cdot 10^{-4}$	$0,929 \cdot 10^{-4}$	$0,292 \cdot 10^{-4}$
$B_{ij} = \frac{R_{ij}}{U_n^2}$	$1,725 \cdot 10^{-4}$	$0,670 \cdot 10^{-4}$	$0,318 \cdot 10^{-4}$	$0,670 \cdot 10^{-4}$	$2,111 \cdot 10^{-4}$	$1,0105 \cdot 10^{-4}$	$0,318 \cdot 10^{-4}$
$B_{ij} = \frac{R_{ij}}{ \dot{U}_i \dot{U}_j }$	B_{43}	B_{44}					
	$0,929 \cdot 10^{-4}$	$1,315 \cdot 10^{-4}$					
$B_{ij} = \frac{R_{ij}}{U_n^2}$	$1,0105 \cdot 10^{-4}$	$1,438 \cdot 10^{-4}$					

расчетов по эталонному методу и методу, точность которого исследуется при одних и тех же исходных данных. В табл. 2 приведены результаты такого сопоставления.

За эталонное решение ввиду простоты энергосистемы рис. 1 принимаются значения мощностей электростанций и расходы топлива в энергосистеме, соответствующие минимуму целевой функции

Таблица 2

Вариант задания характеристик ТЭС	Сопоставляемые параметры	Эталонные значения, найденные по целевой функции	Расчет коэффициентов потерь по действительным напряжениям	Расчет коэффициентов потерь по номинальным напряжениям	Расчет без учета потерь в сетях
I	$P_1, \text{Мвт}$ $P_2, \text{Мвт}$ $P_3, \text{Мвт}$ $\pi, \text{Мвт}$	150 ± 5 190 ± 5 $196,1 \pm 5$ $11,1$	149,82 188,66 197,54 10,9	147,56 193,64 195,03 12,97	165 $159 + \pi$ 201 0
	По расчету потокораспределения $\pi, \text{Мвт}$	11,1	11,02	11,28	12,7
	$\Sigma T_i(P_i), \text{т у. т/ч}$	$150,109 \pm \pm 0,026$	150,094	150,162	150,629
	$\Delta_{\text{мет}}, \text{т у. т/ч}$	—	—	0,053	0,520
II	$P_1, \text{Мвт}$ $P_2, \text{Мвт}$ $P_3, \text{Мвт}$ $\pi, \text{Мвт}$	185 ± 5 100 ± 5 $256,2 \pm 5$ $16,2$	186,1 99,53 255,57 13,4	183,97 103,58 253,65 19,73	188 $93 + \pi$ 244 0
	По расчету потокораспределения $\pi, \text{Мвт}$	16,2	16,2	16,2	16,85
	$\Sigma T_i(P_i), \text{т у. т/ч}$	159,433	159,488	159,550	160,035
	$\Delta_{\text{мет}}, \text{т у. т/ч}$	—	0,055	0,127	0,602

Примечание. ТЭС 2 является балансирующей.

[Л. 6]. В рассматриваемом случае эталонные значения мощностей определены с точностью $\pm 5 \text{ Мвт}$. В связи с этим эталонные значения расходов топлива в энергосистеме также имеют некоторую погрешность, которая может быть оценена анализом значений целевой функции в точках, соседних с оптимальным значением. В табл. 2 указаны полученные таким образом погрешности эталонных значений расходов топлива в энергосистеме и мощностей электростанций. Для оценки систематической погрешности такой методики расчеты по эталонному методу и методом, точность которых исследуется, выполняются при детерминированном задании исходных данных. Для исследуемой энергосистемы рассматривались два варианта задания характеристик удельных приростов, в первом из которых характеристики удельных приростов станций имеют малую крутизну. Во втором варианте характеристика удельных приростов ТЭС-2 значительно круче характеристик удельных приростов остальных станций (рис. 2). Для оценки влияния потерь активной мощности на полученное оптимальное решение, графически выполнены расчеты оптимального распределения активных мощностей без учета потерь активной мощности в сетях. Для режимов, найденных как оптимальные по рассматриваемым упрощенным методам, выполнены расчеты потокораспределения. Такие расчеты позволяют определить насколько потери, вычисленные по формуле потерь, отличаются от точного значения потерь в найденном как оптимальный режим, а также определить точное значение мощности балансирующей станции. При вычислении суммарных расходов топлива в энергосистеме в режимах, найденных как оптимальные, используется значение мощности балансирующей станции, полученное из расчета потокораспределения.

Данные табл. 2 позволяют оценить методическую погрешность, возникающую за счет упрощений в определении коэффициентов потерь для рассматриваемой энергосистемы. Как следует из анализа данных табл. 2, наиболее точные результаты получаются при использовании коэффициентов потерь, вычисленных по действительным значениям

напряжений³. В этом случае методическая погрешность практически равна нулю. Для исследуемой энергосистемы также невелика и методическая погрешность, вносимая расчетом коэффициентов потерь по номинальным напряжениям ($U_n = 220$ кВ). Ее значение в этом случае составляет для первого варианта задания характеристик 0,035% от $\min \Sigma T_i(P_i)$ и 0,08% от $\min \Sigma T_i(P_i)$ для второго варианта. При расчете оптимального распределения мощностей без учета потерь активной мощности в сетях появляется значительно большая методическая погрешность. В первом варианте она составляет 0,346% от $\min \Sigma T_i(P_i)$, а во втором варианте — 0,391% от $\min \Sigma T_i(P_i)$ *.

Подобная оценка методических погрешностей, обусловленных применением тех или иных допущений, является необходимой, но недостаточной для выбора метода расчета в условиях эксплуатации конкретных энергосистем. Судить о допустимости тех или иных упрощений можно только после оценки составляющей суммарной погрешности решения, вызванной неточностью задания исходной информации, и сопоставления с ней составляющей погрешности метода.

Оценим погрешность решения, возникающую при случайных отклонениях значений характеристик удельных приростов станций от их действительных значений. При проведении расчетов предполагается, что известны некоторые «идеальные» характеристики удельных приростов станций, погрешность которых равна нулю. В расчетах оптимального распределения активных мощностей используются некоторые случайные значения характеристик удельных приростов, которые лежат в зоне, определяемой предельной погрешностью $\pm 5\%$, причем предполагается, что математические ожидания значений этих характеристик совпадают с идеальными значениями. При этом предполагается, что погрешности характеристик удельных приростов станций имеют нормальный закон распределения. С помощью метода статистических испытаний можно выбрать случайные реализации значений характеристик удельных приростов для каждой ТЭС системы, не выходящие за границы зоны, определяемой предельной погрешностью. Для каждой случайной реализации значений характеристик удельных приростов станций по программе расчета оптимального режима при детерминированном задании исходных данных определяются мощности, которые являются оптимальными при заданных характеристиках ТЭС. Очевидно, что установка этих мощностей на станциях энергосистемы приведет к перерасходу топлива, поскольку в действительности ТЭС обладает характеристиками удельных приростов, отличными от используемых в расчетах. Значение перерасхода топлива в энергосистеме может быть найдено как разность расходов топлива в режиме, найденном

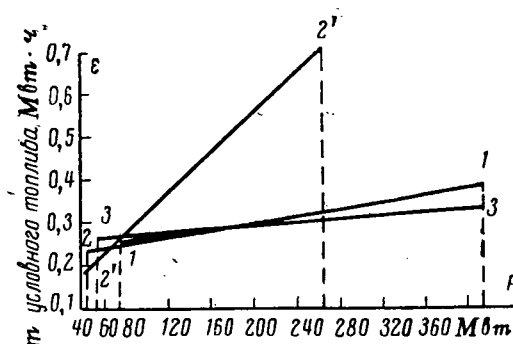


Рис. 2. Характеристики удельных приростов станций.

как оптимальный по случайным значениям характеристик удельных приростов, и расхода топлива в действительно оптимальном режиме при идеальных характеристиках ТЭС. Для вычисления обоих значений расходов топлива в системе должны быть использованы идеальные характеристики ТЭС. Проведение большого числа расчетов оптимального распределения мощностей при случайных реализациях характеристик ТЭС позволяет найти многомерный закон распределения по вероятности оптимальных мощностей ТЭС. Наиболее полное представление о возможном значении перерасхода топлива в системе, возникающего при отклонении расчетной характеристики удельных приростов ТЭС от действительной, можно получить с помощью построения эллипсоидов рассеивания (эллипсоидов равной плотности вероятности). Центр эллипсоида рассеивания определяется математическими ожиданиями оптимальных значений мощностей ТЭС системы. Разность расхода топлива, соответствующего поверхности уровня целевой функции, которая касается извне эллипсоида рассеивания и расхода топлива в действительно оптимальном режиме, соответствующем минимуму целевой функции, дает значение максимального перерасхода топлива, определяемого обеими составляющими погрешностями решения с той вероятностью, для которой построен эллипсоид рассеивания. Для того чтобы выделить погрешность решения, вызванную только случайными ошибками исходных данных, из суммарной погрешности решения необходимо вычесть значение методической погрешности.

Направления главных осей эллипсоидов рассеивания определяются с помощью корреляционных моментов. Известно, что в том случае, когда случайные величины являются независимыми, главные оси эллипсоидов рассеивания располагаются параллельно осям независимых переменных [Л. 7]. Для случайных величин, подчиняющихся нормальному закону распределения, какими являются оптимальные мощности ($n-1$) ТЭС энергосистемы, содержащей n ТЭС, независимость эквивалентна некоррелированности. В этой связи для определения направления главных осей эллипсоидов рассеивания матрицу корреляционных моментов необходимо привести к диагональному виду. Такое преобразование может быть выполнено путем определения собственных значений матрицы. Собственные векторы, соответствующие различным собственным значениям, ортогональны между собой и вдоль них

³ Эти значения напряжений определялись заранее в расчетах потокораспределения энергосистемы для режима, близкого к оптимальному.

* В тех случаях, когда энергосистема содержит длинные и сильно нагруженные линии передач, используемая формула для коэффициентов потерь приведет к появлению значительно большей по значению методической погрешности, соизмеримой с погрешностью, вызываемой неточностью исходных данных.

направлены новые оси координат. Матрица корреляционных моментов является симметричной, действительной и положительно определенной, а ее собственные значения есть действительные числа.

В тех случаях, когда энергосистема состоит из большого числа электростанций, возможно построение отдельных сечений эллипсоида рассеивания в координатах активных мощностей электростанций. Трудоемкость такого построения возрастает с увеличением числа станций. При этом следует учитывать то обстоятельство, что в процессе оптимального распределения активные мощности значительной части электростанций оказываются зафиксированными на верхнем или нижнем пределе. Последнее приводит к существенному снижению числа необходимых сечений.

В [Л. 4] для оценки значения перерасхода топлива, возникающего из-за погрешностей исходных данных, предлагается использовать математическое ожидание перерасхода, которое представляет собой точечную оценку. Точечная оценка проще, но менее полна, чем оценка значения перерасхода топлива с помощью эллипсоидов рассеивания. При определении математического ожидания перерасходов топлива их значения, полученные в каждой случайной реализации характеристик удельных приростов, входят с различными весовыми и коэффициентами, равными частоте появления того или иного перерасхода, и такая оценка дает некоторое усредненное и наиболее вероятное значение перерасхода топлива.

В то же время каждой ТЭС в результате экспериментального определения соответствует одна расчетная характеристика удельных приростов. Может оказаться, что эта характеристика именно такова, что оценка по ее значениям приведет к наибольшему по значению перерасходу топлива. В таком случае оценка перерасхода топлива с помощью математического ожидания последнего может дать существенно меньшее значение перерасхода, чем действительный и, следовательно, возможные значения случайной погрешности окажутся невыявленными. Строго говоря, надежность точечной оценки перерасхода топлива в энергосистеме должна быть проверена для энергосистем различной сложности в широком диапазоне изменения значений параметров системы и режимов.

Проиллюстрируем предлагаемую методику оценки построением эллипсов рассеивания составляющей погрешности решения, вызванной случайными отклонениями используемых в расчетах значений характеристик удельных приростов ТЭС от действительных значений характеристик. За вероятностные характеристики экстремального решения примем математическое ожидание оптимальных значений мощностей, средние квадратичные отклонения оптимальных мощностей от их математических ожиданий, математическое ожидание минимального значения суммарного расхода топлива в энергосистеме, среднее квадратичное отклонение минимальных значений расхода топлива от его математического ожидания. Для статистической обработки результатов расчета используется программа [Л. 8]. В табл. 3 приведены значения математических ожиданий минимальных расходов топлива и средние

Таблица 3

Расчетное напряжение	Действительное		Номинальное	
	I	II	I	II
Варианты задания характеристик ТЭС				
$M[\min \Sigma T_i], \text{ м у. м/ч}$	150,16	159,385	150,879	160,520
$\sigma_T, \text{ м у. м/ч}$	1,435	1,678	1,500	1,590
$\sigma_T, \%$	0,956	1,050	0,996	0,990
$\sigma_{RT}, \text{ м у. м/ч}$	0,132	0,154	0,138	1,146
$\sigma_{RT}, \%$	0,088	0,096	0,092	0,091

квадратичные отклонения минимальных значений расходов топлива в системе от математического ожидания для обоих вариантов характеристик удельных приростов ТЭС (рис. 2) и двух модификациях коэффициентов потерь (табл. 1). Там же даются значения погрешностей в математических ожиданиях σ_{RT} , обусловленные конечным числом испытаний $N=321$. Эти значения определяются для доверительной вероятности 0,9. Математические ожидания минимальных суммарных расходов топлива в системе при учете погрешности σ_{RT} оказываются близки к минимальным значениям суммарных расходов топлива, вычисленных при решении задачи этими же методами, но при детерминированном задании «идеальных» значений исходных данных (табл. 2). Среднее квадратичное отклонение минимальных значений суммарного расхода топлива от математического ожидания последнего для небольшой энергосистемы (рис. 1) велико и во всех исследуемых вариантах близко к 1% от $M[\min \Sigma T_i]$.

Расчетами оптимального распределения активных мощностей в энергосистеме при случайных реализациях значений характеристик удельных приростов станций были получены массивы оптимальных значений их мощностей. Статистическая обработка результатов показывает, что при принятом законе распределения параметров значения оптимальных мощностей распределяются практически по нормальному закону.

В табл. 4 представлены значения математических ожиданий оптимальных мощностей в рассматриваемых вариантах расчета, а также средние квадратичные отклонения оптимальных значений мощностей электростанций от соответствующих математических ожиданий в абсолютных значениях и в процентах. Там же приводятся значения погрешностей определения математических ожиданий оптимальных мощностей (σ_{RP}), связанные с конечным числом испытаний. Значения погрешностей σ_{RP} определены для доверительной вероятности 0,9.

Погрешности σ_{RP} составляют менее 10% от соответствующих значений средних квадратичных отклонений оптимальных значений мощностей, что говорит о достаточности числа испытаний.

В рассматриваемом случае независимые переменные — мощности P_1 и P_3 . Матрица корреляционных моментов для исследуемой системы

$$K = \begin{vmatrix} D_{P_1} & K_{P_1 P_3} \\ K_{P_3 P_1} & D_{P_3} \end{vmatrix},$$

где D_{P_1} , D_{P_3} — дисперсии оптимальных мощностей P_1 и P_3 ;

$K_{P_1} = K_{P_3 P_1}$ — корреляционные моменты.

Ширина интервала $\Delta_k = \frac{P_k^M P_k^m}{l}$ при $l = 12$, где l — число интервалов; k — номер станции.

Корреляционный момент $K_{P_1 P_3}$ определяется из выражения [Л. 7]:

$$K_{P_1 P_3} = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (P_{1i} - M[P_1])(P_{3j} - M[P_3]) p_{ij},$$

где P_{1i} — среднее значение мощности ТЭС 1 в i -м интервале; P_{3j} — то же для ТЭС 3 в j -м интервале; p_{ij} — вероятность одновременного появления значений оптимальных мощностей P_{1i} и P_{3j} .

Для рассматриваемой системы направление главных осей эллипса рассеивания по отношению к осям независимых переменных P_1 и P_3

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2K_{P_1 P_3}}{D_{P_3} - D_{P_1}}.$$

Главные средние квадратичные отклонения оптимальных мощностей σ_ξ и σ_η

$$\sigma_\xi = \sqrt{D_{P_3} \cos^2 \alpha + K_{P_3 P_1} \sin 2\alpha + D_{P_1} \sin^2 \alpha},$$

$$\sigma_\eta = \sqrt{D_{P_3} \sin^2 \alpha - K_{P_3 P_1} \sin 2\alpha + D_{P_1} \cos^2 \alpha}.$$

Результаты расчета для исследуемой энергосистемы приведены в табл. 5. Из сопоставления значений σ_ξ и σ_η для рассматриваемых вариантов задания характеристик следует, что размеры эллипсов рассеивания несколько уменьшаются при увеличении крутизны характеристик удельных приростов станций. В то же время при проведении расчетов с одними и теми же исходными данными, но различными способами расчета коэффициентов потерь, размер эллипсов практически не изменяется. Это обстоятельство можно объяснить тем, что погрешности метода и погрешности исходных данных слабо коррелированы. На рис. 3 и 4 пред-

Таблица 4

Расчетное напряжение	Действительное		Номинальное	
	I	II	I	II
Вариант задания характеристик ТЭС				
$M[P_{1 \text{ опт}}], \text{ Мвт}$	149,800	166,12	147,560	183,90
$M[P_{2 \text{ опт}}], \text{ Мвт}$	188,650	100,75	195,686	103,06
$M[P_{3 \text{ опт}}], \text{ Мвт}$	197,570	255,35	195,060	253,58
$\sigma_{P_1}, \text{ Мвт}$	13,21	11,52	12,99	11,3
$\sigma_{P_2}, \text{ Мвт}$	9,109	5,040	7,902	4,830
$\sigma_{P_3}, \text{ Мвт}$	14,80	12,63	14,61	12,1
$\sigma_{P_1}, \%$	8,82	6,30	8,80	6,08
$\sigma_{P_2}, \%$	4,83	5,04	4,05	4,68
$\sigma_{P_3}, \%$	7,50	5,00	7,50	4,74
$\sigma_{RP_1}, \text{ Мвт}$	1,210	1,023	1,045	1,038
$\sigma_{RP_2}, \text{ Мвт}$	0,834	0,462	0,725	0,443
$\sigma_{RP_3}, \text{ Мвт}$	1,355	1,158	1,339	1,11
$\sigma_{RP_1}, \%$	0,808	0,557	0,708	0,558
$\sigma_{RP_2}, \%$	0,434	0,459	0,371	0,429
$\sigma_{RP_3}, \%$	0,687	0,457	0,687	0,434

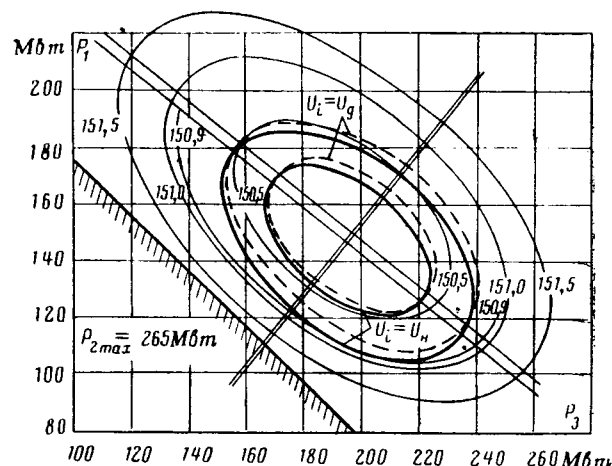


Рис. 3. Эллипсы рассеивания оптимальных мощностей для первого варианта характеристик удельных приростов ТЭС (прямые 1—1, 2—2, 3—3 рис. 2).

$$\text{— при } B_{ij} = \frac{R_{ij}}{U_{ij}^2}; \text{ --- при } B_{ij} = \frac{R_{ij}}{|\dot{U}_i| |\dot{U}_j|}.$$

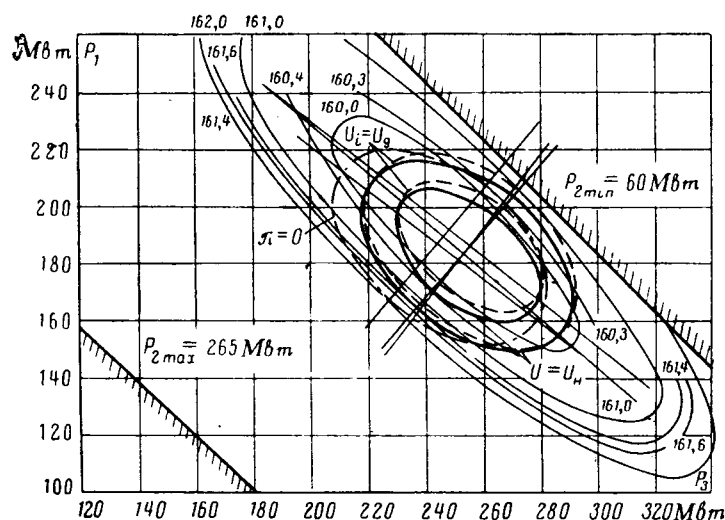


Рис. 4. Эллипсы рассеивания оптимальных мощностей для второго варианта характеристик удельных приростов ТЭС (прямые 1—1, 2—2, 3—3 рис. 2).

$$\text{— при } B_{ij} = \frac{R}{U_{ij}^2}; \text{ --- при } B_{ij} = \frac{R_{ij}}{|\dot{U}_i| |\dot{U}_j|};$$

--- при $\pi = 0$.

ставлены эллипсы рассеивания оптимальных значений мощностей P_1 и P_3 , соответствующие вероятностям $0,997 (\pm 3\sigma_P)$ и $0,954 (\pm 2\sigma_P)$. Там же нанесены линии уровней целевых функций, найденных при идеальных значениях характеристик удельных приростов ТЭС. Такое построение позволяет оценить значение перерасхода топлива в энергосистеме, к которому может привести погрешность упрощенного метода и случайные отклонения значений расчетных характеристик удельных приростов ТЭС.

Из рис. 3 видно, что при использовании номинального напряжения для расчетов коэффициентов потерь в исследуемой энергосистеме с вероятностью, практически равной единице, максимальный перерасход топлива не превысит $\Delta T \leq 150,9 - 150,109 =$

$=0,791$ т. у. т./ч, что составляет 0,526% от эталонного значения минимального суммарного расхода топлива $\min \Sigma T_i(P_i) = 150, 109$. Для второго варианта характеристик удельных приростов ТЭС и при тех же условиях расчета коэффициентов потерь (рис. 4) максимальный перерасход топлива в системе с вероятностью 0,997 не превысит

$$\Delta T \leq 161,4 - 159,433 = 1,967 \text{ т. у. т./ч,}$$

что составляет 1,235% от $\min \Sigma T_i(P_i) = 159,433$ т. у. т./ч. Оценим значение максимального перерасхода при меньшей достоверной вероятности, например, для вероятности 0,954. В этом случае для первого варианта задания характеристик (рис. 3)

$$\Delta T \leq 150,5 - 150,109 = 0,391 \text{ т. у. т./ч,}$$

что составляет уже 0,194% от $\min \Sigma T_i(P_i)$.

Для второго варианта задания характеристик (рис. 4)

$$\Delta T \leq 160,3 - 159,433 = 0,867 \text{ т. у. т./ч}$$

или 0,544% от $\min \Sigma T_i(P_i)$.

Приведенные оценки максимального перерасхода даны для случая, когда для определения коэффициентов потерь используются номинальные напряжения. Аналогичные вычисления могут быть выполнены и для случая, когда в расчетах коэффициентов потерь используются действительные напряжения, а также для случая, когда расчет оптимального распределения выполняется без учета потерь в сетях. В табл. 6 приведены суммарные погрешности решения, а также ее составляющие, отнесенные к достоверным вероятностям 0,997 и 0,954.

Размеры эллипсов рассеивания, отнесенные к определенной вероятности, зависят только от погрешности исходных данных и не зависят практически от методики расчета (табл. 5). В то же время значение перерасхода топлива, обусловленного случайными погрешностями исходных данных, различаются в зависимости от метода расчета даже при одних и тех же вариантах задания характеристик удельных приростов станций энергосистемы. Это объясняется прежде всего тем, что минимум целевой функции располагается несимметрично относительно линий уровня.

На основе данных табл. 6 можно сопоставить составляющие погрешности решения задачи и сделать выводы о мерах повышения точности получаемого результата, а также оценить возможность

Таблица 5

Расчетное напряжение	Вариант задания характеристик ТЭС	$K_{P_1 P_2}$ Мет ²	α , град	D_{ξ} , Мет ²	D_{η} , Мет ²	σ_{ξ} , Мет	σ_{η} , Мет
Действительное	I	—88,0	142°	285,7	105,0	17,0	10,30
	II	—65,6	141° 50'	211,8	78,6	14,5	8,85
Номинальное	I	—88,0	142°	285,7	105,0	17,0	10,30
	II	—61,5	139° 25'	197,9	73,7	14,0	8,40

Таблица 6

Достоверная вероятность	Вариант задания характеристик ТЭС	Расчетное напряжение	Суммарная погрешность решения		Методическая погрешность		Погрешность из-за неточности исходных данных	
			т. у. т./ч	%	т. у. т./ч	%	т. у. т./ч	%
0,997	I	действительное номинальное	0,591	0,393	0	0	0,591	0,393
			0,791	0,526	0,053	0,0353	0,738	0,492
	II	действительное номинальное	1,567	0,985	0,055	0,0945	1,512	0,949
			1,967	1,235	0,127	0,0785	1,840	1,153
0,954	I	действительное номинальное	0,291	0,194	0	0	0,291	0,194
			0,391	0,245	0,053	0,0353	0,338	0,225
	II	действительное номинальное	0,867	0,544	0,055	0,0345	0,812	0,510
			1,167	0,734	0,127	0,0785	1,040	0,653
0,997	II	Расчет без учета потерь в сетях	2,467	1,545	0,602	0,378	1,865	1,170

применения тех или иных упрощений в расчетах для исследуемой энергосистемы. Кроме того, анализ табл. 6 позволяет сделать заключение о том, что во всех рассмотренных вариантах погрешность решения, вызванная случайными отклонениями значений характеристик удельных приростов станций, превышает методическую погрешность. Отсюда следует, что для повышения точности решения необходимо прежде всего уменьшить погрешности задания исходных данных (в рассматриваемом примере — погрешности задания значений характеристик удельных приростов станций). Выводы о правомерности тех или иных допущений или упрощений в математическом описании можно сделать, оценив значение перерасхода топлива, возникающего в результате упрощений. Так, если считать, что эффект от экономичного распределения мощностей может составлять 1% от значения суммарного расхода топлива в энергосистеме, то в таком случае в энергосистеме (рис. 1), обладающей более крутой характеристикой удельных приростов станций ТЭС 2 (рис. 2), максимальный перерасход топлива при учете обеих составляющих погрешности решения превышает эффект от экономичного распределения⁴. Если электростанции этой же энергосистемы обладают более пологими характеристиками удельных приростов (рис. 2), перерасход топлива в системе,

⁴ В данном рассмотрении полагается, что погрешность реализации результатов расчета меньше погрешности исходных данных. В противном случае при оценке экономического эффекта от оптимизации должна также учитываться погрешность реализации.

ность его является чрезмерной и возможно применение более грубых способов расчета для данной задачи.

4. Анализ значений погрешностей, вызванных неточностью исходных данных необходим для обоснования выбора технических параметров средств сбора, передачи и обработки исходной информации о параметрах энергосистемы и ее режима.

5. Оценки, получаемые с помощью упрощенного метода построения полных эллипсоидов рассеивания значений оптимальных мощностей электростанций, обеспечивают практически необходимую для инженерной практики точность.

Литература

1. Крутикова В. Е. и др., Влияние погрешностей в определении относительных приростов на перерасход топлива, «Электрические станции», 1960, № 2.
2. Павлов Г. М. и Кантан В. В., К вопросу точности решения задачи наимыгоднейшего распределения активных нагрузок, «Электричество», 1964, № 1.

3. Павлов Г. М. и Петрова С. С., О точности информации при оптимизации режима энергосистем, «Электричество», 1967, № 1.

4. Шаханов В. С., Метод и алгоритм «собственных» и «взаимных» частных производных от потерь в сложных электрических сетях энергосистем, Статистическая цифровая модель для исследования на ЦВМ влияния точности задания исходной информации при оптимизации режимов энергосистем, сб. «Применение вычислительной техники в энергетике», 1964.

5. Козис В. Л. и Рокотян И. С., Расчет распределения активных мощностей между станциями теплоэнергетической системы на цифровой вычислительной машине «Урал-1», Труды МЭИ, вып. 54, 1964.

6. Веников В. А. и др., Исследование стационарных режимов теплоэнергетических энергосистем с помощью динамической модели, Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1966—1967 гг., Изд. МЭИ, 1967.

7. Вентцель Е. С., Теория вероятностей, Физматгиз, 1962.

8. Веников Г. В. и Головицын Б. И., Программа для автоматической обработки статистической информации на цифровых вычислительных машинах «Урал-2» и «Урал-4», Тезисы докладов научно-технического совещания, Киев, 1968.

[12.11.1969]



УДК 621.316.925.2.001.24

Статистический расчет торможения токовых дифференциальных защит многоконцевых электроустановок¹

Канд. техн. наук Ю. И. КАРИНСКИЙ

Ростов-на-Дону

Чувствительность и селективность токовых дифференциальных защит с торможением многоконцевых электроустановок в значительной мере зависят от коэффициентов торможения. Широко распространены защиты, использующие реле с электрическим и магнитным торможением [Л. 1], у которых результирующее тормозное воздействие равно арифметической сумме тормозных воздействий, пропорциональных токам всех или части присоединений защищаемой электроустановки.

В статье описан статистический метод расчета торможения токовых дифференциальных защит, у которых результирующее тормозное воздействие равно арифметической сумме тормозных воздействий всех или части присоединений защищаемой электроустановки, а также метод выбора присоединений, где наиболее целесообразно устанавливать торможение при числе тормозных обмоток, меньшем числа присоединений. Расчет по предлагаемой методике проведен для защит многообмоточных трансформаторов и автотрансформаторов с реле типа ДЗТ, но описанные методы справедливы также для токовых дифференциальных защит других типов и принципов, устанавливаемых на многоконцевых электроустановках [Л. 2].

Исходные положения расчета. Строгий расчет торможения защиты должен основываться на тео-

рии статистических решений с использованием определенного критерия эффективности, например, критерия минимума среднего риска при ошибочных реакциях защиты в режимах коротких замыканий в зоне и вне зоны действия. Такой расчет требует большого объема исходной информации: законов распределений случайных функций аргумента расстояния токов коротких замыканий всех видов на всех присоединениях в зоне и вне зоны с учетом режимов работы питающих систем, законов распределений случайных величин переходных сопротивлений в месте коротких замыканий, соотношений средних экономических потерь от неправильных реакций защиты при коротких замыканиях в зоне и вне ее. Получение подобной статистической информации затруднительно, особенно для проектируемых электроустановок, поэтому целесообразно применение упрощенных методов расчета торможения, использующих минимум статистической информации. В описываемом методе расчета такой информацией являются законы распределения случайного значения рабочей н. с. дифференциального реле при расчетных режимах внешних коротких замыканий на всех присоединениях. Внешние короткие замыкания на присоединениях могут быть различных видов и в различных точках. Учет всех этих режимов затруднителен, поэтому для упрощения приемем за расчетные внешние повреждения трехфазные короткие замыкания в начале присоеди-

¹ В порядке обсуждения.

динений при отсутствии переходных сопротивлений и реальных максимальных режимах работы системы.

Каждому случайному событию — расчетному внешнему короткому замыканию на каждом присоединении защищаемой электроустановки (рис. 1) соответствуют случайные значения рабочей н. с. дифференциального реле и токов всех плеч защиты, причем токи в первом приближении можно полагать неслучайными величинами. Рабочая н. с. реле состоит из неслучайной слагаемой, определяемой неточностью выравнивания токов плеч защиты и случайной слагаемой, определяемой влиянием регулирования напряжения трансформаторов и автотрансформаторов, остаточного намагничивания сердечников трансформаторов тока, нелинейного характера тока намагничивания их, различного токораспределения плеч защиты, фазных сдвигов токов плеч и других факторов. Законы распределения случайного значения рабочей н. с. дифференциального реле при всех расчетных внешних коротких замыканиях должны быть определены в результате исследования модели защиты известными методами физического или математического моделирования [Л. 3—5].

При физическом моделировании случайных процессов внешних коротких замыканий используются реальные трансформаторы тока и устройство защиты.

Вторичные токи трансформаторов тока устанавливаются согласно расчетам токов коротких замыканий во всех расчетных режимах, влияния остаточного намагничивания сердечников трансформаторов тока, изменений коэффициентов трансформации защищаемых установок, фазных сдвигов токов присоединений и других случайных факторов с учетом вероятностей всех режимов в реальных условиях. Эти вероятности приближенно могут быть определены по результатам логического анализа предполагаемых режимов работы защищаемой электроустановки и на основании статистических характеристик режимов работы подобных электроустановок.

При математическом моделировании случайные погрешности трансформаторов тока моделируются с помощью генераторов случайных сигналов [Л. 4]. Исходные параметры законов распределений случайных погрешностей определяются статистическими исследованиями реальных трансформаторов тока. Случайные значения вторичных токов трансформаторов тока в общем случае коррелированы, что желательно учитывать при моделировании. Случайные отклонения рабочей н. с. дифференциальной защиты определяются воздействиями большо-

го числа мало коррелированных случайных факторов, поэтому в первом приближении закон распределения случайной величины рабочей н. с. можно полагать нормальным.

Расчет торможения, установленного на всех присоединениях электроустановки. Расчет чисел витков тормозных обмоток дифференциальной защиты типа ДЗТ выполняется из условия равновероятной отстройки защиты от срабатываний в расчетных режимах внешних коротких замыканий на всех n присоединениях при рассчитанных числах витков рабочих обмоток и использовании характеристики минимального торможения защиты и функций распределений вероятностей случайного значения рабочей н. с. при каждом расчетном замыкании.

Отметим, что в общем случае равновероятная отстройка защиты при внешних коротких замыканиях на всех присоединениях не обеспечивает минимума общей вероятности ошибочных срабатываний защиты при всех внешних коротких замыканиях. Уменьшение этой вероятности может быть достигнуто увеличением вероятностей отстройки защиты при коротких замыканиях на присоединениях с большой вероятностью повреждений.

На рис. 2 приведены характеристики минимального торможения реле и одной из функций распределения вероятностей случайного значения рабочей н. с. реле при расчетном внешнем коротком замыкании на i -м присоединении.

Запишем условие отстройки с заданной вероятностью P для дифференциальной защиты с торможением, равным арифметической сумме тормозных н. с. всех плеч защиты при внешнем коротком замыкании на i -м присоединении:

$$H_T(Ki) = \sum_{j=1}^n w_{Tj} I_j(Ki) = H_T\{H_p(Ki)\}, \quad (1)$$

где $H_T\{H_p(Ki)\}$ — тормозная н. с., соответствующая срабатыванию защиты при минимальном торможении и рабочей н. с. $H_p(Ki)$.

Для защит, основанных на различных принципах, значение $H_T\{H_p(Ki)\}$ является абсциссой точки N , характеристики минимального торможения и имеющей ординату $H_p(Ki)$ (рис. 2).

При соблюдении (1) каждая функция распределения $F\{H_p(Ki)\}$ также является и функцией вероятности случайного события — несрабатывания защиты — аргумента $H_p(Ki)$ при внешнем коротком замыкании на i -м присоединении.

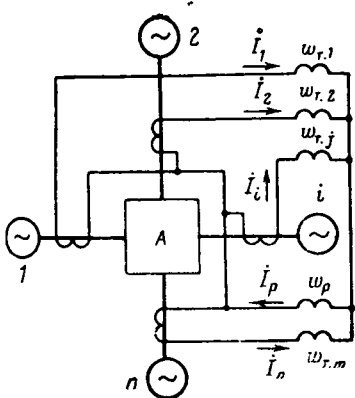


Рис. 1. Расчетная схема токовой дифференциальной защиты электроустановки А с несколькими питающими присоединениями.

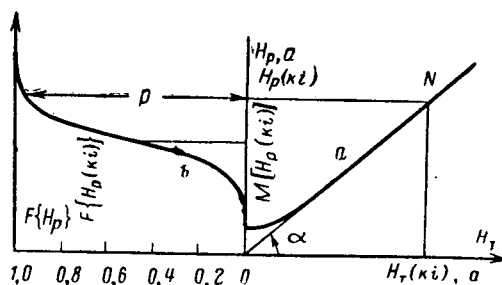


Рис. 2. Характеристики минимального торможения реле (а) и функции распределения вероятностей случайной величины рабочей н. с. реле (б).

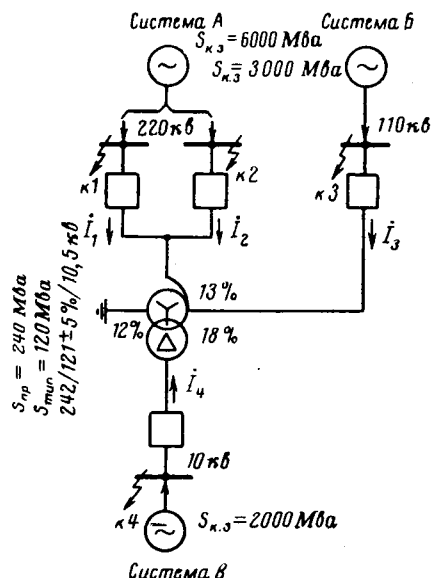


Рис. 3. Схема расчета.

в цепи 220 кВ оба выключателя нормально включены. Результаты расчета номинальных вторичных токов плеч защиты и чисел витков рабочих обмоток приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Значения для сторон		
	220 кВ	110 кВ	10 кВ
Первичные токи присоединений, a	574	1 148	13 200
Коэффициенты трансформации трансформаторов тока	1000/5	2000/5	7000/5
Соединение вторичных обмоток трансформаторов тока	Δ	Δ	Y
Вторичные токи плеч защиты, a	4,96	4,96	9,43
Числа витков рабочих обмоток	15	15	8

Результаты расчета токов плеч защиты при внешних трехфазных коротких замыканиях для максимальных режимов работы системы даны в табл. 2.

Таблица 2

Вторичные токи плеч защиты	Значения токов для расчетных точек, a			
	K1	K2	K3	K4
I_1	107	65	12,8	13,3
I_2	65	107	12,8	13,3
I_3	23,7	23,7	35	11,4
I_4	35,6	35,6	17,8	72,4

В примере предположено, что закон распределения модуля случайного значения н. с. при внешних коротких замыканиях, может быть аппроксимирован нормальным законом с параметрами, данными в табл. 3.

Таблица 3

Параметры закона распределения рабочей н. с.	Значения для расчетных точек, a			
	K1	K2	K3	K4
Математическое ожидание $M[H_p]$	150	150	24	45
Среднеквадратическое отклонение $\sigma[H_p]$	30	30	7	15

В первом приближении достаточная отстройка защиты от действия при внешних коротких замыканиях соответствует

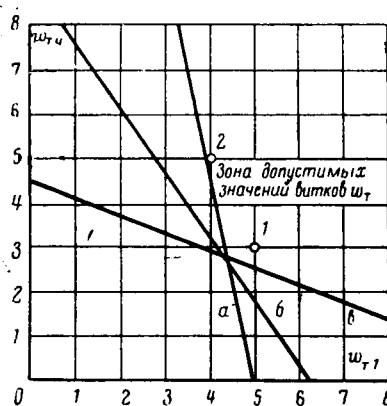


Рис. 4. Графики уравнений системы (9).

широко распространенному в теории надежности трехсигмовому отклонению случайного значения рабочей н. с.

$$H_p = M[H_p] + 3\sigma[H_p], \quad (4)$$

что для расчетных точек K1—K4 соответствует 240, 240, 45 и 90 a . При этом расчетная вероятность отстройки защиты $P = 0,5 + \Phi(3\sigma[H_p]) = 0,5 + 0,4987 = 0,9987$, (5)

где $\Phi(3\sigma[H_p])$ — функция Лапласа для нормального закона распределения случайной величины.

Число присоединений защищаемого автотрансформатора на единицу больше числа тормозных обмоток реле типа ДЗТ-3, поэтому необходим предварительный расчет торможения для выбора присоединений, на которых наиболее целесообразно установить торможение. Запишем систему уравнений тормозных н. с., соответствующих трехсигмовому отклонению рабочей н. с., с учетом углового коэффициента асимп-

тоты характеристики минимального торможения реле ДЗТ-4 [Л. 7] $\lg \alpha = 0,21$:

$$\left. \begin{aligned} 107w_{T1} + 65w_{T2} + 23,7w_{T3} + 35,6w_{T4} &= 4,77 \cdot 240; \\ 65w_{T1} + 107w_{T2} + 23,7w_{T3} + 35w_{T4} &= 4,77 \cdot 240; \\ 12,8w_{T1} + 12,8w_{T2} + 35w_{T3} + 17,8w_{T4} &= 4,77 \cdot 45; \\ 13,3w_{T1} + 13,3w_{T2} + 11,4w_{T3} + 72,4w_{T4} &= 4,77 \cdot 90. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Вследствие симметрии стороны 220 кВ $w_{T1} = w_{T2}$ и (6) преобразуется в систему из трех линейных уравнений с тремя неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} 172w_{T1} + 23,7w_{T3} + 35,6w_{T4} &= 1140; \\ 25,6w_{T1} + 35w_{T3} + 17,8w_{T4} &= 214; \\ 26,6w_{T1} + 11,4w_{T3} + 72,4w_{T4} &= 428, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

решая которую, получаем:

$$w_{T1} = w_{T2} = 4,62; \quad w_{T3} = 1,05; \quad w_{T4} = 3,75. \quad (8)$$

Исключается тормозная обмотка w_{T3} с минимальным числом витков, и составляется система неравенств для расчета тормозных обмоток w_{T1} , w_{T2} и w_{T4} с учетом $w_{T1} = w_{T2}$ и $\lg \alpha = 0,28$ для реле типа ДЗТ-3 [Л. 7]:

$$\left. \begin{aligned} 172w_{T1} + 35,6w_{T4} &> 3,57 \cdot 240 \quad (a); \\ 25,6w_{T1} + 17,8w_{T4} &> 3,57 \cdot 45 \quad (b); \\ 26,6w_{T1} + 72,4w_{T4} &> 3,57 \cdot 90 \quad (b). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В двухмерной системе координат w_{T1} и w_{T4} уравнения системы (9) описывают три прямых линии (рис. 4), точки пересечения которых отвечают частным решением всех пар уравнений. Целочисленные значения витков обмоток $w_{T1} = w_{T2}$ и w_{T4} , ограниченные слева и снизу прямыми a и b , удовлетворяют системе неравенств (9). Для данного примера расчета интерес представляют две точки 1 и 2 рис. 4, из которых выбирается оптимальный вариант, дающий наибольшую чувствительность. Расчет чувствительности защиты выполняется по общепринятому методу [Л. 6].

Литература

- Федосеев А. М., Основы релейной защиты, Госэнергоиздат, 1961.
- Каринский Ю. И., Принципы выполнения торможения в продольных дифференциальных защитах линий с ответвлениями, «Электричество», 1968, № 11.
- Веников В. А., Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики, изд-во «Высшая школа», 1966.
- Роткоп Л. Л., Статистические методы исследования на электронных моделях, изд-во «Энергия», 1967.
- Бусленко Н. П., Моделирование сложных систем, изд-во «Наука», 1968.
- Защита блоков генератор — трансформатор и генератор — автотрансформатор, Руководящие указания по релейной защите, вып. 5, изд-во «Энергия», 1963.
- Справочник по релейной защите, Под ред. М. А. Берковича, Госэнергоиздат, 1963.

[24.11.1969]

О регулировании возбуждения крупных синхронных двигателей

Канд. техн. наук И. А. ЗБОРОВСКИЙ и инж. В. Г. НАКРОХИН

Уральский политехнический институт им. С. М. Кирова

Эффективность автоматического регулирования возбуждения (АРВ) синхронных машин в определенной мере зависит от принципа ограничения токов в обмотках ротора и статора. В современных системах АРВ ограничение токов осуществляется независимо от температуры обмоток, что приводит к недоиспользованию активных материалов машины.

В статье на основе физического и математического моделирования рассматриваются ограничения температуры обмоток и задачи, решаемые с помощью жесткой отрицательной обратной связи (ЖОС) по току ротора при АРВ по отклонению и производной модуля напряжения в узле нагрузки.

Функциональная схема АРВ (рис. 1). Отклонение модуля напряжения от заданного значения на выходе измерительного органа ИО подается на операционный усилитель У1, передаточная функция которого

$$W(p) = - \left(\frac{1}{1 + T_1 p} + \frac{T_2 p}{1 + T_1 p} \right) k.$$

Значения коэффициентов регулирования по отклонению напряжения и производной этого отклонения обеспечиваются операционным усилителем У2. Соотношение между ними устанавливается резистором переменного сопротивления на входе У1.

На вход У2 подается напряжение, пропорциональное току ротора синхронного двигателя СД, выходное напряжение ограничителя температуры обмотки ротора и напряжение начальной уставки тока ротора¹.

Для улучшения динамики переходных процессов и обеспечения необходимой устойчивости введена гибкая обратная связь (ГОС) по напряжению ротора с выхода тиристорного преобразователя ТП на вход операционного усилителя У1. Тиристорный преобразователь ТП питается от трансформатора ТПП.

Исходя из предела статической устойчивости синхронного двигателя, в системе АРВ предусмотрено ограничение минимального тока возбуждения, которое осуществляется цепью ЖОС. При достижении минимального тока возбуждения происходит резкое уменьшение коэффициента обратной связи, что препятствует дальнейшему уменьшению тока. Этот принцип ограничения минимального тока может привести на пороге ограничения к автоколебаниям. С целью исключения автоколебаний предусмотрено уменьшение коэффициента регулирования по отклонению модуля напряжения в узле нагрузки путем шунтирования входа усилителя У2 транзистором Т1. При этом, как показали испытания, можно получить четкое ограничение минимального тока возбуждения.

Для эффективного использования синхронного двигателя, работающего с медленно изменяющейся

нагрузкой, в схеме предусмотрено ограничение минимального тока возбуждения в зависимости от активной составляющей тока статора в пределах, определяемых статической устойчивостью при минимальной и максимальной нагрузках на валу двигателя.

Автоматическое ограничение температуры обмоток. Технико-экономический эффект от регулирования возбуждения синхронной машины зависит от выбора принципа ограничения токов статора и ротора, определяющих превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды.

В современных системах АРВ синхронных генераторов ограничивается значение энергии, рассеиваемой в обмотке ротора, если ток возбуждения превосходит некоторое заданное значение [Л. 1]. В АРВ синхронных двигателей, описанных в [Л. 2], ограничение токов ротора и статора до номинальных производится с выдержкой времени, зависящей от значения перегрузки.

Таким образом, в этих случаях для регулирования возбуждения необходим достаточный тепловой запас. Для эффективного использования активных материалов машины в предлагаемом регуляторе температура обмоток ограничивается допустимыми заданными значениями.

Температура обмотки статора может быть ограничена с помощью известной мостовой схемы, в одно из плеч которой включено полупроводниковое термосопротивление, заложенное в паз машины [Л. 3]. Выход мостовой схемы через диод и интегрирующее устройство подается на вход У2 (рис. 1).

Температура обмотки ротора ограничивается следующим образом. На вход интегрирующего устройства подается напряжение

$$u_f - r_{fd} i_f = r_{fd} i_f \alpha \Delta \theta + \frac{d\Phi_f}{dt},$$

где r_{fd} — допустимое заданное сопротивление обмотки возбуждения, в частности, соответствующее номинальному режиму синхронного двигателя;

α — температурный коэффициент обмотки;

$\Delta \theta$ — превышение температуры обмотки возбуждения над допустимым заданным значением.

Постоянная времени интегрирующего устройства $T_{\text{и}}$ находится в пределах:

$$T_{do} \ll T_{\text{и}} \ll T_{\theta},$$

где T_{do} — постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой статорной и демферной обмотках; T_{θ} — постоянная времени нагрева обмотки возбуждения.

Условие $T_{\text{и}} \gg T_{do}$ необходимо для того, чтобы схема ограничения не влияла на переходные процессы, если температура обмотки ротора ниже заданного допустимого значения, а условие $T_{\text{и}} \ll T_{\theta}$

¹ Ограничитель температуры обмотки статора на рис. 1 не показан.

обеспечивает необходимую точность ограничения температуры.

Напряжение на выходе интегрирующего устройства через время t после начала действия схемы ограничения пропорционально

$$r_{ig} \alpha \int_0^t \Delta \vartheta_{ij} dt + \int_0^t \frac{d\psi_j}{dt} dt \approx r_{io} \alpha \int_0^t \Delta \vartheta_{ij} dt, \quad (1)$$

так как второй член значительно меньше первого. Это объясняется тем, что значение подынтегральной функции $\frac{d\psi_j}{dt}$ либо невелико, либо за достаточно большой промежуток времени $t \gg T_{do}$ меняет знак. За малое время t первый и второй члены малы. Наличие под знаком интеграла не только превышения температуры $\Delta \vartheta$, но и тока возбуждения благоприятно сказывается на ограничении температуры в переходных режимах.

Для получения достаточно большой постоянной времени используется интегрирующий усилитель УЗ, постоянная времени которого равна $k_y r C$, где k_y — коэффициент усиления усилителя постоянного тока.

Следует отметить, что при снижении напряжения на (15—20) % АРВ обеспечивает форсировку возбуждения с выдержкой времени, не зависящей от работы схем ограничения температуры обмоток машины.

Экспериментальное исследование АРВ со схемой ограничения температуры ротора было проведено на двигателе СМ-81-49,5 кат, 380 в, $\cos \varphi_n = 0.8$. Испытания при различных переходных процессах, вызванных внезапным подключением и отключением нагрузки параллельно синхронному двигателю, набросом и сбросом нагрузки на валу двигателя, показали, что превышение температуры обмотки ротора $\Delta \vartheta$ не превышает 2°C .

Жесткая отрицательная обратная связь по току ротора необходима для:

получения линейной зависимости между отклонением напряжения на входе регулятора и отклонением напряжения возбуждения в статических режимах;

получения достаточно высокого коэффициента регулирования по отклонению напряжения в переходных режимах и умеренного коэффициента регулирования в статических режимах;

поддержания постоянства первоначально уста-

Рис. 1. Функциональная схема АРВ.

СФУ — система фазово-импульсного управления преобразователем; ОУР — ограничитель угла регулирования; ИТН и ИТТ — измерительные трансформаторы напряжения, трансформатор тока; Φ_1, Φ_2, Φ_3 — сглаживающие фильтры; ДАТ — датчик активной составляющей тока статора; ОТ — ограничитель температуры обмотки ротора; СУ — сравнивающее устройство.

новленного значения тока возбуждения при изменении активного сопротивления обмотки ротора и напряжения питания тиристорного преобразователя [Л. 4];

ограничения минимального значения тока возбуждения введением в цепь ЖОС звена с нелинейной характеристикой.

В вентильных системах возбуждения входное напряжение схемы регулирования сравнивается с опорным напряжением. При изменении опорного напряжения по линейному закону среднее значение напряжения на выходе вентильного преобразователя изменяется по косинусоидальному закону в функции входного напряжения [Л. 5]. Отсутствие ЖОС приводит к изменению коэффициента регулирования

$$k_{us} = \left| \frac{\Delta U_f}{\Delta U} \right| \quad (2)$$

при отклонении напряжения в узле нагрузки от заданного значения. Жесткая отрицательная обратная связь устраняет зависимость статизма регулирования от угла зажигания.

Выбор коэффициента регулирования по отклонению напряжения в статических режимах определяется степенью влияния синхронного двигателя на напряжение узла нагрузки, значениями минимального и максимального тока возбуждения, распределением реактивных мощностей между параллельно работающими синхронными двигателями.

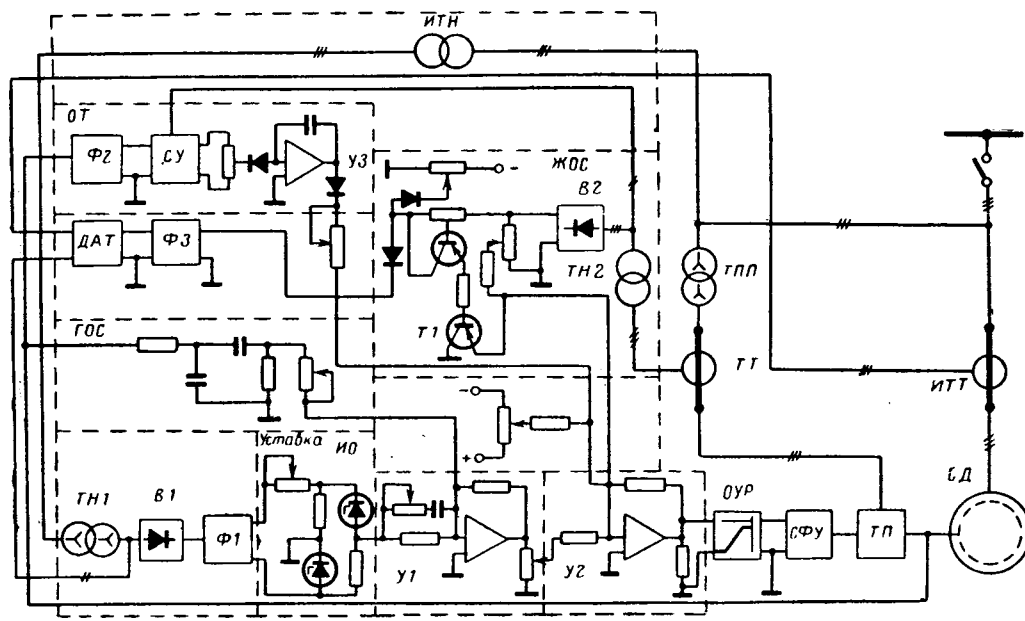
Закон регулирования возбуждения с ЖОС по току возбуждения без учета постоянных времени регулятора и ГОС имеет вид:

$$u_f = k_v u_{f0} - (k_v - 1) r_f i_f - k_u \Delta u - k'_u \frac{d\Delta u}{dt}, \quad (3)$$

где

$$k_v = 1 + \frac{k_0 k_2 k_e}{r_f},$$

k_0 — коэффициент ЖОС по току ротора; k_2, k_e — коэффициенты усиления соответственно усилителя



ед. возб., ед. напр.

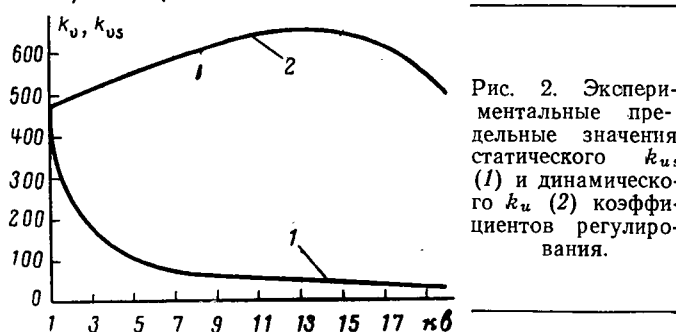


Рис. 2. Экспериментальные предельные значения статического k_u (1) и динамического k_{us} (2) коэффициентов регулирования.

У2 и системы фазового управления углом зажигания СФУ.

Выражение (3) справедливо в статических режимах и лишь приближенно описывает закон регулирования при переходных процессах, так как не учитывает постоянные времени регулятора и записано для малых отклонений угла зажигания преобразователя от начального значения. Без ЖОС второй член в правой части равен нулю.

Проанализируем выражение (3) при $k'_U=0$. Внезапное скачкообразное изменение напряжения на входе регулятора с ЖОС при наличии соответствующего потолка возбуждения вызывает в k_b раз большее отклонение напряжения возбуждения по сравнению с тем же, но статическим изменением напряжения на входе регулятора, т. е.

$$k_U = k_b k_{Us}.$$

Это объясняется тем, что в начальный момент изменения напряжения ток возбуждения равен значению в предшествующем режиме. Поэтому в регуляторах с ЖОС различают динамический и статический коэффициенты регулирования по отклонению напряжения k_U и k_{Us} . Без ЖОС динамический и статический коэффициенты регулирования равны k_{Us} .

На рис. 2 представлены снятые экспериментально на двигателе СМ-81-4 при нагрузке на валу $0,25M_H$ и без ЖОС зависимости предельных значений k_{Us} и k_u по условиям устойчивости. Из кривых рис. 2 видно, что ЖОС обеспечивает достаточно высокое значение динамического коэффициента регулирования при средних значениях k_U .

При наличии ЖОС на двигателе СМ-81-4 значение динамического коэффициента регулирования удалось довести до $k_U=720$ ед. возб./ед. напр.*

и при этом обеспечить необходимый запас по устойчивости.

Улучшение динамики переходных процессов при введении ЖОС по току ротора отмечено в [Л. 6].

Экспериментальное исследование АРВ проведено при питании синхронного двигателя СМ-81-4 через сопротивление $z=0,026$ отн. ед. со значительным преобладанием индуктивного сопротивления над активным, что соответствует питанию двигателя от источника достаточно большой мощности. Статический и динамический коэффициенты регулирования по отклонению напряжения

$$k_{Us} = 40 \text{ ед. возб./ед. напр.}; k_u = 720 \text{ ед. возб./ед. напр.}$$

* За единицу возбуждения принято напряжение, обеспечивающее при холостом ходе в режиме генератора номинальное напряжение.

Сравнение АРВ с ЖОС и без нее проведено при одинаковом значении k_{Us} .

Для достаточно точного определения изменения напряжения осциллографировалось отклонение напряжения ΔU . Качество напряжения оценивалось по следующим интегральным признакам:

среднему и среднеквадратичному отклонению напряжения Δu , $\sqrt{(\Delta u)^2}$;

дисперсии

$$D(\Delta u) = \overline{(\Delta u)^2} - (\overline{\Delta u})^2.$$

Результаты обработки осциллограмм АРВ с ЖОС по току ротора и без ЖОС в относительных единицах приведены в таблице (номинальная мощность асинхронного двигателя 10 кВт и напряжение 380 в; активная и реактивная мощности статической нагрузки равны 14 кВт и 24,5 квар).

Опыт	Без ЖОС			с ЖОС		
	$\overline{\Delta u} \cdot 10^4$	$\sqrt{(\Delta u)^2} \cdot 10^4$	$D(\Delta u) \cdot 10^4$	$\overline{\Delta u} \cdot 10^4$	$\sqrt{(\Delta u)^2} \cdot 10^4$	$D(\Delta u) \cdot 10^4$
Включение и отключение индуктивно-активной нагрузки и асинхронного двигателя с $M_{нагр} = 0,25 M_H$	430	537	14,4	368	514	12,6
То же при $M_{нагр} = M_H$	410	629	15,5	355	525	14,6
Одиночный наброс нагрузки на вал синхронного двигателя ($M_{нагр}$ изменился от 25 % до 150 % M_H)	66,5	95,4	0,46	63,4	91,5	0,42
Циклическая ударная нагрузка на валу синхронного двигателя ($M_{нагр}$ изменился от 25 до 150 % M_H)	53,4	99,5	0,7	38,2	88,2	0,622

Из таблицы следует, что во всех случаях АРВ с ЖОС имеет несколько лучшие показатели, чем без нее. Важно заметить, что АРВ с ЖОС более существенно улучшает качество напряжения узла нагрузки при больших значениях z .

Выводы. 1. Ограничения токов ротора и статора по температуре обмоток и минимального значения тока возбуждения по нагрузке позволяют в более полной мере использовать синхронную машину при автоматическом регулировании возбуждения.

2. Использование жесткой отрицательной обратной связи по току ротора улучшает качество напряжения узла нагрузки.

3. Введение в закон регулирования возбуждения производной по отклонению модуля напряжения уменьшает дисперсию напряжения при АРВ с жесткой отрицательной обратной связью по току ротора.

Литература

1. Любарский В. Г. и Юсин В. М., Измерительный орган устройства ограничения перегрузки мощных генераторов

Проектная оптимизация трансформаторов на ЦВМ

Инж. Р. С. БАБИС

Всесоюзный институт трансформаторостроения

и канд. техн. наук Н. Н. ХУБЛАРОВ

Всесоюзный электротехнический институт им. В. И. Ленина

Рост объема производства и номенклатуры трансформаторов большой мощности и усложнение расчетов в связи с внедрением более точных методов определения отдельных величин (полей рассеяния, добавочных потерь, местных нагревов, механических напряжений при коротком замыкании) ведут к значительному увеличению проектной работы и настоятельно требуют все более широкого использования ЦВМ при проектировании, в том числе и в трансформаторостроении. В 1960—1962 г. был разработан метод ВИТ при проектировании серий трансформаторов 3—4-го габаритов на 35 кВ применительно к ограниченным возможностям вычислительной машины «Урал-1». Метод ВЭИ разработан в 1966—1968 г. для расчета новых двухобмоточных трансформаторов 110 и 220 кВ (с регулированием напряжения под нагрузкой) на базе метода ВИТ и с учетом [Л. 1—5] применительно к ЦВМ «Минск-22».

Проектирование электрических машин и трансформаторов представляет собой проработку сложного комплекса инженерных проблем и не ограничивается решением формальной математической задачи поиска максимума или минимума одной функции (критерия). Однако на определенной стадии проектирования, особенно для оптимизации размеров и электромагнитных нагрузок (при прочих равных условиях), можно ограничиться одним критерием. Тогда проектная оптимизация оказывается типичным частным случаем общей задачи математического программирования, изложенной в [Л. 3]. Требуется минимизировать (максимизировать) сложную нелинейную функцию многих независимых переменных при заданных технических ограничениях, выраженных неравенствами. В эти неравенства, как и в исходные равенства (формулы поверочного расчета рассматриваемого изделия), входят величины, также являющиеся, как правило, сложными функциями независимых переменных.

Большинство методов автоматического расчета оптимальных электрических машин ([Л. 4—7] и др.) явно или неявно основаны на предположении о непрерывности независимых переменных. В силовом трансформаторе некоторые величины принимают

небольшие целые значения (например, число ходов винтовой обмотки обычно равно 1 или 2, реже 3, 4) и могут считаться непрерывными лишь при сугубо предварительных обобщенных исследованиях. Кроме того, желательно учитывать шкалу диаметров стержней и сортамент обмоточных проводов. Перебор сочетаний независимых переменных обеспечивает учет дискретного характера величин, а также позволяет учесть исходные неравенства и снимает трудности, обусловленные наличием сложных нелинейных функций; однако даже при быстроедействии в сотни тысяч операций в секунду простой перебор неприемлем из-за громадного количества сочетаний. Изложенные ниже приемы сужения зоны поиска позволяют уменьшить время расчета до приемлемого.

Постановка задачи. Рассмотрим двухобмоточный трансформатор с двумя concentрическими обмотками. Известны номинальные данные (мощность, напряжения, частота, вид охлаждения, число фаз и т. д.) и нормы проектирования, включая магнитные характеристики трансформаторной стали, ее коэффициент заполнения, таблица диаметров стержней (D) и соответствующих им активных сечений стержня и ярма. Все каналы внутри обмоток и главные изоляционные промежутки принимаем минимальными. Кроме того, опыт проектирования позволяет указать для каждого D количество и ширину прокладок (по окружности) в винтовых и непрерывных обмотках¹.

Тогда следующие девять независимых переменных однозначно предопределяют все данные одного варианта (в том числе все размеры обмоток и добавочные потери в них):

диаметр стержня D ;индукция в стержне B ;

высота обмоток H (если среди номинальных данных указано напряжение короткого замыкания, высота обмотки — при данных D и B — практически предопределена);

¹ Рассматриваемые методы расчета первоначально относились к трансформаторам с горизонтальными охлаждающими каналами внутри обмоток, в дальнейшем были разработаны подпрограммы расчета слоевых обмоток, применяемых в трансформаторах меньшей мощности.

с использованием интегрирующего магнитного усилителя, Труды ВЭИ, вып. 73, 1966.

2. Вадатурский В. М. и др., Тиристорные возбуждающие устройства для синхронных двигателей 14—20 габаритов, Информстандартэлектро, 1968.

3. Основы автоматического управления, Под ред. В. С. Пугачева, изд-во «Наука», 1968.

4. Шестаков А. Т. и др., Моделирование на аналоговой вычислительной машине электромеханических переходных процессов синхронного двигателя при автоматическом регулировании возбуждения, «Инструктивные указания по проекти-

рованию электротехнических установок», изд-во «Энергия», 1968, № 5.

5. Шипило В. П. и Булатов О. Т., Расчет полупроводниковых систем управления вентилями преобразователями, изд-во «Энергия», 1966.

6. Вейнгер А. М. и др., Автоматическое регулирование возбуждения крупных синхронных двигателей при резко переменной нагрузке, «Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок», изд-во «Энергия», 1968, № 4.

[1.9.1969]



плотность тока $\delta_{\text{ВН}}$, число параллельных проводов $n_{\text{ПВН}}$ и число витков в катушке $\omega_{\text{КВН}}$ (или число катушек $n_{\text{КВН}}$) обмотки ВН;

три переменных для обмотки НН: $\delta_{\text{НН}}$, $n_{\text{ПНН}}$, $\omega_{\text{КНН}}$ [вместо $\omega_{\text{К}}$ может быть число ходов $n_{\text{Ход}}$ винтовой обмотки (см. сноску 1)].

Необходимо найти такое сочетание девяти переменных, при котором минимальны годовые (приведенные) затраты, которые можно выразить следующей зависимостью:

$$Z = z_{\text{пр}} G_{\text{пр}} + z_{\text{ст}} G_{\text{ст}} + z_{\text{х.х}} P_{\text{х.х}} + z_{\text{к.з}} P_{\text{к.з}} + z_{\text{р}} Q, \quad (1)$$

где $G_{\text{пр}}$ и $G_{\text{ст}}$ — масса проводов обмоток и активной стали; $P_{\text{х.х}}$ и $P_{\text{к.з}}$ — потери холостого хода и короткого замыкания; $z_{\text{пр}}$, $z_{\text{ст}}$, $z_{\text{х.х}}$, $z_{\text{к.з}}$, $z_{\text{р}}$ — удельные годовые затраты на единицу массы или потерь (методика расчета $z_{\text{х.х}}$, $z_{\text{к.з}}$, $z_{\text{р}}$ разработана П. Г. Грудинским, см., например, [Л. 8]); Q — реактивная мощность, потребляемая трансформатором.

Здесь и далее применена система единиц СИ; затраты Z в руб/год; удельные затраты: $z_{\text{пр}}$ и $z_{\text{ст}}$ в руб/кг·год, $z_{\text{х.х}}$ и $z_{\text{к.з}}$ в руб/вт·год; $z_{\text{р}}$ в руб/вар·год.

При этом должны быть выдержаны ограничения по нагреву, производственным соображениям и др. Могут быть заранее заданы также потери.

Метод ВИТ. Для каждой заданной мощности (рис. 1) выполняются варианты расчетов на ряде нормализованных диаметров стержня сердечника (всего 3—5 значений) при различных значениях плотности тока (например в медных обмотках от 2 до 4 а/мм² через каждые 0,5 а/мм²). Значение индукции в стержне может варьироваться или задаваться заранее.

Искомый вариант находится внутри ряда. Из рассчитанного ряда вариантов автоматически или вручную отбирается оптимальный по заданному критерию, например по минимуму затрат. Для сужения зоны поиска при выборе значений D можно использовать, например, известный закон роста. В этом случае часто оказывается достаточным ряд из трех диаметров.

По заданным D и B определяется э. д. с. витка e_w и число витков обмоток НН и ВН $\omega_{\text{НН}}$ и $\omega_{\text{ВН}}$ (в том числе для всех положений переключателя при наличии ответвлений). Возможные типы обмоток при расчете конкретного ряда трансформаторов определены заранее, и каждому типу обмоток соответствует своя программа. Для оценки высоты обмоток удобно начинать расчет с обмотки ВН, так как тип ее обычно предопределен. Предварительный выбор провода этой обмотки выполняется по суммарному сечению одного витка, равному $S_{w\text{ВН}} = I_{\text{ВН}}/\delta$, и заранее заданному ориентировочному сечению одного провода, например 40 мм². Число параллельных проводов $n_{\text{ПВН}}$ получается делением первого сечения на второе и округлением результата к ближайшему целому числу. По полученному новому сечению $S_{\text{ВН}} = S_{w\text{ВН}}/n_{\text{ПВН}}$ определяются размеры провода $h_{\text{ВН}}$ и $b_{\text{ВН}}$ (где h — осевой размер) таким образом, чтобы получить для найденного сечения по возможности наиболее высокий провод, что в соответствии с [Л. 9] обеспечивает максимальный коэффициент заполнения окна

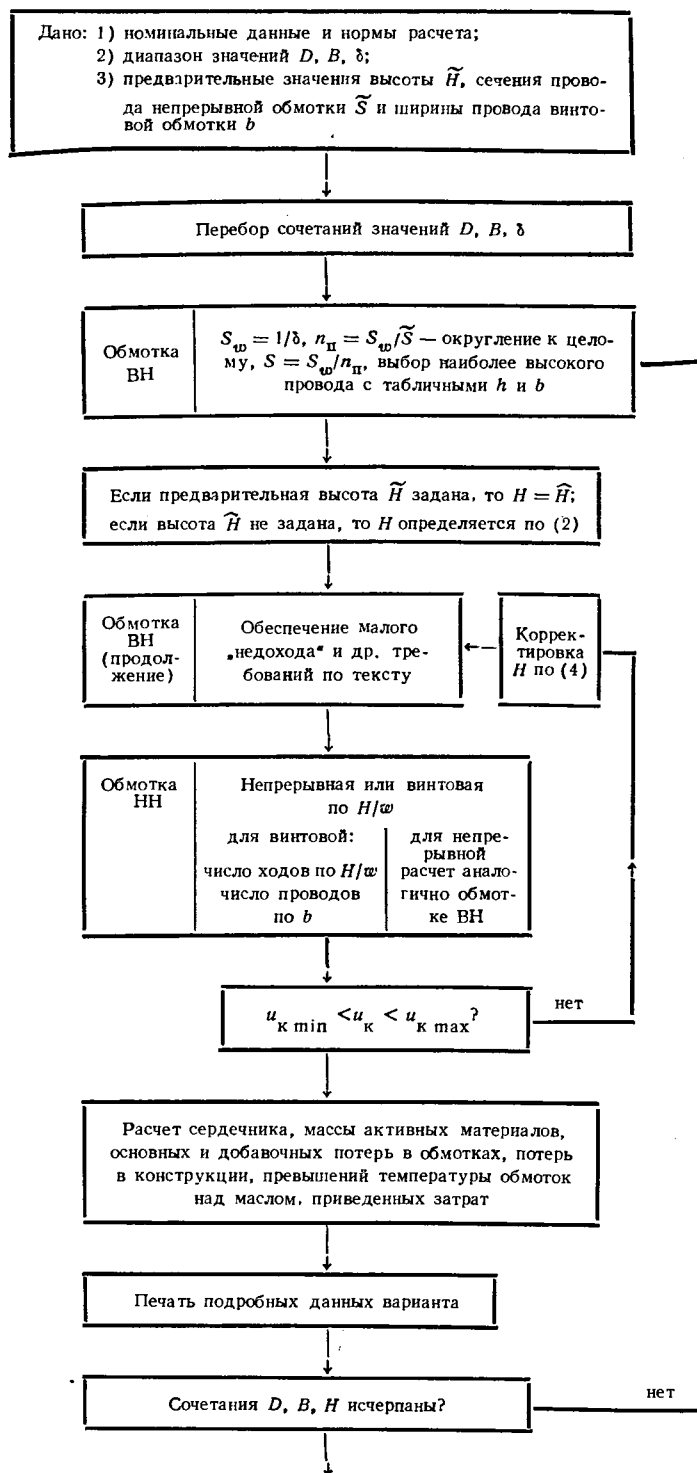


Рис. 1. Схема расчета по методу ВИТ.

сердечника медью (алюминием) и наименьшие напряжения от осевых усилий короткого замыкания. Кроме того, это обычно обеспечивает наименьшие добавочные потери в обмотке.

Полученные значения $h_{\text{ВН}}$ и $b_{\text{ВН}}$ используются для определения предварительных размеров обмоток. Требуемую величину напряжения короткого замыкания u_k можно обеспечить при определенном соотношении высоты и радиальных размеров обмоток. Используем следующие зависимости (вто-

рая из которых дана для обмоток с горизонтальными каналами):

$$\left. \begin{aligned} u_p e_w H &= 0,248 I w D_{\text{ср}} a_s p, \\ aH &= \frac{n_{\text{ВН}} S_{\text{ВН}} w_{\text{ВН}} (h_{\text{ВН}} + k_{\text{ВН}})}{h_{\text{ВН}}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $D_{\text{ср}}$ — средний радиус канала рассеяния;

a_s — приведенная ширина канала рассеяния;

p — коэффициент Роговского;

$k_{\text{ВН}}$ — усредненная ширина канала между катушками обмотки ВН;

u_p — реактивная составляющая напряжения короткого замыкания;

a — радиальный размер обмотки;

aH — площадь, занимаемая обмоткой в окне.

Принимая в первом приближении отношение радиальных размеров обмоток НН и ВН равным единице (или другой величине, характерной для данного ряда трансформаторов), получим в уравнениях (2) две неизвестных величины и определим H . Точность в определении предварительного значения H влияет не на конечный результат, а лишь на время расчета. Можно задаться этой величиной произвольно и в процессе последующих проверок относительно u_p получить нужную высоту.

Дальнейшей программой предусмотрена «раскладка» обмотки ВН относительно найденной высоты H с выполнением следующих условий:

1. Выбор максимально возможной высоты провода с одновременным ограничением «недохода» витков. Речь идет о том, что в непрерывной обмотке число витков в катушке w_k должно быть целым или близким к целому. Например, $w_k = 6; 5,9$, но не $5,1$ («недоход» $0,9$ витка).

2. Расчет регулировочной зоны обмотки при

$$w_{k.p} \leq w_k,$$

где $w_{k.p}$ — число витков в регулировочной катушке;

w_k — число витков в катушке основной зоны (тогда наружный диаметр обмотки определяется катушками основной зоны).

При этом значения $n_{\text{ВН}}$ и $S_{\text{ВН}}$ из предварительного расчета сохраняются, а значения $h_{\text{ВН}}$ и $b_{\text{ВН}}$ могут отличаться от предварительных в связи с выполнением требований детальной раскладки (указанные условия, выбор числа катушек кратным 2 или 4 и т. д.).

Тип обмотки НН определяется в зависимости от высоты, приходящейся на один виток $h_w = H/w$. Например, при $h_w < h_1$ — непрерывная обмотка; $h_2 > h_w > h_1$ — винтовая одноходовая; $h_w > h_2$ — винтовая двухходовая. Каждому типу обмотки соответствует своя программа с соблюдением тех же принципов, что и для обмотки ВН. Принимается $H_{\text{ВН}} = H_{\text{НН}}$.

После раскладки обмотки НН производится проверка величины u_k с учетом действительных размеров обмоток, и в случае невыполнения условия

$$u_{k \max} > u_k > u_{k \min} \quad (3)$$

находится новое значение высоты:

$$H_{i+1} = H_i \left(\frac{u_{k,i}}{u_{k, \text{ном}}} \right)^{\alpha}, \quad (4)$$

где

$$0,5 < \alpha < 1,$$

и производится раскладка обмоток относительно H_{i+1} до выполнения условия (3) (рис. 1). После расчета обмоток выполняется расчет сердечника, добавочных потерь в обмотках и элементах конструкции, превышений температур обмоток над маслом, суммарных потерь, масс, размеров активной части, затрат, затем — печать величин, подлежащих выдаче из машины.

Следует отметить, что в области минимума зависимость затрат имеет весьма пологий характер, т. е. могут существовать несколько вариантов, значительно отличающихся размерами, массами, потерями, но с практически одинаковыми затратами. Поэтому целесообразно печатать не только оптимальный вариант, но и смежные с ним, чтобы проектирующему была предоставлена свобода окончательного выбора с учетом всех факторов².

Метод ВЭИ. Так же, как и в методе ВИТ расчет обмоток выполняется отдельно (рис. 2). Для автоматического ограничения зоны поиска по переменным служат заданные предельные значения $h_{\min}, b_{\min}, h_{\max}, b_{\max}, (h/b)_{\min}, (h/b)_{\max}$. Таким образом, большое количество исходных неравенств: $h < h_{\max}, h/b < (h/b)_{\max}$ и т. д. не только не усложняет метод расчета (что имеет место в методах, основанных только на классической математике), но и позволяет значительно повысить его эффективность. Некоторые из ограничений, например по u_k или потерям, можно использовать для организации быстро сходящихся циклов аналогично формуле (4).

Оптимизация размеров каждой обмотки выполняется перебором значений ее независимых переменных (например δ, n_p, n_k) и выбором лучшего варианта по критерию $Z_{\text{обм}}$ («затраты обмотки»), равному переменной части Z при данных D, B, H и слагающемуся из «собственных» затрат (приходящихся на стоимость обмотки и ее потери) и изменения затрат, приходящихся на ярма и охватывающие обмотки, при изменении радиального размера a оптимизируемой обмотки

$$Z_{\text{обм}} = z_{\text{пр}} G_{\text{обм}} + z_{k.z} P_{\text{обм}} + 4(m-1) \times \\ \times \gamma_{\text{ст}} S_{\text{я}} (z_{\text{ст}} + z_{\text{ж.л}} p_{\text{я}} + z_{\text{р}} q_{\text{я}}) + a I w \alpha_{\text{охв}}, \quad (5)$$

где m — число стержней (формула дана для сердечников без боковых ярм);

$\gamma_{\text{ст}}$ — плотность стали;

$S_{\text{я}}$ — эффективное сечение ярма;

$p_{\text{я}}$ и $q_{\text{я}}$ — удельные потери и намагничивающая мощность в ярме;

$$\alpha_{\text{охв}} = \frac{z_{\text{пр}} G_{\text{охв.обм}} + z_{k.z} P_{\text{охв.обм}}}{R_{\text{охв}}},$$

R — средний радиус обмотки (индексы: «обм» — обмотка, «охв» — охватывающая).

² Отбраковка вариантов со слишком большими превышениями температуры и выбор оптимального варианта выполняются при анализе результатов. При очень большом количестве вариантов следует частично или полностью автоматизировать эти операции (что и сделано в методе ВЭИ).

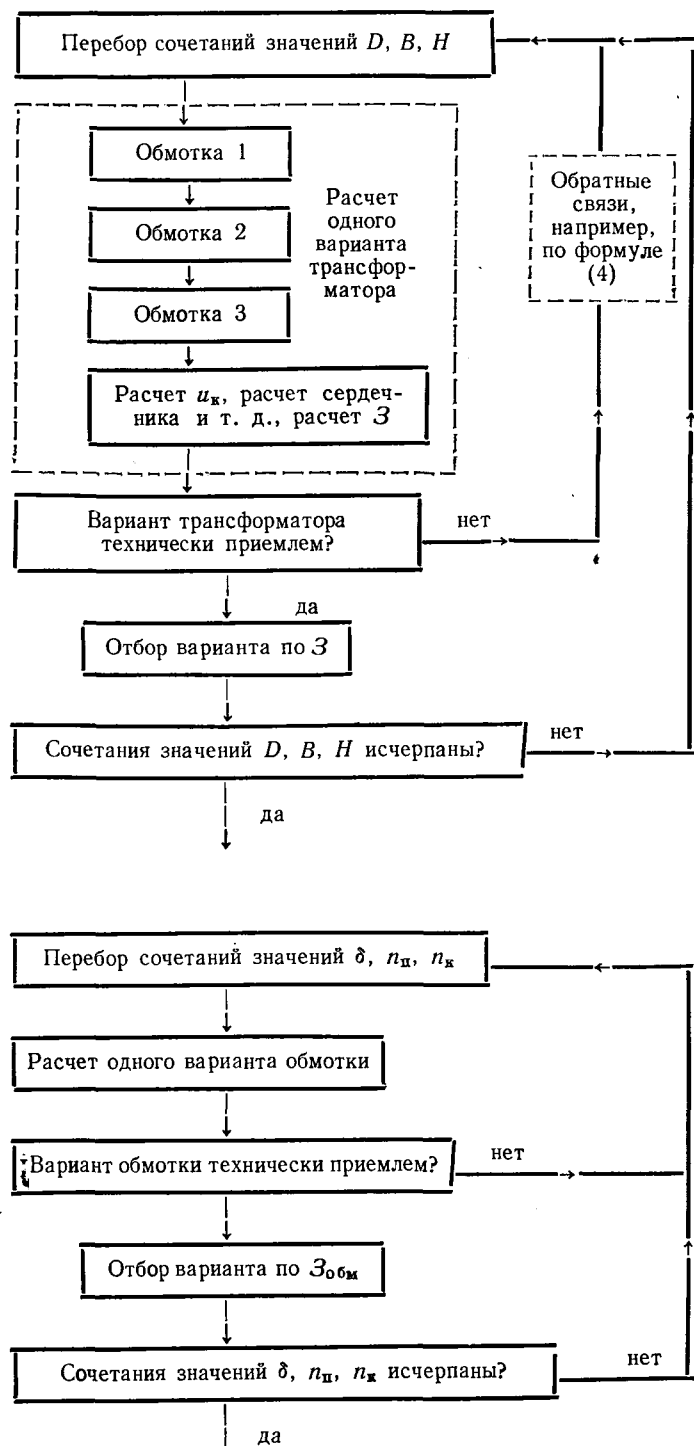


Рис. 2. Схема расчета по методу ВЗИ.

Для наружной обмотки $\alpha_{охв}=0$. Можно показать, что при одинаковых $Z_{пр}$ и $Z_{к.з}$ величина $\alpha_{охв}$ примерно одинакова для всех трансформаторов общего назначения и что возможная неточность, вводимая расчетом и $\alpha_{охв}$ по $G_{охв.обм}$, $R_{охв.обм}$ и $R_{охв}$ рассчитанных ранее трансформаторов, не влияет на результат оптимизации охватываемой обмотки. Потери от вихревых и циркулирующих токов, введенных осевым полем рассеяния в оптимизируемой обмотке, рассчитываются достаточно точно по известным I , ω , H , $G_{обм}$, b . Чтобы выбранная по

$Z_{обм}$ обмотка имела превышение температуры над маслом, по возможности близкое к оптимальному, для каждого варианта выполняется проверка $\theta_{о.м} < \theta_{о.м \max}$, где $\theta_{о.м \max}$ устанавливается на несколько градусов больше, чем получилось бы по разности нормированных наибольших превышений температуры обмотки θ_0 и верхних слоев масла $\theta_{в.с.м}$ над воздухом (водой). Например, по нормам ГОСТ 11677-65 можно получить $\theta_{о.м} \approx 65 - \frac{55}{1,3} \approx 23^\circ \text{C}$, для естественной циркуляции масла принимаем $\theta_{о.м \max} = (27-30)^\circ \text{C}$.

Расчет радиального поля выполняется по методу Наяшкова — Карасева [Л. 10], требующему разделения обмоток на «зоны», для чего в общую программу включены подпрограммы разделения на «зоны», расчета поля, а также добавочных потерь от токов, наведенных им в обмотке. В связи с тем, что расчет радиального поля занимает относительно много машинного времени, он выполняется, как правило, для одного—трех лучших вариантов. По эпюре поля можно рассчитать осевые усилия и вызванные ими механические напряжения в обмотке при коротком замыкании.

Машина «Минск-22» комплектуется устройством алфавитно-цифровой печати на бумажную ленту шириной 40 см. Это позволило представлять результаты расчета в наглядном, легко обозримом виде.

Разработан компактный бланк, соответствующий бланкам промышленных расчетных записок. Подпрограмма печати заполненного бланка вставляется в общую программу таким образом, чтобы обеспечить печать одного или нескольких бланков лучших вариантов. Одновременно печатается сводная таблица основных данных всех вариантов.

Применение. Метод ВЗИ использован для предварительных расчетов серии трансформаторов 3—4-го габаритов на 35 кВ [Л. 11], серии трехобмоточных трансформаторов 110 кВ мощностью 6,3—80 МВА (результаты этих расчетов учтены при составлении ГОСТ 11092-66 и ГОСТ 12965-67) и многих других серий и отдельных трансформаторов класса напряжения до 500 кВ. Выполнены проектные исследования, практически невозможные при расчете вручную, например, дано сравнение «медных» и «алюминиевых» трансформаторов для всех девяти значений мощности от 1 до 40 МВА серии 35 кВ; обоснованы значения u_k в трансформаторах этой серии.

По методу ВЗИ рассчитаны совместно с Московским электрозаводом серии двухобмоточных трансформаторов 110 и 220 кВ с регулированием напряжения под нагрузкой, уточнены значения потерь в них при разработке соответствующих стандартов, выполнены некоторые другие расчеты и проектные исследования [Л. 12]. Сравнение с рассчитанным вручную эскизным проектом серии трансформаторов 110 кВ показало, что метод обеспечивает весьма тщательную оптимизацию размеров, превосходящую во всяком случае возможности квалифицированного инженера. В этой серии предусмотрено восемь типов, а именно: мощностью 6,3; 10; 16; 25; 32; 40; 63 и 80 МВА. Для всех типов приведенные затраты в оптимальных вариантах, найденных вы-

числительной машиной, меньше затрат в эскизном проекте при прочих равных условиях.

Заключение. Методы ВИТ и ВЭИ расчета оптимальных трансформаторов на ЦВМ представляют собою усовершенствованный перебор. Как показали Д. А. Аветисян и А. И. Бертинов в [Л. 5], схемы расчета, подобные показанной на рис. 2, строго соответствуют динамическому программированию. В [Л. 3] указано, что из известных методов нелинейного программирования только перебор и динамическое программирование обеспечивают получение глобального оптимума при существенном влиянии дискретного характера величин и наличии большого количества локальных экстремумов. Многолетний опыт применения изложенных методов показывает, что они понятны инженерам, максимально приспособлены к традиционным методам расчета и достаточно просты для применения и усовершенствования непосредственно в организациях, проектирующих трансформаторы, о чем свидетельствует, например, тот факт, что метод ВЭИ внедрен на Московском электрозаводе без участия профессиональных программистов.

Оба метода применяются в промышленности, причем метод ВИТ более удобен на предварительных стадиях проектирования, например, при выборе принципиальной конструкции трансформатора, при исследовании влияния различных факторов на его технико-экономические характеристики. Как указано в [Л. 13], схемы расчета, подобные приведенной на рис. 1, на ранних стадиях работы имеют преимущество перед разработанными в ряде стран (США, Великобритания и др.) схемами с автоматической сходимостью к заданным потерям.

Метод ВЭИ следует применять при окончательном проектировании, когда требуется тщательная оптимизация.

Дальнейшее существенное повышение уровня проектирования трансформаторов требует решения таких сложных оптимизационных задач (например оптимизации распределения н. с. по высоте обмоток и других количественно обоснованных мер снижения добавочных потерь), которые связаны с переходом от усредненных или ориентировочно оцененных интегральных величин (средняя температу-

ра обмотки, сумма добавочных потерь во всех элементах конструкции и т. д.) к полевым задачам с учетом побочных эффектов (например вытеснения поля рассеяния из металла). Это означает, что в недалеком будущем высококачественное проектирование трансформаторов будет вообще невозможно без применения ЦВМ.

Литература

1. Abetti P. A., Guthberston W. I., Williams S. B., Philosophy of applying digital computers to the design of electrical apparatus, Communications and Electronics, 1958, July.
2. Abetti P. A., Mason H. J., Williams S. B., Complete design of power transformers with a large — size digital computer, Power Apparatus and Systems, 1959, febr.
3. Хедли Дж., Нелинейное и динамическое программирование, изд-во «Мир», 1967.
4. Аветисян Д. А. и Бертинов А. И., Многоэтапные процессы выбора оптимальных размеров электрических машин, «Электричество», 1966, № 6.
5. Аветисян Д. А. и Бертинов А. И., Динамическое программирование расчета оптимальных электрических машин на ЦВМ, «Электричество», 1966, № 11.
6. Аветисян Д. А. и Бертинов А. И., Оптимальное проектирование явнополюсного редуктора синхронной машины, «Электричество», 1965, № 6.
7. Каган Б. М. и Даниленко С. Е., Применение метода случайного поиска с обучением при оптимальном проектировании асинхронных электродвигателей, сб. «Автоматика и вычислительная техника», № 13, изд-во «Зинатне», Рига, 1966.
8. Попов И. Н. и Генев С. И., Определение оптимальных размеров силовых трансформаторов, изд-во «Энергия», 1967.
9. Гельперин Б. Б., О наивыгоднейших размерах меди обмоток трансформатора для получения минимального окна, «Электричество», 1935, № 15.
10. Наяшков И. С. и Карасев В. В., Расчеты полей рассеяния трансформаторов, «Вестник электропромышленности», 1963, № 4.
11. Нордио А. В., Применение электронной вычислительной машины «Урал-1» для расчета серий трансформаторов, «Энергетика и электротехническая промышленность», Киев, 1963, № 1.
12. Хубларов Н. Н., Расчет двухобмоточных масляных трансформаторов на цифровой вычислительной машине «Минск-22», Информстандартэлектро, 1969.
13. Medford D. C., The quotation design of large power transformers by digital computer Internat. Conf. Comput. Aided Design, Southampton, 1969, London, IEE, 1969, p. 269—279.

[12.1.1970]



УДК 621.313.32.001.24

Уточненный расчет частотных и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин

Кандидаты техн. наук, доц. И. И. ТАЛАЛОВ, В. К. МИШУКОВ и инженеры А. П. ГОРШКОВ, Ю. Я. ЩЕЛЫКАЛОВ

Ивановский энергетический институт

Проведенные в последние годы исследования переходных процессов в явнополюсных синхронных машинах показали, что принятое при анализе представление ротора машины цепью обмотки возбуждения и эквивалентными одноцепными успокоительными обмотками по продольной и поперечной осям не дает удовлетворительной точности расчетов. Ис-

пользование полученных опытным путем частотных характеристик $x_d(js)$ и $x_q(js)$ не всегда возможно, так как часто возникает необходимость ознакомиться с поведением в переходных режимах еще неизготовленной машины.

В результате исследований установлено, что на частотные и пусковые характеристики машин су-

щественное влияние оказывает изменение параметров успокоительных обмоток, обусловленное насыщением стали в направлениях потока пазового рассеяния, вытеснением тока и повышением температуры. При длительном пуске превышение температуры успокоительных обмоток зависит от условий отвода тепла.

Тепловой расчет успокоительных обмоток при пуске сильно усложняется из-за неравномерного распределения токов по стержням. Между тем, получение полной картины превышений температуры успокоительной обмотки очень важно для оценки ее термической и механической стойкости, а также надежности машины в целом. Неодинаковое тепловое удлинение стержней может вызвать появление в деталях обмотки механических напряжений, значительно превышающих напряжения, обусловленные центробежными силами и тепловым расширением замыкающих колец.

Из изложенного ясно, что уточнение методов расчета частотных и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин неразрывно связано с повышением точности теплового расчета успокоительных обмоток. Решить эту задачу можно, рассматривая в отдельности каждую из их цепей, симметричных относительно продольной и поперечной осей.

Такой подход позволит охватить обмотки с неравномерным, но симметричным относительно оси полюса распределением стержней, со стержнями из различных материалов, с разной конфигурацией и площадью поперечного сечения, лежащих полностью или частично в закрытых пазах. Изменение параметров стержней может быть учтено методом последовательных приближений.

Подобные расчеты чрезвычайно трудоемки, однако применение вычислительной техники дает возможность значительно сократить время вычисления. Предпринятые ранее попытки использовать ЦВМ для расчета пускового процесса синхронных двигателей [Л. 1 и 2] не были вполне успешными из-за принятых допущений.

В предлагаемой статье изложена методика уточненного расчета частотных и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин с учетом изменения параметров успокоительных обмоток. Описана составленная программа расчета на ЦВМ, приведено сравнение результатов расчета с опытными данными.

Основные соотношения. В основе алгоритма расчета — положения [Л. 3—5]. Для упрощения анализа и расчетов приняты следующие допущения.

1. Анализ асинхронного режима проводим в системах координатных осей $d, q, 0$ и $f, b, 0$.

2. Токи и вращающие моменты определяем для установившегося режима невозбужденной машины при различных значениях скольжения. Это допущение оправдано, поскольку механическая постоянная времени агрегата обычно гораздо больше электрических постоянных времени цепей машины. Цепь обмотки возбуждения может быть замкнута накоротко или на разрядное сопротивление. Пуск может быть прямым, реакторным или через автотрансформатор.

3. Предполагаем, что взаимодействие между це-

пями статора и ротора обусловлено только основными гармониками магнитных полей. Высшие и низшие гармоники учитываем только при расчете дифференциального рассеяния цепей и взаимных связей между цепями ротора.

4. Пренебрегаем потерями от гистерезиса и вихревых токов в расслоенных стальных сердечниках. Дополнительные контуры ротора, образуемые стягивающими сердечник полюса болтами и нажимными щеками, вихревыми токами в массивных стальных элементах конструкции и т. п., не принимаем во внимание, поскольку в машинах с полной (продольно-поперечной) успокоительной обмоткой они, как правило, не играют существенной роли. Влияние растекания тока между стержнями успокоительной обмотки по стали полюсов для таких машин тоже невелико [Л. 6].

5. Насыщение стали учитываем по уточненной методике только в направлениях потока пазового рассеяния успокоительной обмотки. Для машин с высокими значениями линейной нагрузки статора или кратности пускового тока при прямом пуске вводим в расчет поправочный коэффициент, приближенно отражающий влияние насыщения на индуктивное сопротивление рассеяния статора. (Предполагаем, что его значение с уменьшением тока статора нарастает по линейному закону от начального значения, которое устанавливается опытным путем или принимается по данным для однотипных машин, до единицы при токе, равном половине номинального)¹. Насыщение пути основного потока в асинхронном режиме мало из-за большого падения напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния статора, а насыщением путей потока рассеяния обмотки возбуждения можно пренебречь, поскольку проводимости этих путей в основном определяются их участками, расположенными в немагнитной среде.

6. Пренебрегаем пульсацией скорости вращения, обусловленной обратным полем.

7. За начальную температуру обмоток принимаем 15°C . При тепловом расчете успокоительной обмотки находим средние по длине превышения температуры стержней в пренебрежении теплообменом с лобовыми частями и растеканием тока между стержнями по стали полюсов. В конечные результаты могут быть внесены поправки, учитывающие влияние этих факторов.

8. Дифференциальные уравнения движения агрегата и нагрева стержней успокоительной обмотки решаем численными методами. Приращения независимых переменных устанавливаем заранее задаваемыми значениями скольжения. По известному интервалу изменения скольжения находим соответствующий промежуток времени. Все величины, изменяющиеся в функции скольжения, рассчитываем для этого интервала.

9. Анализ и расчеты производим в обратимой системе относительных единиц, описанной в [Л. 5].

Уравнения для напряжений цепей d и q якоря машины могут быть представлены в виде:

¹ Уточненный метод учета влияния насыщения стали на индуктивное сопротивление рассеяния статора в настоящее время разрабатывается.

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_d = U = js\dot{\psi}_d - (1-s)\dot{\psi}_q + r_a \dot{I}_d; \\ \dot{U}_q = -jU = js\dot{\psi}_q + (1-s)\dot{\psi}_d + r_a \dot{I}_q; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где U — действующее значение фазного напряжения.

Потокоцепления этих цепей:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_d = x_d(js) \dot{I}_d = \sum_{n=b,1}^k x_{and} \dot{I}_{nd} + x_d \dot{I}_d; \\ \dot{\psi}_q = x_q(js) \dot{I}_q = \sum_{n=0(1)}^k x_{anq} \dot{I}_{nq} + x_q \dot{I}_q. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Осевые составляющие тока якоря можно определить из (1) и (2):

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_d = [r_a - j(1-2s)x_q(js)] \frac{U}{A}; \\ \dot{I}_q = -j[r_a - j(1-2s)x_d(js)] \frac{U}{A}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

$$A = r_a^2 + j2sr_a x_c(js) + (1-2s)x_d(js)x_q(js);$$

$$x_c(js) = 0,5[x_d(js) + x_q(js)].$$

Если положить $\dot{I}_d = \dot{I}_q = 1$, то согласно (2) потокоцепления $\dot{\psi}_d$ и $\dot{\psi}_q$ становятся численно равными частотным характеристикам $x_d(js)$ и $x_q(js)$ по соответствующим осям. Таким образом, эти характеристики можно найти, предварительно определив токи цепей ротора $\dot{I}_{nd}^*$ и $\dot{I}_{nq}^*$ при $\dot{I}_d = \dot{I}_q = 1$ путем решения уравнений:

$$\left. \begin{aligned} [Z_{pnd}] [\dot{I}_{nd}^*] &= -[x_{apd}], \quad p, n = b, 1, 2, \dots, k; \\ [Z_{pnq}] [\dot{I}_{nq}^*] &= -[x_{apq}], \quad p, n = 0(1), 1(2), \dots, k, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $[Z_{pnd}]$ и $[Z_{pnq}]$ — квадратные симметричные матрицы полных сопротивлений цепей ротора, в которых $Z = x - j \frac{r}{s}$ (если $p, n = b, p \neq n$, то $Z = x$),

$[\dot{I}_{nd}^*]$ и $[\dot{I}_{nq}^*]$ — столбцовые матрицы токов, $[x_{apd}]$ и $[x_{apq}]$ — столбцовые матрицы взаимных [индуктивных сопротивлений между цепями ротора и якоря соответственно по продольной и поперечной осям.

Токи продольных и поперечных цепей ротора

$$\dot{I}_{nd} = \dot{I}_{nd}^* \dot{I}_d; \quad \dot{I}_{nq} = \dot{I}_{nq}^* \dot{I}_q, \quad (5)$$

а токи в стержнях успокоительной обмотки

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{n1} &= \dot{I}_{nq} - \dot{I}_{nd} \text{ — набегающей половине полюса;} \\ \dot{I}_{n2} &= \dot{I}_{nq} + \dot{I}_{nd} \text{ — на сбегающей половине полюса;} \\ \dot{I}_0 &= 2\dot{I}_{0q} \text{ — средний стержень.} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для расчета составляющих вращающего момента и фазного тока якоря целесообразно перейти от осевых составляющих $d, q, 0$ к прямо и обратно вращающимся составляющим $f, b, 0$:

$$\dot{I}_f = 0,5(\dot{I}_d + j\dot{I}_q); \quad \dot{I}_b = 0,5(\dot{I}_d - j\dot{I}_q). \quad (7)$$

Ток $\dot{I}_f$ численно равен составляющей фазного тока основной частоты $\dot{I}_{a1}$, а ток $\dot{I}_b$ — составляющей частоты $(1-2s)$, т. е. $\dot{I}_{a(1-2s)}$.

Электромагнитный момент, развиваемый невозбужденной машиной, складывается из среднего момента, обусловленного взаимодействием полей статора и ротора, неподвижных относительно друг друга,

$$m_{cp} = U \operatorname{Re} \dot{I}_f - r_a \dot{I}_f^2 + r_a \dot{I}_b^2 / (2s - 1) \quad (8)$$

и пульсирующей с удвоенной частотой скольжения составляющей, возникающей при взаимодействии вращающихся относительно друг друга полей статора и ротора

$$|m_{2s}| = |x_p(js)(\dot{I}_f^2 - \dot{I}_b^2)|, \quad (9)$$

где

$$x_p(js) = 0,5[x_d(js) - x_q(js)].$$

Уравнение движения агрегата в конечных разностях

$$m_{cp} - m_c = -J \frac{\Delta s}{\Delta t}, \quad (10)$$

где m_c — статический момент сопротивления на валу агрегата.

Изменение параметров успокоительной обмотки. Насыщение путей потока пазового рассеяния. Для того чтобы учесть влияние насыщения путей потока пазового рассеяния на параметры успокоительной обмотки, будем исходить из реальной кривой намагничивания для стали полюсов (Ст. 3).

В случае закрытых пазов предполагаем, что насыщение стали имеет место лишь в зоне над пазом, ширина которой равна диаметру стержня, поток рассеяния проходит через эту зону (или торец усика зубца для полукрытого паза); не отвлекаясь в воздушный зазор.

Зону насыщения разбиваем на ряд участков; магнитную индукцию на каждом из них принимаем постоянной и равной ее значению в середине участка. Задаваясь рядом значений индукции в средней части зоны насыщения B_0 , можно рассчитать соответствующие значения индукции на остальных участках $B_i = h_0 B_0 / h_i$ (рис. 1), определить с помощью

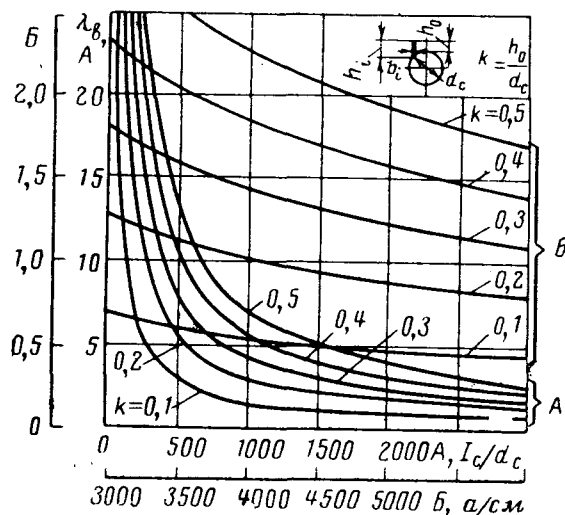


Рис. 1. Универсальные кривые для определения постоянной магнитной проводимости рассеяния мостика над закрытым пазом.

кривой намагничивания падения магнитного напряжения на них $b_i H_i$, а затем найти результирующую н. с. $F_p = \sum b_i H_i$. После этого можно рассчитать значения тока в стержне и соответствующей ему постоянной проводимости рассеяния верхней части паза:

$$I_c = F_p / \sqrt{2}; \quad (11)$$

$$\lambda_v = 0,8 \frac{h_0 B_0}{F_p} = 0,566 \frac{h_0 B_0}{I_c}. \quad (12)$$

По условиям геометрического подобия для пазов с разными размерами при неизменном отношении h_0/d_c постоянная проводимости λ_v будет одинакова, если ток I_c изменяется пропорционально геометрическому размеру. Исходя из этих предположений, были получены универсальные характеристики (рис. 1), которые аппроксимированы зависимостью

$$\lambda_v = \frac{16h_0}{I_c + 0,1d_c} + \frac{0,03(d_c + 4h_0)I_c}{d_c^2}. \quad (13)$$

В (13) ток I_c выражен в килоамперах. Зависимость (13) для λ_v имеет минимум при некотором критическом значении тока $I_{c,кр}$. Для токов, превышающих $I_{c,кр}$, постоянная принимается равной минимальному значению $\lambda_{v, min}$.

Для полуоткрытых пазов можно считать λ_v постоянным и равным $(h_{ш}/b_{ш}) + \lambda_{к.з}$ ($h_{ш}$ и $b_{ш}$ — высота и ширина шлица паза; $\lambda_{к.з}$ — постоянная проводимости рассеяния коронок зубцов) до тех пор, пока соответствующая величина по кривым рис. 1 не станет меньше этого значения. Далее λ_v определяется так же, как и для закрытых пазов.

Вытеснение тока. Под влиянием вытеснения тока активные сопротивления стержней успокоительной обмотки возрастают, а индуктивные — уменьшаются. Выражения для коэффициентов изменения сопротивлений, полученные путем аппроксимации общих зависимостей [Л. 7] с учетом изменения температуры стержня, могут быть представлены в виде

$$k_r = 1 + \left(0,727 - 0,304 \frac{b_{ш}}{d_c}\right) (\chi d_c - 0,667)^2; \quad (14)$$

$$k_x = 1,127 + 0,366 \frac{b_{ш}}{d_c} - \left(0,096 + 0,291 \frac{b_{ш}}{d_c}\right) \chi d_c. \quad (15)$$

где $\chi = \sqrt{\frac{s}{c_c(1 + \alpha_{\theta c} \theta_c)}}$; c_c — отношение удельного сопротивления материала стержня к удельному сопротивлению меди при 15°C ; $\alpha_{\theta c}$ — термический коэффициент сопротивления материала стержня, $1/^\circ\text{C}$; θ_c — превышение температуры стержня, $^\circ\text{C}$.

Формулы (14) и (15) дают достаточно хорошее приближение в диапазоне $1,4 \leq \chi d_c \leq 2,5$, охватывающем значения, встречающиеся на практике при расчете частотных и пусковых характеристик в области скольжения $1 \geq s > 0$; при значениях χd_c , меньших 1,4, вытеснением тока можно пренебречь.

Постоянная проводимости рассеяния для нижней части паза [Л. 7]

$$\lambda_n = \frac{1}{\pi} \left[0,932 - \ln \left(\frac{b_{ш}}{d_c} + 0,089 \right) \right]. \quad (16)$$

Для закрытых пазов (или полуоткрытых, если λ_v определяется как для закрытых пазов) $b_{ш}$ представляет собой эквивалентную ширину шлица и находится по формуле:

$$b_{ш} = h_{0(ш)}/\lambda_v.$$

Повышение температуры. Из-за неравномерного и несимметричного относительно оси полюса распределения токов по стержням успокоительной обмотки при пуске превышение температуры каждого стержня находится в отдельности. Конечное превышение температуры стержня является сложной функцией многих переменных. Для нахождения решения приходится принимать ряд упрощающих допущений.

Исследования показали, что нарастание температуры стержня в начальной стадии нестационарного процесса происходит по закону, близкому к экспоненциальному. Это позволяет ввести эквивалентный коэффициент теплоотдачи с поверхности стержня и воспользоваться обычной методикой расчета для случая нагрева стержня в бесконечной однородной среде.

Весь диапазон изменяющегося при пуске скольжения $s = 1 \div 0$ разбиваем на интервалы. Большое число точек (51) позволяет сделать их достаточно малыми. По окончании электромагнитного расчета для начального значения s на каждом интервале путем решения (10) находится соответствующий промежуток времени Δt .

Если предположить, что ток стержня I_c и коэффициент k_r в пределах каждого интервала остаются неизменными, а также пренебречь переносом тепла в осевом направлении, то уравнение нагрева элемента стержня длиной 1 см в конечных разностях для j -го интервала будет иметь вид:

$$Q_{0j}(1 + \alpha_{\theta c} \theta_{cj}) \Delta t = C_c \Delta \theta + K_{\alpha} \theta_{cj} \Delta t, \quad (17)$$

где $Q_{0j} = k_{rj} r_{c15} I_{cj}^2$, Вт ; C_c и r_{c15} — теплоемкость ($\text{дж}/^\circ\text{C}$) и омическое (ом) сопротивление элемента стержня; K_{α} — удельная теплоотдача с его поверхности, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$.

Решение (17) при малом шаге Δt осуществляется с достаточно высокой степенью точности. Для определения K_{α} могут быть использованы представленные на рис. 2 универсальные кривые, полученные моделированием теплового поля круглого стержня с помощью сетки RC и учитывающие теплообмен между стержнем, сталью полюса и окружающей средой [Л. 8]. Кривые справедливы при выполнении условия, которое для медных, латунных и бронзовых стержней может быть записано в виде

$$t_n < 30d_c, \quad (18)$$

где t_n — время пуска, сек ; d_c — диаметр стержня, см . Если

$$t_n < 3d_c, \quad (19)$$

с отводом тепла можно не считаться.

Исследования показали, что теплоотдача с поверхности полюса не оказывает существенного влияния на процесс нагрева стержня даже при повышенных значениях коэффициента теплоотдачи порядка $0,02 \text{ Вт}/^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2$. Среднее значение действи-

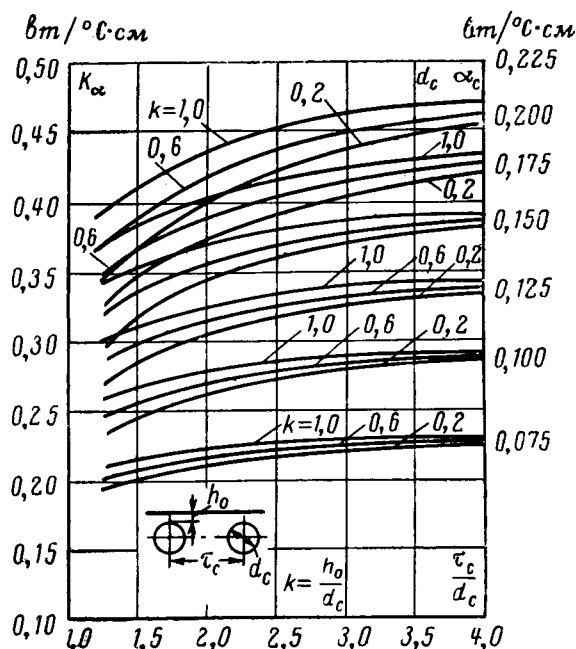


Рис. 2. Универсальные кривые для определения удельной теплоотдачи с поверхности круглого стержня.

тельного коэффициента теплоотдачи с поверхности стержня α_c по данным опытов, поставленных на моделях и реальных полюсах, колеблется в пределах 0,030—0,035 $\text{Вт/}^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2$.

Программа расчета на ЦВМ. Программа составлена для ЦВМ «Урал-2». Ее блок-схема показана на рис. 3.

Программой предусмотрен расчет частотных и пусковых характеристик машин без учета изменения параметров успокоительной обмотки под влиянием каждого из факторов в отдельности и всех вместе. Небольшие изменения, вносимые в программу с пульта управления, позволяют выполнить расчет, пренебрегая активным сопротивлением якоря, при разомкнутой обмотке возбуждения и т. д.

Время расчета для 51 значения скольжения зависит от числа стержней успокоительной обмотки и не превышает 20—25 мин.

Экспериментальная проверка программы. Было проведено сравнение результатов расчетного и опытного определения частотных и пусковых характеристик, распределения токов и превышений температуры по стержням успокоительной обмотки для нескольких синхронных машин, в том числе синхронного двигателя ДС 13/52-6 и синхронного компенсатора КС-30000-11 по данным проведенного заводом «Уралэлектротяжмаш» опытного измерения распределения токов и перегревов по стержням успокоительной обмотки при неподвижном роторе.

Двигатель ДС 13/52-6. Номинальные данные: 700 кВт (820 кВА), 6 кВ, 1000 об/мин. Успокоительная обмотка медная, $n_c=7$, $d_c=1,4$ см, $\alpha_c=17^\circ30'$; пазы полузакрытые, шлиц $h_{ш} \times b_{ш} = 2 \times 3$ мм. Замыкающие сегменты с помощью накладок соединены в жесткие кольца. Базисные единицы: $I_{б.а}=79$ А; $I_{б.в}=57,2$ А; $I_{б.у}=3356$ А; $Z_{б.а}=43,8$ Ом; $Z_{б.в}=125,3$ Ом; $Z_{б.у}=0,0358$ Ом; $M_б=0,8$ т·м. Сопротивления: $x_d=1,422$; $x_q=0,729$; $x_{\alpha\sigma}=$

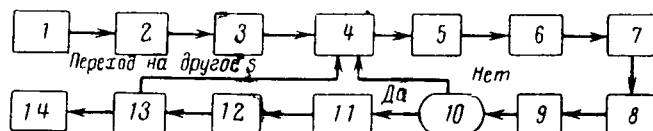


Рис. 3. Блок-схема программы уточненного расчета частотных и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин. 1 — ввод исходных данных и программ; 2 — расчет коэффициентов поля в воздушном зазоре; 3 — расчет постоянных параметров; 4 — расчет параметров, зависящих от s и I_c ; 5 — формирование матриц коэффициентов в системах уравнений для падений напряжения в цепях ротора; 6 — решение систем уравнений; 7 — расчет частотных характеристик $x_d(js)$ и $x_q(js)$; 8 — расчет составляющих тока якоря I_d и I_q ; 9 — расчет токов цепей ротора; 10 — проверка сходимости итерационного процесса для учета насыщения путей потока пазового рассеяния успокоительной обмотки; 11 — расчет токов якоря I_{a1} и $I_{a(1-2)}$ и составляющих вращающего момента; 12 — расчет времени разгона и перегревов; 13 — печать результатов расчета и переход к другому s ; 14 — стоп.

$=0,0698$; $r_{a15}=0,00883$; $x_{в.вд}=1,648$; $x_{\sigma в}=0,295$; $r_{в15}=0,001738$. Маховой момент ротора $GD_p^2=0,37$ т·м².

Опыты асинхронного пуска проводились при полном напряжении сети $1,1U_N$ и через реактор ($x_p=0,251$), с маховиком ($GD_m^2=1,33$ тм²) и без него. Обмотка возбуждения замыкалась накоротко, момент статического сопротивления практически отсутствовал.

При опытах 3 осциллографа регистрировали подводимую мощность, линейное напряжение, токи в двух фазах статора и обмотке возбуждения, скорость вращения (от униполярного тахогенератора), токи в стержнях успокоительной обмотки (с помощью интегрирующих гальванометров) и их температуры. Одна из осциллограмм представлена на рис. 4.

Как показывают рис. 5 и 6, отклонение пусковых характеристик, распределения токов и перегревов между стержнями успокоительной обмотки, полученных расчетным путем по уточненной методике, от найденных из опытов невелико.

Хорошее совпадение расчетных и опытных значений перегревов стержней для пусков при полном напряжении сети и через реактор свидетельствует о правильном учете отвода тепла.

Компенсатор КС-30000-11. Номинальные данные: 30 000 кВА, 10,5 кВ, 750 об/мин. Успокоительная обмотка латунная, $n_c=8$, $d_c=1,8$ см, $\alpha_c=9^\circ51'$;

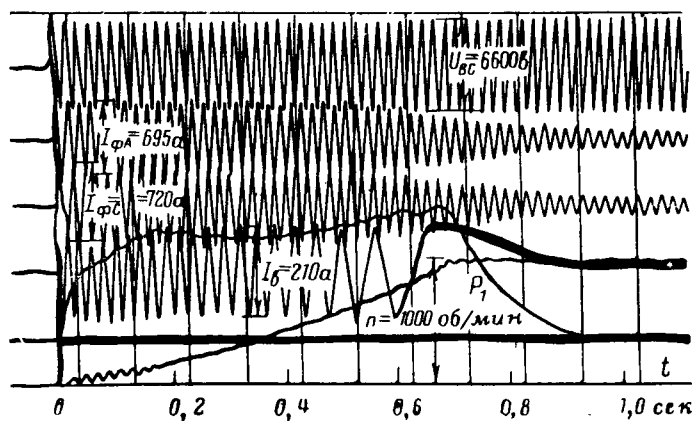


Рис. 4. Осциллограмма пуска двигателя ДС 13/52-6. Пуск прямой, без маховика.

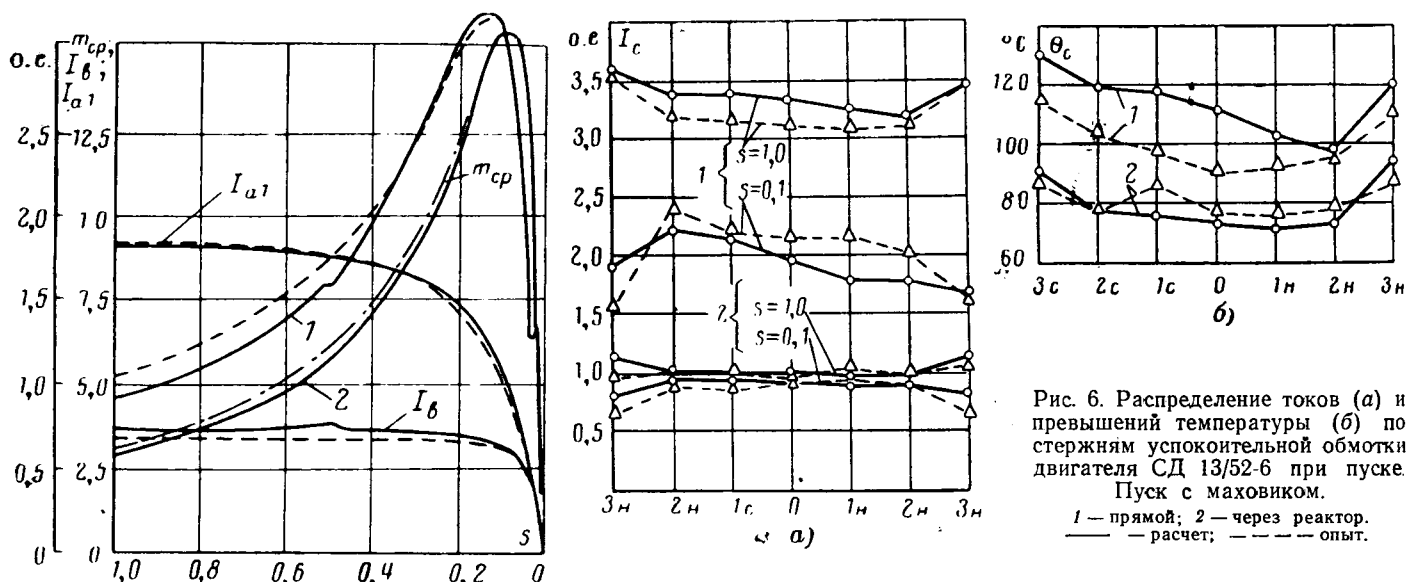


Рис. 5. Пусковые характеристики двигателя СД 13/52-6. Пуск прямой, с маховиком.

1 и 2 — расчет по уточненной методике соответственно с учетом и в пренебрежении изменением параметров успокоительной обмотки. — — — опытные кривые (характеристика момента рассчитана по кривой разгона $n(t)$); — — — характеристика момента, рассчитанная по частотным характеристикам, полученным из опытов затухания постоянного тока в обмотке якоря.

крайние стержни лежат в закрытых пазах, остальные в полузакрытых, шлиц $h_{ш}b_{ш}=2,75 \times 5$ мм. Базисные единицы: $I_{6a}=1650$ а; $I_{6b}=212,6$ а; $I_{6y}=12890$ а; $Z_{6a}=3,68$ ом; $Z_{6b}=327,7$ ом; $Z_{6y}=0,0896$ ом; $M_6=39$ т·м. Сопротивления: $x_d=1,663$; $x_q=1,04$; $x_{aa}=0,11$; $r_{a15}=0,00292$; $x_{b,вд}=1,888$; $x_{ов}=0,335$; $r_{b15}=0,0006$. Маховой момент ротора $GD_p^2=58,6$ т·м².

На рис. 7 приведено сравнение результатов расчетного распределения токов между стержнями успокоительной обмотки при неподвижном роторе для трех значений напряжения на зажимах машины с опытными данными. Близкое совпадение расчетных и опытных значений токов во всех случаях служит подтверждением справедливости принятой методики учета насыщения в направлениях потока пазового рассеяния успокоительной обмотки.

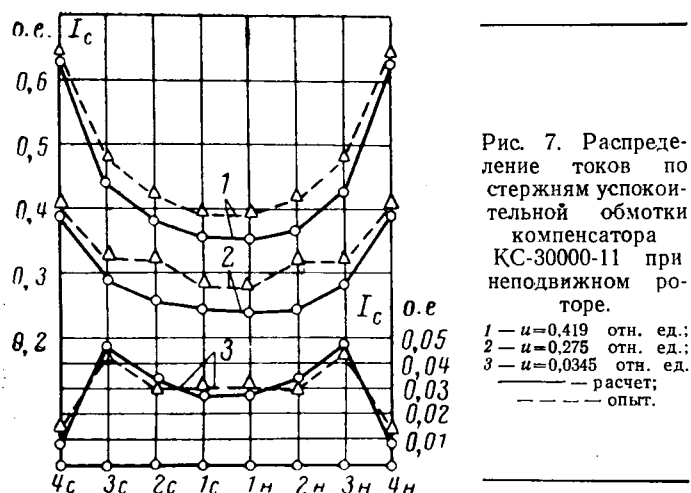


Рис. 7. Распределение токов по стержням успокоительной обмотки компенсатора КС-30000-11 при неподвижном роторе.

1 — $u=0,419$ отн. ед.;
2 — $u=0,275$ отн. ед.;
3 — $u=0,0345$ отн. ед.
— — — расчет;
— — — опыт.

Исследование влияния изменения параметров успокоительной обмотки. Разработанная программа была использована для исследования зависимости частотных и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин от изменения параметров успокоительной обмотки. Для мощных машин показательные результаты, полученные для гидрогенератора, испытания которого описаны в [Л. 9].

Генератор СВКр 1340/150-96. Номинальные данные: 71500 кВА (57200 кВт); 13,8 кВ; 62,5 об/мин. Успокоительная обмотка медная, $n_c=5$, $d_c=2$ см, $a_c=25^\circ 12'$; крайние стержни лежат в закрытых пазах, остальные в полузакрытых, шлиц $h_{ш}b_{ш}=3,5 \times 3,5$ мм. Базисные единицы: $I_{6a}=2990$ а; $I_{6b}=310$ а; $I_{6y}=5420$ а; $Z_{6a}=2,66$ ом; $Z_{6b}=372$ ом; $Z_{6y}=1,217$ ом; $M_6=1115$ т·м. Сопротивления: $x_d=0,645$; $x_q=0,4817$; $x_{aa}=0,122$; $r_{a15}=0,00375$; $x_{b,вд}=0,779$; $x_{ов}=0,256$; $r_{b15}=0,000473$. Маховой момент агрегата $GD_a^2=56500$ т·м².

Результаты расчетов относятся к асинхронному пуску при напряжении на зажимах машины $0,6U_n$; к этому же напряжению приведены опытные данные. Пуски производились при осушенной камере рабочего колеса турбины; машина была снабжена подпятником с гидравлическим подъемом, поэтому момент статического сопротивления был незначителен ($m_c \approx 5,1$ т·м); обмотка возбуждения замыкалась накоротко.

Изменение параметров крайних стержней успокоительной обмотки, лежащих в закрытых пазах, рассчитанное при различных допущениях, иллюстрирует рис. 8. На активное сопротивление стержней оказывает существенное влияние как вытеснение тока, так и повышение температуры. Следует отметить значительное ослабление эффекта вытеснения тока с ростом температуры. Индуктивность пазового рассеяния стержней вначале несколько увеличивается, поскольку влияние вытеснения тока становится менее заметным, далее ввиду сильного насыщения мостиков над пазами остается почти неизменной до скорости, близкой к синхронной, а затем из-за уменьшения тока стержней резко возрастает.

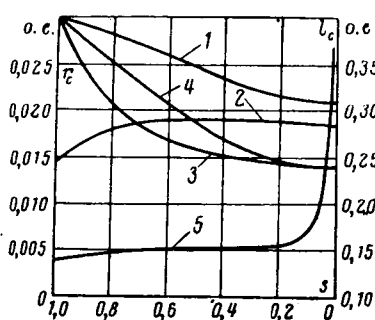


Рис. 8. Изменение параметров крайних стержней успокоительной обмотки генератора СВКр 1340/150-96 при пуске.

1—4 — изменение активного сопротивления (1 — с учетом всех факторов; 2 — под влиянием только повышения температуры; 3 и 4 — под влиянием только вытеснения тока соответственно с учетом и в пренебрежении зависимостью k_r от температуры); 5 — изменение индуктивности.

Под влиянием изменения параметров успокоительной обмотки в области больших скольжений вещественные части частотных характеристик $x_d(js)$ и $x_q(js)$ уменьшаются, а мнимые возрастают; в зоне малых скольжений расхождение расчетных кривых незначительно, однако наблюдается более быстрый рост шкалы скольжений. Следует отметить, что близкое совпадение характеристик $x_d(js)$ и $x_q(js)$, полученных без учета изменения параметров успокоительной обмотки, с построенными по данным опытов затухания постоянного тока в обмотке якоря при больших скольжениях говорит о правильном учете взаимных связей между цепями машины в расчетной методике.

Исходя из описанного выше изменения характеристик $x_d(js)$ и $x_q(js)$, нетрудно объяснить влияние изменения параметров успокоительной обмотки на зависимость развиваемого машиной вращающего момента. Оно проявляется в существенном возрастании начального пускового момента и небольшом изменении максимального момента, сопровождающемся возрастанием критического скольжения. Значение начального пускового момента при этом близко к опытному значению, найденному по кривой разгона, хотя и несколько меньше его. Можно отметить близкое совпадение кривых вращающего момента, полученных расчетным путем без учета изменения параметров успокоительной обмотки и исходя из характеристик $x_d(js)$ и $x_q(js)$, найденных из опытов затухания постоянного тока в обмотке якоря.

Выводы. 1. Разработанный метод определения частотных и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин с учетом изменения параметров успокоительных обмоток под влиянием насыщения стали в направлениях потока лазового рассеяния, вытеснения тока и нагревания, реализуемый с помощью ЦВМ, дает возможность значительно повысить точность расчетов.

2. Результаты расчетов, выполненных для ряда машин с различными номинальными данными и конструктивным исполнением, и опытные данные показывают, что каждый из перечисленных факторов может оказать существенное влияние на характеристики машины, распределение токов и превышений температуры в успокоительной обмотке при пуске.

3. Предусмотренное программой расчета боль-

шое число произвольно задаваемых значений скольжения (51) позволяет получить детальную физическую картину явлений, протекающих в машине при пуске, в любой зоне скольжений.

4. Данные расчета по изложенной методике могут быть взяты за основу при нахождении распределения превышений температуры по длине стержней успокоительной обмотки и расчете ее механической прочности [Л. 10 и 11].

5. При проектировании машины программа позволяет с небольшой затратой времени выбрать оптимальное конструктивное исполнение успокоительной обмотки как с точки зрения получения желательных частотных и пусковых характеристик, так и с точки зрения равномерного распределения токов и превышений температуры между стержнями обмотки. Использование программы для решения такой задачи описано в [Л. 12].

6. Дальнейшее совершенствование описанного метода определения частотных и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин требует создания более строгих методов учета насыщения стали в направлении потока рассеяния статора, потерь в стали, влияния дополнительных успокоительных контуров ротора, а также уточнения методов расчета параметров обмотки возбуждения и цепей успокоительной обмотки.

Литература

1. White J. C., Synchronous motor starting performance calculation, Tr. AIEE, v. 75, pt. III, 1956.
2. Carpentier L., Ruelle G., Analyse du fonctionnement asynchrone des machines, a poles saillants, a l'aide d'un calculateur electronique numerique, REM, 1957, № 109.
3. Талалов И. И., Определение токов успокоительных обмоток явнополюсных синхронных машин, Сборник научных трудов Ивановского энергетического института, вып. VIII, 1958.
4. Талалов И. И., Токи успокоительных обмоток в асинхронном режиме явнополюсных синхронных машин, Известия вузов, «Энергетика», 1959, № 7.
5. Талалов И. И., Расчет сопротивлений цепей синхронной машины, Сборник научных трудов Ивановского энергетического института, вып. X, 1962.
6. Benda B., Vyzkum parametru tlumiciho vinuti synchroonniho alternatoru na fyzikalnim modelu, Elektrotechn. Obzor, 1960, № 10.
7. Tuschak R., Aramkiszoritas villamos gepek korke-resztmetszetu hornyaiba agyazott tomor vezetokben, Elektrotechnika, 1957, № 1, 2.
8. Талалов И. И. и Мишуков В. К., Критерии подобия и моделирование процесса нагревания стержня, Известия АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1967, № 2.
9. Баталов Ю. Н. и др., Пуск мощного синхронного гидрогенератора в режиме двигателя, «Электротехника», 1965, № 8.
10. Талалов И. И. и Мишуков В. К., Уточненный тепловой расчет короткозамкнутых обмоток ротора машин переменного тока, «Электротехника», 1967, № 8.
11. Талалов И. И. и Мишуков В. К., Расчет на ЦВМ механической прочности успокоительных обмоток явнополюсных синхронных машин при пуске. Вопросы теории и надежности электрических машин и аппаратов, Сборник научных трудов Ивановского энергетического института, изд-во «Энергия», 1967.
12. Талалов И. И. и Горшков А. П., Влияние конструкции успокоительной обмотки на пусковые характеристики мощного синхронного компенсатора, Сборник научных трудов Ивановского энергетического института, изд-во «Энергия», 1967.

[27.12.1969]

Установившиеся процессы в импульсной системе регулирования электрических машин

Е. Г. ОРЛОВ и И. В. БУЛИН-СОКОЛОВ

Воронеж

Использование полупроводниковых приборов в режиме переключения позволило создать надежные и экономичные регуляторы электрических машин, обеспечивающие стабильную работу систем регулирования в различных эксплуатационных условиях. Режим переключения транзисторных регуляторов наиболее часто обеспечивается за счет воздействия на вход усилителя с релейной или близкой к релейной характеристикой внешнего периодического сигнала синусоидальной или пилообразной формы [Л. 1 и 2]. В литературе по исследованию таких систем релейная характеристика усилителя заменяется линеаризованной в соответствии с теорией вибрационной линеаризации и вся система рассматривается как линейная [Л. 3]. При этом не учитывается влияние изменения регулируемой величины с частотой следования импульсов на входной сигнал реле, что часто приводит к погрешностям при расчете установившихся процессов в системе.

В статье проанализированы квазиустановившиеся процессы в импульсной системе регулирования скорости вращения микроэлектродвигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов при воздействии на вход релейного усилителя периодического сигнала пилообразной формы с учетом отмеченного обстоятельства.

Структурная схема рассматриваемой системы регулирования (рис. 1, а) состоит из усилителя с релейной характеристикой P и линейной части.

Объектом регулирования служит микроэлектродвигатель постоянного тока с передаточной функцией $W(p)$, а возмущающим воздействием — момент нагрузки M_n , который воздействует на систему регулирования через звено с передаточной функцией $W_n(p)$. Регулирование осуществляется по отклонению регулируемой величины ω от заданного значения ω_0 , выявляемого чувствительным элементом $W_{\text{ч.з.}}(p)$. На выходе чувствительного эле-

мента наряду с полезным сигналом $u_{\text{ч.з.}}$, определяемым значением ω , содержится сигнал пилообразной формы $f(t)$, условно приложенный ко входу релейного элемента (рис. 1, а).

При анализе системы приняты следующие допущения:

характеристика релейного усилителя идеальная с гистерезисом;

фронты пилообразного сигнала прямолинейны; амплитуда пилообразного сигнала не зависит от значения регулируемого параметра;

параметры линейной части системы неизменны; микроэлектродвигатель работает в режиме непрерывных токов якоря.

В исследуемой системе при $T_{\text{эм}} > 4T_{\text{я}}$ [Л. 4]

$$W(p) = \frac{c_e}{(T'_{\text{я}}p + 1)(T'_{\text{э}}p + 1)}; \quad (1)$$

$$W_n(p) = \frac{c_m(T_{\text{я}}p + 1)}{(T_{\text{я}}'p + 1)(T_{\text{эм}}p + 1)}, \quad (2)$$

где $T'_{\text{эм}}$, $T'_{\text{я}}$ — приведенные постоянные времени двигателя, определяемые электрохимической постоянной времени и постоянной времени цепи якоря [Л. 4]; c_e — коэффициент передачи двигателя по напряжению питания; c_m — коэффициент передачи двигателя по моменту нагрузки.

Передаточная функция чувствительного элемента имеет следующий вид:

$$W_{\text{ч.з.}}(p) = k_{\text{ч.з.}}W'_{\text{ч.з.}}(p), \quad (3)$$

где $k_{\text{ч.з.}}$ — коэффициент передачи чувствительного элемента.

Напряжение на выходе реле равно:

$$u_p = k_p \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} \sigma - \sigma_1 \geq 0, \dot{\sigma} > 0; \\ \sigma - \sigma_2 \geq 0, \dot{\sigma} < 0; \end{array} \right. \quad (4)$$

$$u_p = 0 \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} \sigma - \sigma_1 \leq 0, \dot{\sigma} > 0; \\ \sigma - \sigma_2 \leq 0, \dot{\sigma} < 0, \end{array} \right.$$

где k_p — амплитуда импульса напряжения на выходе реле; σ — входной сигнал реле; σ_1 — напряжение срабатывания реле; σ_2 — напряжение отпускания реле.

Для установившегося режима работы структурную схему системы преобразуем к простейшему виду, показанному на рис. 1, б, где

$$g = (\omega_0 + c_m M_n) k_{\text{ч.з.}} \quad (5)$$

Известно, что при наличии внешнего периодического воздействия в релейной системе возможно два режима. Первый режим соответствует биениям между автоколебаниями системы и вынужденными колебаниями. При работе во втором режиме система регулирования совершает вынужденные колебания с частотой внешнего воздействия (явление син-

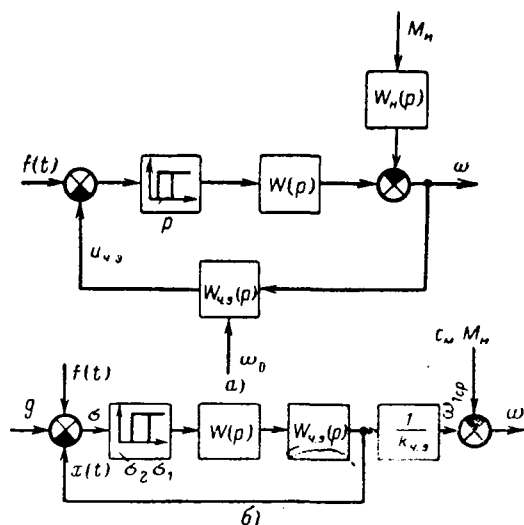


Рис. 1. Структурные схемы системы регулирования.

хронизации). Исходя из минимума потерь в регуляторе и минимума пульсаций регулируемой величины, оптимальным режимом работы системы является синхронный режим. Определим условия существования синхронного режима в системе.

При работе в синхронном режиме на вход линейной части системы подаются периодические импульсы прямоугольной формы длительностью T_n с периодом следования T , определяемым сигналом $f(t)$.

Реакцию линейной части системы регулирования на прямоугольные импульсы можно определить при интегрировании дифференциального уравнения, соответствующего передаточной функции

$$k(p) = \frac{Q(p)}{G(p)} = W(p)W_{ч.з}(p). \quad (6)$$

При простых полюсах $K(p)$ можно представить в таком виде:

$$K(p) = \sum_{i=1}^k \frac{C_i}{p - p_i}, \quad (7)$$

где

$$C_i = \frac{Q(p_i)}{G'(p_i)}; \quad G(p_i) = \frac{dG}{dp} \Big|_{p=p_i};$$

p_i — полюсы передаточной функции $K(p)$.

Принтегрировав уравнение (7), получим следующие выражения для выходной координаты элементарной компоненты:

$$\left. \begin{aligned} X_i &= C_i k_p + (X_{0i} - C_i k_p) e^{-\frac{t}{T_i}}, \quad nT \leq t \leq n(T + T_n); \\ X_i &= X_{1i} e^{-\frac{t}{T_i}}, \quad n(T + T_n) \leq t \leq (n+1)T, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где X_{0i} — значение выходной координаты i -й компоненты в начале n -го импульса; X_{1i} — значение выходной координаты i -й компоненты в конце n -го импульса.

Уравнения (8) для микроэлектродвигателя справедливы при работе его в режиме непрерывных токов в цепи якоря, т. е. при

$$\frac{T_n}{T} + \frac{T_n}{T} \ln \left[1 + \left(\frac{\omega_{х.х}}{\omega} - 1 \right) \left(1 - e^{-\frac{T_n}{T}} \right) \right] \leq 1,$$

где $\omega_{х.х}$ — скорость идеального холостого хода микроэлектродвигателя.

Выходную величину линейной части системы можно записать в таком виде:

$$X(t) = \sum_{i=1}^k X_i(t). \quad (9)$$

Моменты переключения реле характеризуются такими условиями:

$$\sigma = \sigma_1; \quad (10)$$

$$\sigma > 0; \quad (11)$$

$$\sigma = \sigma_2; \quad (12)$$

$$\sigma < 0. \quad (13)$$

В соответствии со схемой, изображенной на рис. 1, б, входная величина реле равна:

$$\sigma = f(t) + g - x(t). \quad (14)$$

Обозначив длительность нарастающего фронта пилообразного сигнала через a , спадающего фронта — через b , амплитуду сигнала — через A и сдвиг по времени между максимумом сигнала и передним фронтом импульса выходного напряжения реле — через φ , можно записать для нарастающего и спадающего фронтов сигнала $f(t)$ соответственно следующие уравнения:

$$f_1(t) = \frac{A}{a} (T_n + t - b - \varphi); \quad (15)$$

$$f_2(t) = \frac{A}{b} (b + \varphi - t). \quad (16)$$

Из уравнений (8) — (10), (12), (14) — (16) с учетом обозначений

$$\frac{T_n}{T} = \gamma; \quad \frac{T}{T_i} = \beta_i \quad (17)$$

получим выражения, определяющие моменты переключения реле в установившемся режиме:

$$g + \frac{A}{b} (b + \varphi - T_n) - \sum_{i=1}^k C_i k_p \lambda_{2i} = \sigma_2; \quad (18)$$

$$g + \frac{A}{a} (T - b - \varphi) - \sum_{i=1}^k C_i k_p \lambda_{3i} = \sigma_1, \quad (19)$$

где

$$\lambda_{2i} = \frac{1 - e^{-\gamma \beta_i}}{1 - e^{-\beta_i}}; \quad (20)$$

$$\lambda_{3i} = \frac{e^{-(1-\gamma) \beta_i} - e^{-\beta_i}}{1 - e^{-\beta_i}}. \quad (21)$$

Исключая из уравнений (18) и (19) величину g , получим выражение для определения φ :

$$\varphi = \frac{\frac{A}{b} \gamma T - \Delta \sigma + \sum_{i=1}^k C_i k_p \lambda_i}{AT} ab, \quad (22)$$

где

$$\lambda_i = \lambda_{2i} - \lambda_{3i} = \frac{1 - e^{-\gamma \beta_i} [1 - e^{-(1-\gamma) \beta_i}]}{1 - e^{-\beta_i}}; \quad \Delta \sigma = \sigma_1 - \sigma_2.$$

Необходимым условием существования синхронного режима с периодом T являются неравенства:

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq f_1(T - T_n) \leq A; \\ 0 &\leq f_2(T_n) \leq A. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Отсюда с учетом уравнений (15), (16) и (22) получим условия существования синхронного режима:

$$\left. \begin{aligned} A &\geq A_{1кр} = -\frac{F}{\gamma} \frac{b}{T}; \quad A \geq A_{2кр} = \frac{F}{1-\gamma} \frac{b}{T}; \\ A &\geq A_{3кр} = \frac{F}{\gamma} \frac{a}{T}; \quad A \geq A_{4кр} = -\frac{F}{1-\gamma} \frac{a}{T}, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где

$$F = \sum_{i=1}^k C_i k_p \lambda_i - \Delta \sigma. \quad (25)$$

Уравнения (18) и (19) позволяют также определить параметры вынужденных колебаний координат

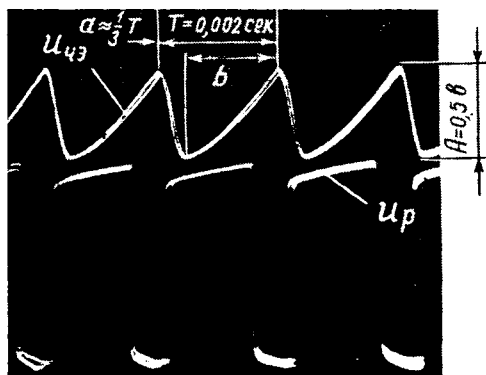


Рис. 2. Осциллограмма напряжений при устойчивой работе системы регулирования.

нат звеньев системы в установившемся режиме работы при заданных параметрах внешнего периодического сигнала в зависимости от величины возмущения.

Исключая из (18) и (19) величину ϕ , получим зависимость относительной длительности импульсов на выходе релейного элемента от внешнего воздействия g и параметров системы:

$$g = \frac{1}{T} \left[b\sigma_2 + a\sigma_1 + b \sum_{i=1}^k C_i k_p \lambda_{2i} + a \sum_{i=1}^k C_i k_p \lambda_{3i} \right] - A(1 - \gamma). \quad (26)$$

При решении этого уравнения необходимо следить за выполнением условий (11) и (13).

Изложенный способ определения параметров вынужденных колебаний основан на предположении, что эти колебания существуют. Поэтому он должен быть дополнен исследованием устойчивости найденного режима. Исследование устойчивости синхронного режима может быть проведено при изучении процесса его установления на основе нелинейных разностных уравнений (8) — (12).

При работе системы регулирования в синхронном режиме регулируемая величина совершает вынужденные колебания. Обычно при эксплуатации рассматриваемых систем интересуются средним значением регулируемой величины. Для среднего

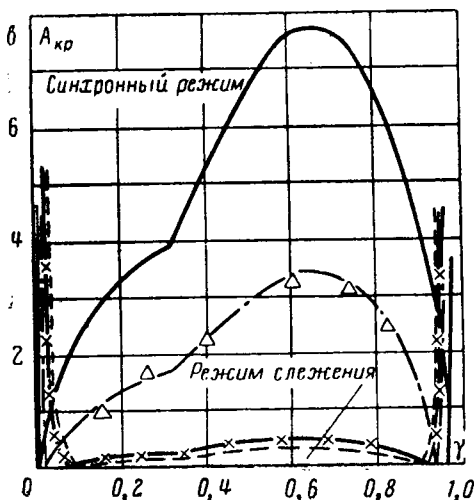
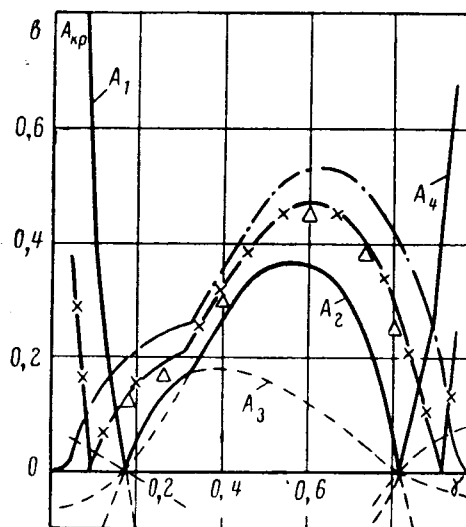


Рис. 3. Зависимость $A_{кр} = f(\gamma)$ при $\beta_1=4$, $\beta_2=0,03$ в и $k_0=67,5$ в.
— $\beta_2=1$; — — — $\beta_2=0,5$; —X—X— $\beta_2=0,1$; — — — $\beta_2=0,05$; Δ — экспериментальные данные.

Рис. 4. Зависимость $A_{кр} = f(\gamma)$ при $\beta_1=4$ и $\beta_2=0,1$, $k_0=67,5$ в.

— — — $\Delta\sigma=0$;
—X—X— $\Delta\sigma=0,03$ в;
— — — $\Delta\sigma=0,1$ в;
 Δ — экспериментальные данные.



значения регулируемой величины (рис. 2) можно записать:

$$\omega_{cp} = \frac{k_0 \gamma}{k_{\text{ч.в}}} - c_m M_n, \quad (27)$$

где

$$k_0 = c_e k_{\text{ч.з}} k_p;$$

значение γ определяется по соотношению (26). Если учесть выражение (5), то можно получить

$$\omega_{cp} = \frac{k_0 \gamma - g}{k_{\text{ч.в}}} + \omega_0. \quad (28)$$

Приращение среднего значения регулируемой скорости относительно заданного значения будет равно:

$$\Delta\omega_{cp} = \frac{k_0 \gamma - g}{k_{\text{ч.в}}}. \quad (29)$$

Рассмотрим на основе полученных соотношений характеристики дискретной системы регулирования микроэлектродвигателя постоянного тока типа ДПР-52-Н6-03.

Основные параметры микроэлектродвигателя и регулятора соответственно следующие:

$$c_e = 23,5 \text{ 1/сек} \cdot \text{в}, T_1 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ сек}, k_p = 27 \text{ в}, \omega_0 = 314 \text{ 1/сек}, k_{\text{ч.з}} = 0,025 \text{ в} \cdot \text{сек};$$

$$c_m = 1,8 \frac{1/\text{сек}}{\text{г} \cdot \text{см}}, T_2 = 40 \cdot 10^{-3} \text{ сек}, T = 0,002 \text{ сек},$$

$$\sigma_1 = 0,18 \text{ в}, \sigma_2 = 0,15 \text{ в}, W'_{\text{ч.з}}(p) = \frac{1}{0,2 \cdot 10^{-4} p + 1}.$$

Параметры внешнего периодического сигнала для данной системы (рис. 2) имеют следующие значения: $A=0,5$ в; $a=\frac{1}{3}T$.

Зависимости критических значений амплитуд пилообразного сигнала от параметров системы, определяющие устойчивую работу в синхронном режиме, приведены на рис. 3 и 4, из которых следует, что с увеличением гистерезиса реле и электромеханической постоянной времени микроэлектродвигателя критическое значение амплитуды A уменьшается, причем влияние электромеханической постоянной времени более существенное, чем влияние гистерезиса реле. При значении $A < A_{кр}$ система работает в режиме слежения (рис. 5), при $A > A_{кр}$ в системе существует синхронный режим (рис. 2),

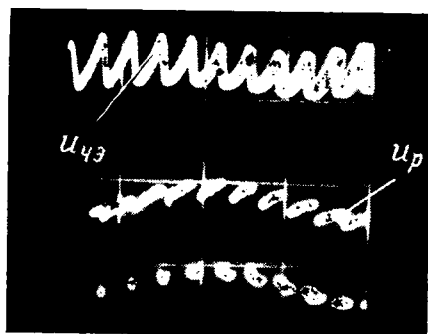


Рис. 5. Осциллограммы напряжений при работе системы регулирования в режиме слежения.

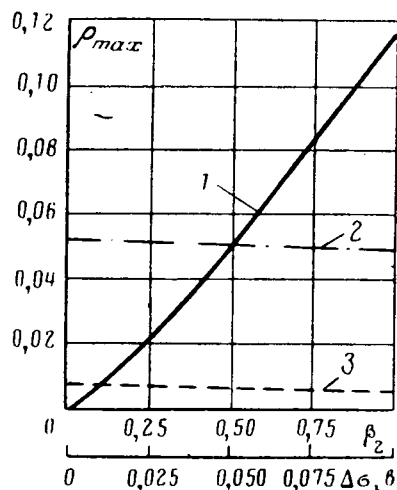


Рис. 6. Зависимость $\rho_{\max}$ от β_2 и $\Delta\sigma$ при $\beta_1=4$.

1 — $\rho_{\max} = \psi_1(\beta_2)$, $\Delta\sigma = 0,03$ в;
2 — $\rho_{\max} = \psi_2(\Delta\sigma)$, $\beta_2 = 0,5$;
3 — $\rho_{\max} = \psi_3(\Delta\sigma)$, $\beta_2 = 0,1$.

поэтому при проектировании систем регулирования необходимо соблюдать это условие.

На рис. 6 приведена зависимость максимального значения относительной критической амплитуды $\rho_{\max} = \frac{A_{кр \max}}{k_0}$ в зависимости от параметров системы регулирования, которая позволяет выбрать необходимое значение A , удовлетворяющее условию $A > A_{кр}$ во всех режимах работы.

Зависимости ошибки регулирования по среднему значению от момента нагрузки, рассчитанные по соотношению (29) при различных параметрах системы ($\beta_1 = \frac{T}{T_1} = 4$; $\beta_2 = \frac{T}{T_2} = 0,05$), приведены на рис. 7.

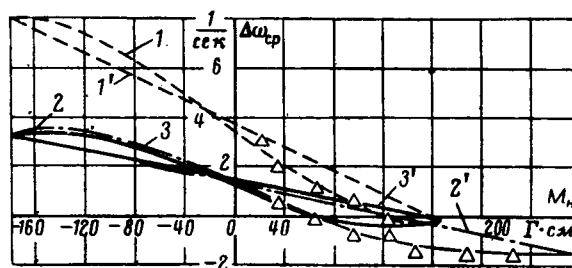


Рис. 7. Зависимости ошибки регулирования по среднему значению от параметров системы при $\Delta\sigma=0,03$ в, $\beta_1=4$, $\beta_2=0,05$.
— $A=0,5$ в, $k_0=67,5$ в; — — — $A=1$ в, $k_0=67,5$ в; — · — · — $A=0,5$ в, $k_0=85$ в; Δ — экспериментальные данные.

Учет колебаний регулируемой величины с частотой вынуждающего сигнала позволяет получить зависимости для определения ошибки системы (кривые 1, 2, 3), которые отличаются от приближенных зависимостей (1', 2', 3'), полученных методом вибрационной линеаризации. Представленные графики охватывают области работы микроэлектродвигателя в генераторном и двигательном режимах, которые разделены осью ординат.

Параметры системы регулирования (A , k_0) существенно влияют на величину статической ошибки регулирования. Расчет статической ошибки приближенным методом [Л. 3] дает заниженное значение погрешности регулирования по сравнению с действительными значениями. Расчет дискретной системы регулирования предлагаемым методом позволяет получить результаты, хорошо совпадающие с экспериментальными данными.

Литература

1. Бунаков В. П. и Гаспаров Р. Г., Полупроводниковые регуляторы напряжения и частоты электрических машин, изд-во «Энергия», 1966.
2. Булин-Соколов И. В. и Орлов Е. Г., Статические характеристики системы стабилизации скорости микродвигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ, Московский энергетический институт, 1967.
3. Красовский А. А. и Поспелов Г. С., Основы автоматики и технической кибернетики, Госэнергоиздат, 1962.
4. Яновский В. И. и др., Электроприводы летательных аппаратов, Изд. Ленинградской военно-инженерной академии им. Можайского, 1965.

[9.12.1969].



УДК 62—523.3

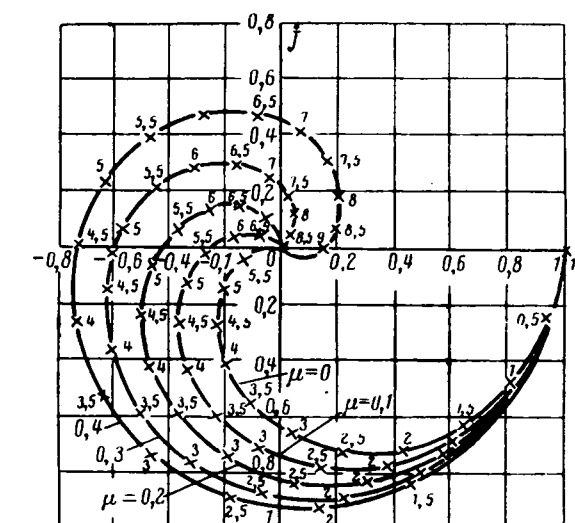
Графо-аналитический метод построения амплитудно-фазовых характеристик систем автоматического управления и стабилизации

С. Я. БЕРЕЗИН

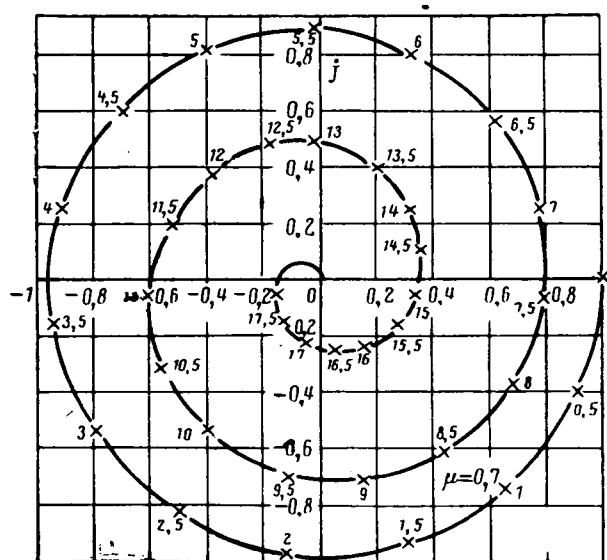
Ленинград

При синтезе корректирующих устройств систем автоматического управления и при определении параметров отдельных их элементов [Л. 1—3] необходимо знать амплитудно-фазовые характеристики, соответствующие определенным управляющим внешним воздействиям.

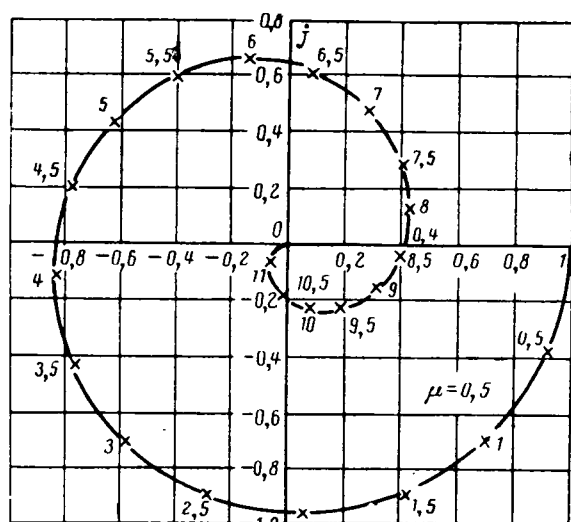
Ранее [Л. 1 и 3] была рассмотрена одна из возможных методик и приведены таблицы для определения амплитудно-фазовых характеристик элементов и систем автоматического управления по заданному переходному процессу при единичном скачкообразном воздействии. Пользуясь этой методикой,



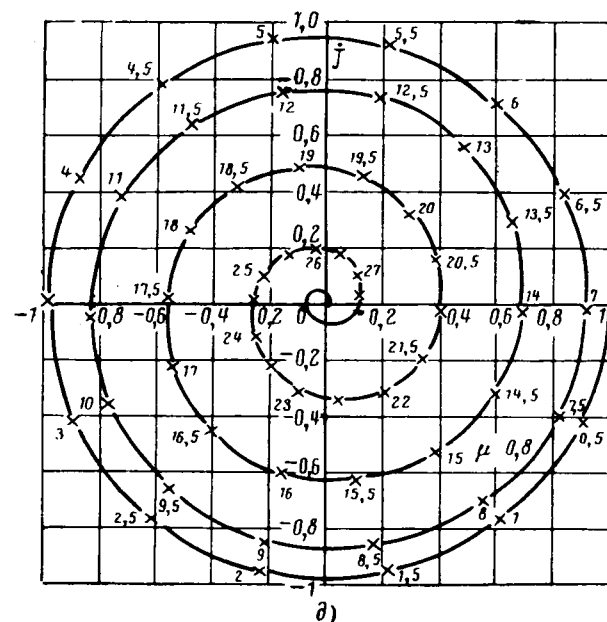
а)



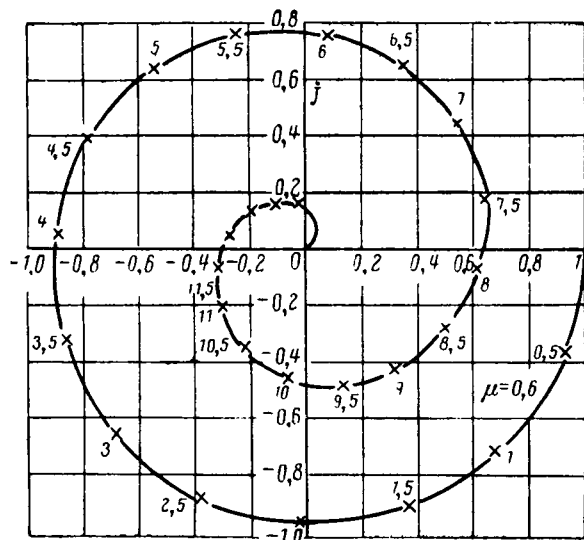
б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Амплитудно-фазовые характеристики для единичных трапецидальных характеристик переходного процесса.

можно найти вещественную и мнимую частотные характеристики, а по ним построить и искомую амплитудно-фазовую характеристику.

Указанная методика определения амплитудно-фазовых характеристик значительно упрощается, если пользоваться не таблицами, а предварительно построенными амплитудными и фазовыми характеристиками для разных коэффициентов наклона единичных трапеций. Эти характеристики можно использовать и для построения вещественной и мнимой характеристик систем автоматической стабилизации.

Ранее были выведены выражения для вещественной $P(\omega)$ и мнимой $Q(\omega)$ частотных характери-

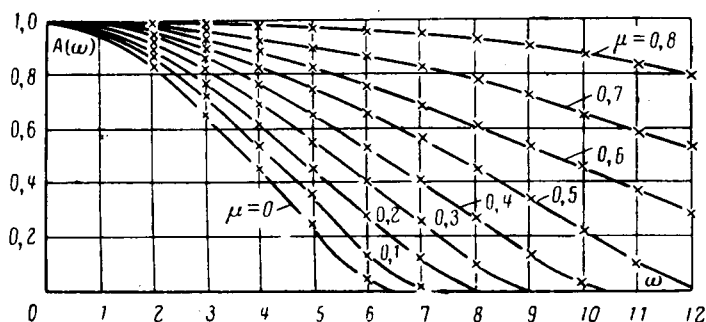


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики единичных трапецидальных характеристик переходного процесса.

стик [Л. 1 и 3], соответствующие единичным трапециям (с высотой $q_{01}=1$ и основанием $t_{0i}=1$):

$$P^*_t(\omega^*) = \frac{\sin \omega^* - \sin \mu_t \omega^*}{\omega^* (1 - \mu_t)}; \quad (1)$$

$$Q^*_t(\omega^*) = \frac{\cos \mu_t \omega^* - \cos \omega^*}{\omega^* (1 - \mu_t)}, \quad (2)$$

где $\mu_t = \frac{t_{dt}}{t_{0i}}$ — коэффициент наклона трапеции; t_{dt} — верхнее основание трапеции; t_{0i} — нижнее основание.

Пользуясь уравнениями (1) и (2), можно получить выражения для модуля $A(\omega)$ и фазы амплитудно-фазовой характеристики соответствующей единичной трапеции:

$$A_i^*(\omega^*) = P_i^*(\omega^*)^2 + Q_i^*(\omega^*)^2; \quad (3)$$

$$A^*_i(\omega^*) = \frac{\sqrt{2}}{\omega^* (1 - \mu_t)} \sin \frac{\omega^* (1 - \mu_t)}{2}.$$

Фазу векторов амплитудно-фазовой характеристики можно определить по следующей формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi_t = \frac{Q^*_t(\omega^*)}{P^*_t(\omega^*)} = \frac{\cos \mu_t \omega^* - \cos \omega^*}{\sin \omega^* - \sin \mu_t \omega^*}.$$

Преобразовав эту формулу, получим:

$$\operatorname{tg} \varphi_t = \operatorname{tg} \frac{\omega^* (1 + \mu_t)}{2},$$

откуда

$$\varphi_t = \frac{\omega^* (1 + \mu_t)}{2}. \quad (4)$$

Пользуясь характеристиками, приведенными на рис. 1, можно непосредственно построить амплитудно-фазовые характеристики без предварительного определения вещественной и мнимой характеристик. Для этого следует сначала определить значения амплитуд и фаз для соответствующих коэффициентов наклона трапеций во всем диапазоне частот. Затем каждое значение амплитуды и частоты привести к истинному масштабу:

$$A_i(\omega^*) = A^*_i(\omega^*) q_{0i}; \quad \omega = \frac{\omega^*}{t_{0i}}$$

и произвести геометрическое суммирование векторов всех характеристик для одинаковых значений частот.

При определении амплитудно-фазовых характеристик удобнее пользоваться амплитудно-частотными и фазо-частотными характеристиками, приведенными на рис. 2 и 3. При использовании этих

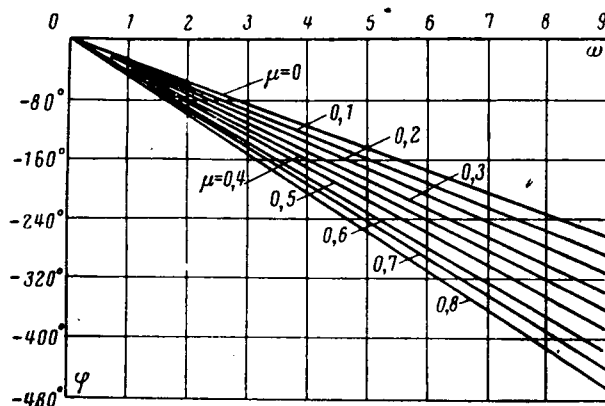


Рис. 3. Фазо-частотные характеристики единичных трапецидальных характеристик переходного процесса.

характеристик приведение их к истинному масштабу достигается изменением масштаба по осям координат.

Для ускорения построения результирующей амплитудно-фазовой характеристики как в первом, так и во втором случаях рекомендуется сначала построить в истинном масштабе амплитудно-фазовые характеристики для всех трапеций, а затем уже непосредственно по этим характеристикам производить алгебраическое суммирование вещественных и мнимых векторов для соответствующих частот.

На рис. 4 показан процесс определения результирующей вектора $\vec{OA}$ по трем амплитудно-фазовым характеристикам путем геометрического сложения соответствующих векторов $\vec{OC} = \vec{OA} + \vec{OB}$, $\vec{OE} = \vec{OC} + \vec{OD}$ и путем суммирования вещественных и мнимых векторов:

$$P(\omega) = P_1(\omega) + P_2(\omega); \quad Q(\omega) = Q_1(\omega) + Q_2(\omega) + Q_3(\omega).$$

Вычисление амплитудно-фазовых характеристик можно также производить аналитически, пользуясь табличным методом.

Все вышеизложенные рекомендации, а также и методы построения амплитудно-фазовых характеристик, имеющиеся в [Л. 4], справедливы для систем автоматического управления с управляющим воздействием на входе системы, для которых передаточная функция замкнутой системы имеет следующий вид:

$$\Phi(j\omega) = \frac{W_0(j\omega)}{1 + W_0(j\omega)}, \quad (5)$$

где $W_0(j\omega)$ — комплексная передаточная функция разомкнутой автоматической системы.

Для систем автоматической стабилизации внешнее воздействие приложено в большинстве случаев к объекту регулирования и передаточная функция

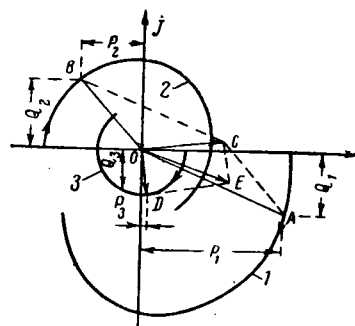


Рис. 4. Определение результирующей амплитудно-фазовой характеристики.

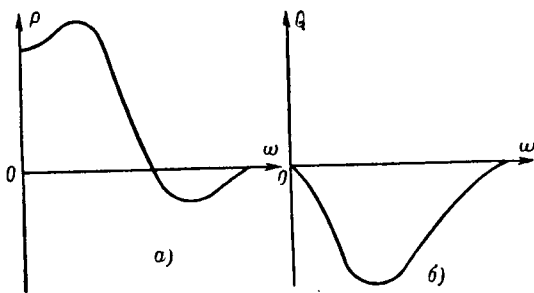


Рис. 5. Вещественная и мнимая частотные характеристики систем автоматического управления при внешнем воздействии на входе системы.

замкнутой системы будет выглядеть следующим образом:

$$\Phi_{\varphi}(j\omega) = \frac{W_{o.p}(j\omega)}{1 + W_o(j\omega)}, \quad (6)$$

где $W_{o.p}(j\omega)$ — комплексная передаточная функция объекта регулирования по возмущению.

Порядок знаменателя передаточной функции объекта регулирования, как правило, значительно меньше порядка знаменателя передаточной функции разомкнутой системы. В некоторых частных случаях

$$W_{o.p}(j\omega) = k_{o.p} = \text{пост.}$$

Поэтому очевидно, что если

$$W_o(j\omega) = \frac{R(j\omega)}{Q(j\omega)},$$

а

$$W_{o.p}(j\omega) = \frac{k_{o.p}}{N(j\omega)},$$

причем порядок $Q(j\omega)$ больше порядка $R(j\omega)$ и значительно больше $N(j\omega)$, то из выражений (5) и (6), нетрудно установить, что в первом случае (при возмущении на входе системы)

$$\Phi(j\omega) = \frac{R(j\omega)}{Q(j\omega) + R(j\omega)} \quad (7)$$

и во втором случае (при возмущении на объекте регулирования)

$$\Phi_{\varphi}(j\omega) = \frac{k_{o.p}Q(j\omega)}{Q(j\omega)N(j\omega) + R(j\omega)}. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) показывают, что порядок числителя в передаточной функции замкнутой автоматической системы стабилизации значительно больше порядка числителя системы автоматического управления.

Например, при $W_{o.p}(j\omega) = k_{o.p}$ и $W_o(j\omega) = \frac{k_o}{Q(j\omega)}$,

$$\Phi(j\omega) = \frac{k_o}{Q(j\omega) + k_o}; \quad (9)$$

$$\Phi_{\varphi}(j\omega) = \frac{k_{o.p}Q(j\omega)}{Q(j\omega) + k_o}. \quad (10)$$

В выражении (10) порядок числителя равен порядку знаменателя.

Выражения (9) и (10) позволяют установить, что вид вещественных и мнимых частотных харак-

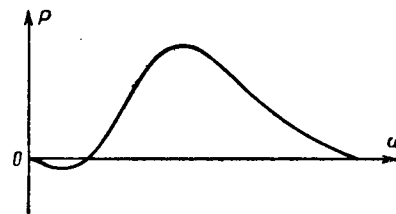


Рис. 6. Вещественная частотная характеристика и система автоматической стабилизации.

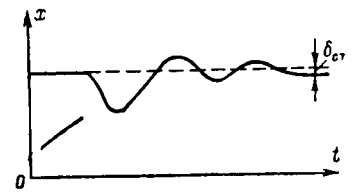


Рис. 7. Переходный процесс в системе автоматической стабилизации.

теристик в обоих рассматриваемых случаях будет различным: в первом случае — при внешнем воздействии на входе системы — вид вещественной и мнимой частотных характеристик соответствует принятому в теории автоматического регулирования (см. рис. 5 [Л. 4]); во втором случае — при внешнем воздействии на объекте регулирования — вещественная частотная характеристика будет иметь вид, приведенный¹ на рис. 6.

Переходный процесс в системе автоматической стабилизации при скачкообразном внешнем воздействии показан на рис. 7.

Различие вещественных частотных характеристик (рис. 5 и 6) свидетельствует о том, что рекомендуемая методика построения амплитудно-фазовых характеристик по заданному переходному процессу при скачкообразном внешнем воздействии для автоматических систем стабилизации будет несправедлива.

В системах стабилизации имеет место, как правило, установившаяся (статическая) ошибка $\delta_{ст}$ (рис. 7). Поэтому график переходного процесса $x(t)$, как и в системах при управляющих воздействиях на входе системы, не удовлетворяет условиям абсолютной интегрируемости [Л. 1 и 3] и не может быть представлен интегралом Фурье. Поэтому рассмотрим разность²

$$x(t) - \delta_{ст} = G(t). \quad (11)$$

Применив к выражению (11) преобразование Фурье

$$\Phi(j\omega) \frac{1}{j\omega} - \frac{\delta_{ст}}{j\omega} = \int_0^{\infty} G(t) e^{-j\omega t} dt,$$

получим

$$\frac{\Phi(j\omega)}{\delta_{ст}} = 1 + \frac{j\omega}{\delta_{ст}} \int_0^{\infty} G(t) e^{-j\omega t} dt,$$

где $\Phi(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$ — как и раньше передаточная функция замкнутой автоматической системы, откуда

$$\frac{P(\omega)}{\delta_{ст}} = 1 + \frac{\omega}{\delta_{ст}} \int_0^{\infty} G(t) \sin \omega t dt; \quad (12)$$

$$\frac{Q(\omega)}{\delta_{ст}} = \frac{\omega}{\delta_{ст}} \int_0^{\infty} G(t) \cos \omega t dt. \quad (13)$$

¹ Рис. 6 построен при тех же допущениях, что и рис. 5 [Л. 4].

² Считаем, что $x_{уст} = 0$, т. е. рассматриваем приращение.

Выражения (12) и (13) показывают, что для определения мнимой частотной характеристики по желаемому переходному процессу можно воспользоваться рекомендациями, сделанными выше, и графиками, приведенными на рис. 1, 2 и 3, изменив лишь знак перед $Q(\omega)$ на обратный.

Для вычисления вещественной частотной характеристики воспользуемся выражением для единичной трапеции, выведенным ранее [Л. 1 и 3]:

$$\int_0^{\infty} q_t(t) \sin \omega t dt = -\frac{1}{\omega^*} \left[1 + \frac{\sin \mu_t \omega^* - \sin \omega^*}{(1 - \mu_t) \omega^*} \right],$$

откуда

$$\begin{aligned} \frac{P_t(\omega^*)}{\delta_{ст}} &= 1 - \frac{1}{\delta_{ст}} \left[1 + \frac{\sin \mu_t \omega^* - \sin \omega^*}{(1 - \mu_t) \omega^*} \right]; \\ P(\omega^*) &= \delta_{ст} - 1 + \frac{\sin \omega^* - \sin \mu_t \omega^*}{(1 - \mu_t) \omega^*}. \end{aligned} \quad (14)$$

Выражение (14) свидетельствует о том, что для вычисления желаемых вещественных частотных характеристик систем автоматической стабилизации можно также воспользоваться приведенными на рис. 1 и 2 графиками, уменьшив значения вещест-

венной частотной характеристики на $(1 - \delta_{ст})$. При $\delta_{ст} \ll 1$ можно с достаточной для практики точностью принять

$$P(\omega^*) = \frac{\sin \omega^* - \sin \mu_t \omega^*}{(1 - \mu_t) \omega^*} - 1. \quad (15)$$

Порядок построения желаемой амплитудно-фазовой характеристики по заданному переходному процессу путем аппроксимации его трапециями останется прежним [Л. 1 и 3].

При построении результирующих характеристик $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ необходимо помнить, что в рассматриваемом случае они положительны.

Литература

1. Березин С. Я., Определение амплитудно-фазовых характеристик линейных систем и элементов по заданному переходному процессу, «Электричество», 1961, № 3.
2. Березин С. Я., Экспериментальное определение параметров элементов систем автоматического регулирования, «Электричество», 1958, № 4.
3. Березин С. Я., Расчет систем автоматического регулирования с помощью обратных амплитудно-фазовых характеристик, Судпромгиз, 1962.
4. Основы автоматического регулирования, Под ред. В. В. Солодовникова, т. 1, Машгиз, 1954.

[28.II.1969]



УДК 62—523.2

О демпфировании упругих колебаний автоматизированного электропривода постоянного тока

Кандидаты техн. наук А. Н. ЧЕРНЫШЕВ, В. Л. ГРУШКО и инж. М. Л. ПРУДКОВ

Днепропетровск

Известно [Л. 1], что упругие механические звенья в передачах электропривод — машина могут обуславливать колебания электромагнитного момента и скорости электродвигателя во время переходных процессов. Колебания момента увеличивают потери в электродвигателе, ухудшают его коммутацию, вызывают дополнительную вибрацию, шум, износ механических узлов и т. п.

В статье анализируются условия возникновения упругих колебаний момента при различных способах демпфирования колебаний скорости автоматизированных электроприводов постоянного тока, широко распространенных в промышленности.

Рассмотрим аналоговую систему автоматического регулирования скорости электропривода постоянного тока с упругой механической передачей к рабочей машине. На рис. 1 приведена структурная схема [Л. 1, 2] такой системы.

Система автоматического регулирования скорости включает в себя два контура регулирования: тока электродвигателя и скорости либо электропривода, либо механизма в зависимости от места установки тахогенератора. Синтез подобных систем, не содержащих упругие связи, широко известен [Л. 2]. Появление упругого звена изменяет структуру объекта регулирования и вносит особенности в синтез системы автоматического регулирования.

Учет упругой связи при конструировании этой системы производится в тех случаях, когда собственная частота упругих колебаний системы

$$\omega_y = \sqrt{c \left(\frac{1}{J_d} + \frac{1}{J_m} \right)},$$

где c — приведенная жесткость упругого звена;

J_d и J_m — момент инерции электродвигателя и момент инерции рабочей машины, приведенный к электродвигателю,

близка к граничному значению или соответствует полосе пропускания системы автоматического регулирования скорости. Так, например, известна рекомендация [Л. 3], что учитывать упругую связь необходимо, если

$$\omega_y \leq \omega_{ст},$$

где $\omega_{ст}$ — частота среза логарифмической амплитудно-частотной характеристики разомкнутого контура регулирования тока двигателя.

При этом предполагается, что контур тока системы автоматического регулирования скорости инвариантен относительно влияния упругой связи (например, благодаря компенсации воздействия на контур тока внутренней обратной связи по э. д. с.

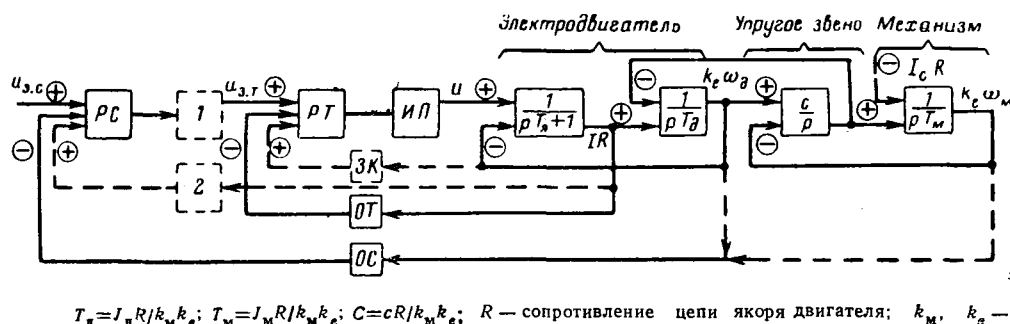


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной системы автоматического регулирования скорости электропривода с упругим звеном в механической передаче.

РС, РТ — регуляторы скорости и тока; ИП — источник питания двигателя; ОС, ОТ — датчики скорости и тока; ЗК — звено компенсации воздействия э. д. с. электродвигателя на контур тока; 1 и 2 — звенья последовательного и параллельного демпфирования упругих колебаний скорости; ω_d , ω_m — угловые скорости электродвигателя и рабочей машины;

электродвигателя, как это показано на рис. 1). Поэтому анализируется обычно лишь контур регулирования скорости [Л. 2], в составе которого контур тока проявляет себя как инерционное звено с постоянной времени, равной $1/\omega_{ст}$.

При более строгом анализе выясняется, что не учитывать влияние упругой связи при оптимизации контура регулирования скорости правомерно, если (см. приложение 1):

при установке тахогенератора на стороне привода

$$\omega_y > \frac{1,5}{\sqrt{n}} \omega_{ст}, \quad (1)$$

где

$$n = \frac{J_d}{J_d + J_m};$$

при установке тахогенератора на стороне рабочей машины

$$\omega_y > 1,5 \omega_{ст}. \quad (2)$$

В системах, где условия (1) и (2) не выполняются, необходимо осуществлять демпфирование колебаний скорости электропривода или рабочей машины. Известны [Л. 3] следующие способы демпфирования: последовательный, параллельный и путем соответствующего выбора параметров Π или $ИП$ — регулятора скорости ($G_{р.с}(p) = V$ или $G_{р.с}(p) = V(\rho\tau + 1)/\rho\tau$).

Однако демпфирование колебаний скорости указанными способами не исключает в ряде случаев колебаний момента электродвигателя, вызываемых возмущениями со стороны нагрузки. В связи с этим проанализируем указанные способы демпфирования упругих колебаний скорости электропривода.

Исходная структурная схема контура регулирования скорости может быть преобразована к видам, изображенным на рис. 2. Из последовательной формы (рис. 2, а и б) легко определяется структура последовательных, а из параллельной формы (рис. 2, в и г) — параллельных корректирующих звеньев, обеспечивающих демпфирование упругих колебаний скорости электродвигателя при регулировании скорости рабочей машины. Одновременно из последовательной формы (рис. 2, а) можно определить параметры регулятора скорости, осуществляющего демпфирование колебаний без дополнительных звеньев 1 или 2, приведенных на рис. 1. Можно показать, что указанный способ применим только при установке тахогенератора на стороне электропривода и при соблюдении следующего условия (приложение 1):

$$\omega_y < 0,2 \omega_{с.с.} \quad (3)$$

где $\omega_{с.с.}$ — частота среза логарифмической амплитудно-частотной характеристики разомкнутого контура регулирования скорости.

При анализе схем, изображенных на рис. 2, можно показать, что в отличие от систем с абсолютно жесткой механической передачей в системах с упругой передачей возмущение со стороны нагрузки передается через дополнительное звено, параметры и структура которого зависят от места получения сигнала обратной связи по скорости.

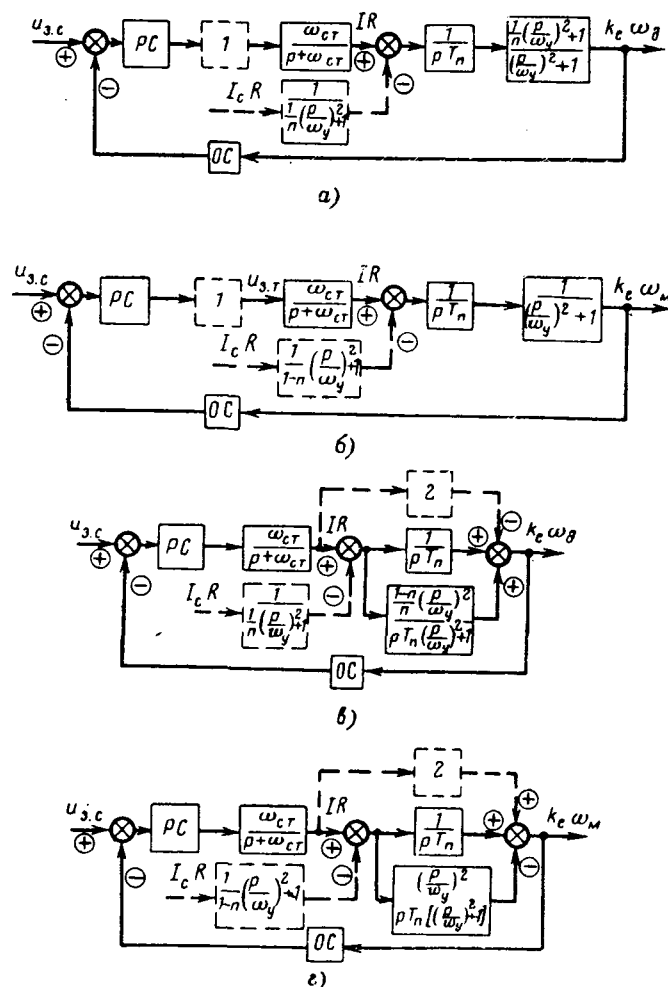


Рис. 2. Преобразованная структурная схема системы автоматического регулирования скорости.

а — последовательное демпфирование скорости и установка тахогенератора на стороне электропривода; б — то же при установке тахогенератора на стороне рабочей машины; в — параллельное демпфирование скорости и установка тахогенератора на стороне электропривода; г — то же при установке тахогенератора на стороне рабочей машины.

Если при указанных возмущениях рассматривать электропривод в качестве своеобразного регулятора момента, то все структурные схемы, изображенные на рис. 2, можно привести к виду, представленному на рис. 3. Структура и параметры звеньев 3 и 4 (рис. 3) зависят как от места установки датчика скорости, так и от способа демпфирования колебаний скорости. В приложении II приведена таблица с передаточными функциями звеньев 3 и 4 для различных способов демпфирования упругих колебаний скорости и двух мест установки тахогенератора: на стороне электропривода и на стороне рабочей машины.

Проанализировав схемы, изображенные на рис. 2 и 3, можно сделать вывод, что передаточная функция для тока (момента) электродвигателя при изменениях нагрузки может быть записана в таком виде:

$$\frac{I(p)}{I_c(p)} = G_3(p) \frac{G_p(p)}{1 + G_p(p)}, \quad (4)$$

где $G_3(p)$ — передаточная функция звена 3, равная 1 для систем, не содержащих упругих звеньев;

$G_p(p)$ — передаточная функция разомкнутого контура скорости системы автоматического регулирования.

При наличии упругой связи звено 3, как это показано в приложении II, в случаях 1, 2, 3 и 5 является недемпфированным колебательным звеном. Переходные функции этого звена $i_3(t)$ (при резком изменении нагрузки) показывают, что возмущение на его входе вызывает на выходе воздействие, которое представляется наложением двух сигналов: первого, повторяющего без искажений по модулю и фазе входное возмущение, и второго, являющегося незатухающим синусоидальным колебанием.

Реакция замкнутого контура момента на первый сигнал

$$I(p) = I_c(p) \frac{G_p(p)}{1 + G_p(p)}$$

демпфирована в той же степени, что и колебания скорости электропривода при регулировании рабочей машины, и не отличается от систем без упругих связей. Реакция на второй сигнал, характерный только для систем с упругими звеньями, может быть представлена в следующем виде:

$$i_m = i_{3m} \left| \frac{G_p(j\omega_3)}{1 + G_p(j\omega_3)} \right|, \quad (5)$$

где ω_3 — частота колебаний звена 3;

i_m, i_{3m} — относительные величины амплитуд колебаний тока (момента) электропривода и выходного сигнала звена 3 (по отношению к току при статической нагрузке I_c).

Для значений $|G_p(j\omega_3)| > 1$:

$$i_m = i_{3m},$$

а для значений $|G_p(j\omega_3)| < 1$:

$$i_m = i_{3m} |G_p(j\omega_3)|.$$

В случаях 2, 3 и 5 (приложение II) значения $|G_p(j\omega_3)| > 1$ имеют место для частот $\omega_3 < \omega_{c.c.}$. При этом амплитуда колебаний тока (момента) не зависит от структуры системы автоматического регулирования. Для частот $\omega_3 > \omega_{c.c.}$ значения i_m зависят от свойств указанной системы.

В первом случае (приложение II) при $n < 1$ модуль $|G_p(j\omega_3)| = 0$ и соответственно $i_m = 0$ благодаря наличию у звена 4 дифференцирующей части $\frac{1}{n} (p/\omega_y)^2 + 1$. И лишь при $n \approx 1$, или $J_d \gg J_m$ случай 1 не отличается от случаев 2, 3 и 5 (приложение II), т. е. демпфирование колебаний скорости путем соответствующего выбора параметров регулятора обеспечивает также и демпфирование колебаний момента.

При частотах $\omega_3 \approx \omega_{c.c.}$ частотная характеристика замкнутой системы автоматического регулирования скорости имеет резонансный пик, величина [Л. 4] которого определяется по следующему равенству:

$$M_p = 1/\sin \gamma,$$

где γ — запас устойчивости контура скорости системы автоматического регулирования скорости по фазе (принимается обычно равным $40-70^\circ$).

Поэтому, если $\omega_3 \approx \omega_{c.c.}$, то

$$i_m = M_p i_{3m} \approx (1,15 - 1,5) i_{3m}.$$

Исходя из вышеуказанного, для случаев 1-3 и 5 (приложение II) можно записать следующие уравнения, определяющие амплитуду упругих колебаний момента электропривода при возмущениях со стороны нагрузки и соответственно при $\omega_3 < \omega_{c.c.}$; $\omega_3 \approx \omega_{c.c.}$; $\omega_3 > \omega_{c.c.}$:

$$i_m = i_{3m}; \quad (6)$$

$$i_m = M_p i_{3m}; \quad (7)$$

$$i_m = \frac{1}{\frac{\omega_3}{\omega_{c.c.}} \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_3}{\omega_{c.c.}}\right)^2}} i_{3m}. \quad (8)$$

Последнее уравнение получено исходя из того, что в области частот $\omega_3 \approx \omega_{c.c.}$ частотные характеристики $|G_p(j\omega_3)|$ и $\left| \frac{\omega_{c.c.}}{j\omega_3} \right|$ интегрирующего звена первого порядка совпадают. Характеристика $20 \lg |G_p(j\omega_3)|$ приведена на рис. 4.

Из приложения II видно, что для 1-4 случаев:

$$i_{3m} = 1; \quad (9)$$

а для случая 5

$$i_{3m} = \frac{n}{1-n}; \quad (10)$$

По уравнениям (6) — (8) с учетом выражений (9) и (10) построены аппроксимированные графики (рис. 4)

$$20 \lg i_m = f(\omega_3^*),$$

где $\omega_3^* = \omega_3/\omega_{c.c.}$.

Указанные графики учитывают различие n в пяти случаях (приложение II). В области $\omega_3 \approx \omega_{c.c.}$

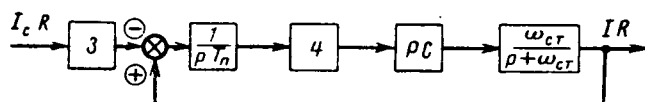


Рис. 3.

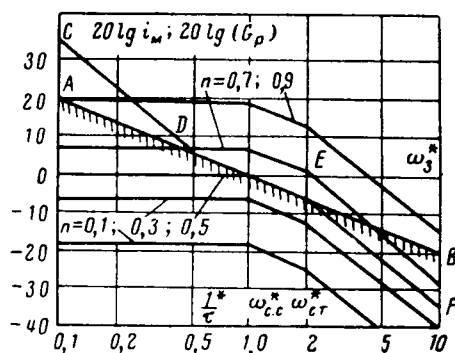


Рис. 4. Амплитуды колебаний тока (момента) электродвигателя в функции $\omega^*_3 = \omega_3/\omega_{с.с.}$. ADEB — предельный график; CDEF — логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разомкнутого двукратно интегрирующего контура системы автоматического регулирования; графики $n=0,1-0,9$ соответствуют пятому случаю.

ординаты $f(\omega^*_3)$ необходимо увеличивать в M_p раз.

На рис. 4 построен также предельный график $i_{м.пр} = f(\omega^*_3)$, в основу которого положена предельно допустимая по условиям коммутации скорость изменения тока якоря двигателя $(di/dt)_{пр}$ (составляющая для крупных машин около $25 I_n/\text{сек}$). Уравнение этого графика получено исходя из того, что при синусоидальных колебаниях с частотой ω_3 наибольшая скорость изменения тока в относительных единицах определяется по выражению

$$(di/dt)_{\max} = i_m \omega_3,$$

откуда

$$i_{м.пр} = \frac{(di/dt)_{пр}}{\omega_3}. \quad (11)$$

Для предельного графика принято, что

$$(di/dt)_{пр} = \omega_{с.с.},$$

часто имеющее место в рассматриваемых системах.

При анализе приложения II и графиков, изображенных на рис. 4, можно сделать следующее заключение.

В системах автоматического регулирования скорости с параллельным демпфированием колебаний скорости и установкой тахогенератора на стороне электропривода частота колебаний момента электродвигателя выше, чем при последовательном демпфировании:

$$\omega_y > \sqrt{n} \omega_y.$$

Вследствие этого при $\omega_y > \omega_{с.с.}$ амплитуда колебаний момента в последнем случае больше.

В системах автоматического регулирования скорости с последовательным демпфированием и измерением скорости на стороне рабочей машины влияние упругой передачи на момент электродвигателя следует учитывать в том случае, если изображение Лапласа возмущения нагрузки выражается полиномом степени, равной или выше второй. Величина возникающего при этом дополнительного возмущения на входе контура тока (момента) электропривода при одной и той же частоте ω_y тем выше, чем больше n .

Амплитуда колебаний момента электродвигателя при $\omega_y < \omega_{с.с.}$ во всех случаях, кроме первого случая (приложение II) при $n < 1$ и пятого при $n \neq 0,5$, равна по величине моменту статической нагрузки. При $\omega_y \approx \omega_{с.с.}$ амплитуда колебаний тока может превысить допустимую по условиям комму-

тации двигателя величину, если

$$(di/dt)_{пр} \leq \omega_{с.с.}$$

В системах автоматического регулирования скорости с параллельным демпфированием и измерением скорости на стороне рабочей машины амплитуда колебаний момента электропривода может превышать предельно допустимую для электродвигателя величину, если $n > 0,5$. Если же $n \ll 0,5$, амплитуда колебаний незначительна.

При соблюдении условия (3) наилучший эффект достигается, если применяется способ демпфирования колебаний скорости соответствующим выбором параметров регулятора, поскольку в этом случае обеспечивается также демпфирование упругих колебаний момента и не усложняется сама система регулирования.

Выводы. В оптимизированной системе автоматического регулирования скорости с упругими звеньями в передачах к рабочей машине при изменениях нагрузки могут возникать нежелательные для электропривода колебания момента.

Недопустима система регулирования с измерением скорости на стороне рабочей машины, если $\omega_y < \omega_{с.с.}$ и $n > 0,5$, поскольку изменения нагрузки вызывают в ней нарушающие нормальную коммутацию колебания тока (момента) электродвигателя при параллельном демпфировании колебаний скорости, либо резкие изменения момента при последовательном демпфировании.

Следует избегать случаев, когда $\omega_y \approx \omega_{с.с.}$, особенно, если $(di/dt)_{пр} \leq \omega_{с.с.}$, поскольку колебания тока при этом могут также ухудшать коммутацию электродвигателя.

Приложение I. Докажем условия (1)–(3), позволяющие либо пренебречь влиянием упругой связи при синтезе систем автоматического регулирования скорости, либо использовать способ демпфирования колебаний скорости соответствующим выбором параметров регулятора, упрощающий эту систему.

Доказательство основано на том положении, что динамические свойства системы определяются в основном участками логарифмической амплитудно-частотной характеристики разомкнутого контура, охватываемыми полосой ± 15 дБ [Л. 4]. Исходя из этого, можно утверждать, что динамические свойства контура регулирования скорости, содержащей упругие звенья, практически не будут отличаться от свойств того же контура системы без упругих звеньев в тех случаях, когда удовлетворяются следующие неравенства (рис. 2 и 5): при установке тахогенератора на стороне привода

$$\sqrt{n} \omega_{y1} > \omega_n, \quad (\text{П-1})$$

либо

$$\omega_{y2} < \omega_n; \quad (\text{П-2})$$

при установке тахогенератора на стороне рабочей машины

$$\omega_{y1} > \omega_n. \quad (\text{П-3})$$

В рассматриваемых системах регулирования

$$\frac{\omega_n}{\omega_{с.с.}} > 1; \quad \frac{\omega_{с.с.}}{\omega_{с.с.}} = 2; \quad \frac{\omega_n}{\omega_{с.с.}} < 1,$$

а при выполнении неравенства (П-1)

$$\frac{\omega_{a.}}{\sqrt{n} \omega_{y1}} < 1; \quad \frac{\omega_n}{\omega_{y1}} < 1; \quad \frac{\omega_{с.с.}}{\sqrt{n} \omega_{y1}} < 1; \quad \frac{\omega_{с.с.}}{\omega_{y1}} < 1.$$

Поэтому из уравнений, соответствующих выражению (П-1),

$$\lg \left[\frac{v}{\omega_{с.с.} T_n} \frac{\left(\frac{\omega_{с.с.}}{\omega_{y1}} \right)^2 \frac{1}{n} + 1}{\left(\frac{\omega_{с.с.}}{\omega_{y1}} \right)^2 + 1} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\omega_{с.с.}}{\omega_{с.с.}} \right)^2 + 1}} \right] = 0,$$

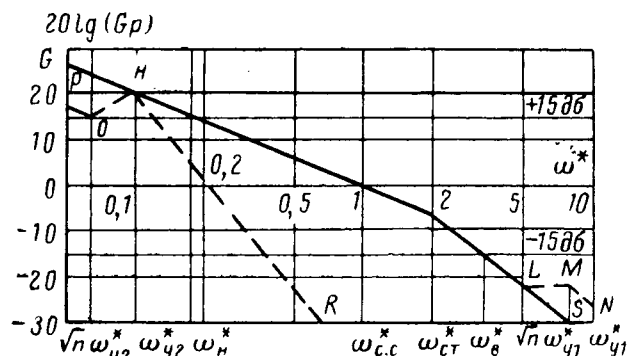


Рис. 5. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика однократно интегрирующего контура скорости системы автоматического регулирования.

а — без упругой связи и с упругой связью, но с параллельным или последовательным демпфированием упругих колебаний скорости (линия GHKLS); б — с упругой связью и установкой тахогенератора на стороне привода: без демпфирования колебаний (линия GHKLMN), с демпфированием колебаний выбором параметров регулятора скорости (линия POHKLS); в — с упругой связью и установкой тахогенератора на стороне механизма и без демпфирования колебаний (линия GHR).

$$20 \lg \left[\frac{V}{\omega_a T_{II}} \frac{\left(\frac{\omega_a}{\omega_{y1}} \right)^2 \frac{1}{n} + 1}{\left(\frac{\omega_a}{\omega_{y1}} \right)^2 + 1} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\omega_a}{\omega_{CT}} \right)^2 + 1}} \right] = -15 \text{ дБ}$$

находим

$$V = \omega_{c,c} T_{II}, \quad (\text{П-4})$$

$$\omega_a \approx 1,5 \omega_{CT}. \quad (\text{П-5})$$

Это свидетельствует о том, что регулятор скорости в оптимизированной системе автоматического регулирования с упругим звеном имеет те же параметры, что и у аналогичной системы без упругих звеньев [Л. 2], а

$$\omega_{y1} > \frac{1,5}{\sqrt{n}} \omega_{CT}.$$

Если удовлетворяется условие (П-2), то

$$\frac{\omega_{c,c}}{\sqrt{n} \omega_{y2}} > 1; \quad \frac{\omega_{c,c}}{\omega_{y2}} > 1; \quad \frac{\omega_H}{\sqrt{n} \omega_{y2}} > 1; \quad \frac{\omega_H}{\omega_{y2}} > 1,$$

а из уравнений

$$\lg \left[\frac{V}{\omega_{c,c} T_{II}} \frac{\left(\frac{\omega_{c,c}}{\omega_{y2}} \right)^2 \frac{1}{n} + 1}{\left(\frac{\omega_{c,c}}{\omega_{y2}} \right)^2 + 1} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\omega_{c,c}}{\omega_{CT}} \right)^2 + 1}} \right] = 0;$$

$$20 \lg \left[\frac{V}{\omega_H T_{II}} \frac{\left(\frac{\omega_H}{\omega_{y2}} \right)^2 \frac{1}{n} + 1}{\left(\frac{\omega_H}{\omega_{y2}} \right)^2 + 1} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\omega_H}{\omega_{CT}} \right)^2 + 1}} \right] = 15 \text{ дБ}$$

получаем:

$$V = n \omega_{c,c} T_{II}; \quad (\text{П-6})$$

$$\omega_H \approx 0,2 \omega_{c,c}. \quad (\text{П-7})$$

Следовательно, регулятор скорости в системе автоматического регулирования с упругим звеном должен иметь коэффициент усиления, отличный от того же в системе без упругого звена, а

$$\omega_y < 0,2 \omega_{c,c}.$$

Если в случае (П-2) к системе автоматического регулирования с упругим звеном предъявлять еще более жесткие требования в отношении качества демпфирования колебаний, то необходимо, чтобы

$$20 \lg |G_p(j \sqrt{n} \omega_{y2})| > 15 \text{ дБ},$$

откуда

$$\omega_{y2} < \frac{0,4 \sqrt{n}}{n+1} \omega_{c,c}.$$

Таким же образом можно показать, что при установке тахогенератора на стороне рабочей машины условие (П-3)

5 Электричество № 4.

также приводит к равенствам (П-4) и (П-5) и, следовательно,

$$\omega_y > 1,5 \omega_{CT}.$$

Условие, аналогичное выражению (П-2) в данном случае вызывает неустойчивость системы, поскольку, как видно из графиков, показанных на рис. 5, наклон логарифмической амплитудно-частотной характеристики контура регулирования скорости в зоне частоты среза увеличивается до -60 дБ/дек , а сдвиг по фазе — до 270° .

Таким образом, при установке тахогенератора со стороны механизма демпфирование упругих колебаний скорости может осуществляться только с помощью последовательной или параллельной коррекции.

Приложение II

Таблица передаточных функций $G_3(p)$ и $G_4(p)$ и переходной функции $i_3(t)$ в зависимости от способа демпфирования колебаний скорости и места установки тахогенератора

Обратная связь по скорости	Способ демпфирования колебаний скорости	$G_3(p)$ $i_3(t)$	$G_4(p)$
ω_H	Параметрами регулятора скорости [Л.3] $V = n \omega_{c,c} T_{II}$ $\tau = \max \left\{ \frac{1}{\sqrt{n} \omega_y}, \frac{2}{n \omega_{c,c}} \right\}$	$\frac{1}{\frac{1}{n} \left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1}$ $\frac{1}{n} \left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1$ $1 - \cos \sqrt{n} \omega_y t$	$\frac{1}{\frac{1}{n} \left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1}$ $\left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1$
ω_H	Звеном 1 $G_1(p) = \frac{\left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1}{\frac{1}{n} \left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1}$	$\frac{1}{\frac{1}{n} \left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1}$ $1 - \cos \sqrt{n} \omega_y t$	1
ω_H	Звеном 2 $G_2(p) = \frac{1 - n \left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2}{p T_{II} \left[\left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1 \right]}$	$\frac{1}{\left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1}$ $1 - \cos \omega_y t$	1
ω_M	Звеном 1 $G_1(p) = \left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1$	$\frac{1}{1 - n \left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1}$ 1	1
ω_M	Звеном 2 $G_2(p) = - \frac{\left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2}{p T_{II} \left[\left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1 \right]}$	$\frac{1}{1 - n \left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1}$ $\frac{1}{\left(\frac{p}{\omega_y} \right)^2 + 1}$ $1 + \frac{n}{1 - n} \cos \omega_y t$	1

Литература

1. Квартальнов Б. В., Динамика электроприводов с упругими связями, изд-во «Энергия», 1965.
2. Неймарк В. Е. и др., Синтез быстродействующих систем управления вентильным электроприводом, «Электричество», 1967, № 4.
3. Speth Winfried, Drehzahlregelkreise mit periodischen Laständerungen oder mit elastisch gekuppelter Arbeitsmaschine, «Siemens — Zeitschrift», 1968, № 2.
4. Кузовков Н. Т., Теория автоматического регулирования, основанная на частотных методах, Оборонгиз, 1960.

[8.12.1969]

Искрение главных контактов коммутационных аппаратов

Канд. техн. наук А. М. РЫВКИН

Всесоюзный электротехнический институт им. В. И. Ленина

Главные контакты коммутационных аппаратов размыкаются под током при очень низком напряжении, когда они зашунтированы дугогасительными контактами. Падение напряжения на замкнутых дугогасительных контактах недостаточно для поддержания электрической дуги на главных, которые, однако, могут искрить за счет электромагнитной энергии в индуктивности.

При длительном сроке службы аппарата, например в переключающих устройствах регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой (РПН), выгорание материала при искрении главных контактов приводит к недопустимому их износу. Кроме того, если контакты помещаются в чистом трансформаторном масле, как например, в устройствах РПН типа РНТ-20 или РНТВ-35/850, то длительная работа с интенсивным искрением может привести к опасному загрязнению масла.

Известно, что для поддержания дуги минимальной длины требуется определенное напряжение [Л. 1—3]. Однако, если контакт размыкается под током, то и при очень низком напряжении может возникнуть бесплазменная — вытянутая дуга [Л. 2] в результате разогрева током контактного перешейка в последний момент перед размыканием. Вытянутая дуга не требует высокого напряжения зажигания и поэтому размыкание под током происходит большей частью, если не с образованием устойчивой дуги, то с искрением.

Для зашунтированных контактов размыкание связано с переходом тока в параллельную ветвь. Когда сопротивление размыкающегося контакта нарастает достаточно медленно и индуктивности малы, ток успевает к моменту отрыва контактирующих поверхностей друг от друга перейти в параллельную ветвь. Тогда размыкание происходит практически без тока и вытянутая дуга не возникает, так как нет достаточно сильного разогрева последнего пятна касания контактов. В этом случае появление дуги (искрение) требует наличия на контактах напряжения, превосходящего некоторое значение, большее, чем сумма ионизационного потенциала и работы выхода материала контактов [Л. 3 и 4]. По данным [Л. 3] пороговое напряжение равно для меди и вольфрама 12—15 в.

Температура, свечение и другие проявления искры зависят от ее объема, т. е. от того как долго будет поддерживаться дуга. В [Л. 6] рассмотрено время существования дуги на главных контактах мощных коммутационных аппаратов и получены условия, которым должна удовлетворять цепь, чтобы длительность возникшей искры была не-
большой.

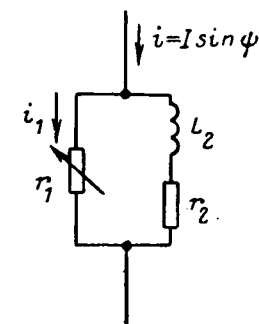


Рис. 1. Расчетная схема замещения электрических соединений главного и дугогасительного контактов.

Опыт показывает, что при слабом искрении на зашунтированных главных контактах при токах порядка сотен ампер искра возникает не при каждом отключении и на частоту искрения влияют не только параметры цепи и фаза тока, но и конструктивные данные аппарата, например, скорость размыкания контактов и среда.

Условия безыскрового размыкания анализируются исходя из предпосылки, что дуга не возникает, если напряжение меньше порогового.

Чтобы обнаружить влияние конструкции на скорость нарастания напряжения на контактах и его величину, необходимо учитывать закон изменения переходного сопротивления. При размыкании сопротивление главных контактов r_1 изменяется не скачком, а нарастает плавно. За время τ это сопротивление возрастает от значения r_0 до бесконечности. В [Л. 1 и 5] приведена зависимость сопротивления от времени t , полученная на основании теории упругого контакта:

$$r_1 = \frac{\tau r_0}{\tau - t}. \quad (1)$$

На рис. 1 показана расчетная схема соединений главных и дугогасительных контактов. Принято, что индуктивность контура L_2 сосредоточена в ветви дугогасительных контактов, так как в ней длина проводов обычно больше, чем в ветви главных. Суммарный ток цепи не зависит от сопротивления контактов:

$$i = I \sin[\psi - \omega(\tau - t)], \quad (2)$$

где ψ — угол, соответствующий моменту отрыва контактов при размыкании.

Уравнения Кирхгофа для схемы рис. 1 с учетом (1) и (2) дают линейное дифференциальное уравнение относительно тока i_1 главных контактов:

$$\frac{di_1}{d(\tau - t)} - \left[\frac{\tau r_0}{L_2(\tau - t)} + \frac{r_2}{L_2} \right] i_1 = -\frac{z_2}{L_2} I \sin[\psi + \varphi - \omega(\tau - t)], \quad (3)$$

где

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L_2}{r_2}.$$

Решение уравнения (3) в квадратурах имеет вид:

$$i_1 = (\tau - t)^a e^{b(\tau - t)} \left\{ I \frac{z_2}{L_2} \int (\tau - t)^{-a} e^{-b(\tau - t)} \sin[\psi + \varphi - \omega(\tau - t)] dt + C \right\}. \quad (4)$$

Так как интеграл в (4) не берется, то на участке τ заменим синусоиду хордой, что допустимо ввиду малости τ по сравнению с полупериодом тока:

$$\sin[\psi + \varphi - \omega(\tau - t)] \approx A + B(\tau - t), \quad (5)$$

где

$$A = \sin(\psi + \varphi);$$

$$B = \frac{1}{\tau} [\sin(\psi + \varphi - \omega\tau) - \sin(\psi + \varphi)].$$

После подстановки (5) в (4) и разложения показательной функции в степенной ряд производится интегрирование и определение постоянной C из начального условия $i_1(0) = kI \sin(\psi - \omega\tau)$, где k — коэффициент начального распределения тока между главными и дугогасительными контактами.

Умножив значение тока на сопротивление (1), получим выражение для напряжения на размыкающихся контактах:

$$u = kI r_0 \tau^{1-a} (\tau - t)^{a-1} e^{-bt} \sin(\psi - \omega\tau) +$$

$$+ I \frac{z_2}{L_2} r_0 (\tau - t)^{a-1} e^{b(\tau-t)} \left\{ \tau \sin(\psi + \varphi) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \times \right.$$

$$\times \frac{b^{n-1} [\tau^{n-a} - (\tau - t)^{n-a}]}{(n-a)(n-1)!} + [\sin(\psi + \varphi - \omega\tau) -$$

$$- \sin(\psi + \varphi)] \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^{n-2} \frac{b^{n-2} [\tau^{n-a} - (\tau - t)^{n-a}]}{(n-a)(n-2)!} \left. \right\}, \quad (6)$$

где

$$a = \frac{\tau r_0}{L_2}; \quad (7)$$

$$b = \frac{r_2}{L_2}. \quad (8)$$

Выражение (6) дает зависимость напряжения на контактах от начального переходного сопротивления r_0 , от времени размыкания контактов τ , зависящего от их скорости, от электрических параметров шунтирующей ветви r_2 и L_2 , от тока цепи I и от момента размыкания ψ .

В (6) входит безразмерный параметр a , определяющий характер кривой напряжения.

При $a < 1$ напряжение стремится к бесконечности при $t \rightarrow \tau$, т. е. в конце процесса размыкания. Поэтому при $a < 1$ контакты должны искрить, если только напряжение не будет ограничено ниже уровня зажигания емкостью контактов и прочих деталей аппарата, которая не учитывалась при выводе уравнения (6).

При $a > 1$ по (6) имеем:

$$\lim_{t \rightarrow \tau} u = \frac{I z_2 r_0 \tau \sin(\psi + \varphi)}{\tau r_0 - L_2}. \quad (9)$$

Если этот предел меньше напряжения зажигания, то искрения не должно быть. Из (7) следует необходимое условие безыскрового размыкания

$$\tau r_0 > L_2. \quad (10)$$

В [Л. 1] дано аналогичное соотношение для незашунтированных контактов в цепи постоянного тока. Приведенный вывод показывает, что при переменном токе существует такого же рода критерий оценки характера размыкания.

Из неравенства (10) и выражения (9) следуют возможные меры уменьшения интенсивности искрения:

снижение скорости размыкания контактов (увеличение τ);

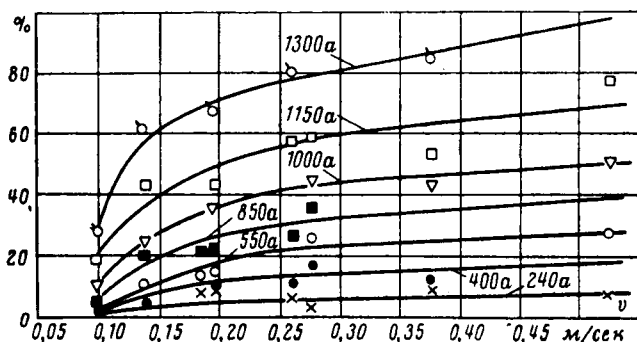
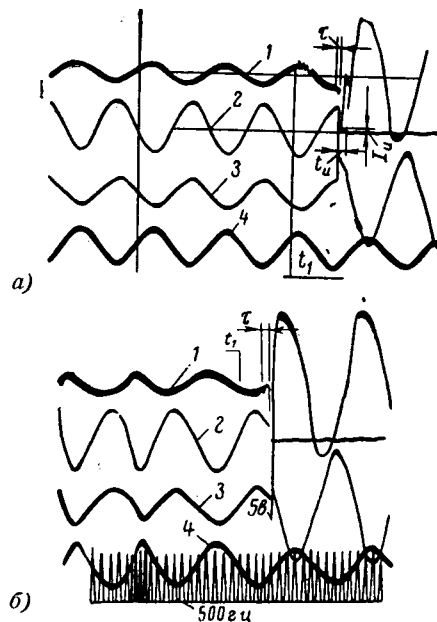


Рис. 2. Процентное отношение отключений с искрой к полному числу отключений в зависимости от скорости размыкания при различных значениях тока.

Рис. 3. Осциллограммы процесса отключения главных контактов.

a — 1000 а; 0,26 м/сек;
 b — 1150 а, 0,2 м/сек.
1 — напряжение на главных контактах;
2 — ток через главные контакты;
3 — ток через дугогасительные контакты;
4 — суммарный ток.
 t_1 — начало движения главных контактов;
 τ — участок быстрого нарастания сопротивления контакта.



увеличение начального сопротивления контактов r_0 ;

уменьшение индуктивности L_2 и сопротивления r_2 шунтирующей ветви.

Снижение скорости размыкания контактов является наиболее эффективным средством ослабления искрения. На рис. 2 представлены экспериментальные кривые¹, полученные на макете главных контактов переключательного устройства типа РНТ-20 (контакты сдвоенные, ножевого типа, изготовлены из меди). Каждая точка кривых рис. 2 получена путем наблюдения 500 отключений в трансформаторном масле. Скорость размыкания изменялась от 0,09 м/сек до 0,52 м/сек. Для всех значений тока до 1300 а при скорости размыкания 0,1 м/сек резко падает интенсивность искрения.

При этих опытах $L_2 = 1,5 \cdot 10^{-6}$ гн, $r_0 \approx 10^{-4}$ ом и согласно (10) для безыскрового размыкания необходимо, чтобы время τ , в течение которого происходит быстрое нарастание контактного сопротивления, превосходило 1,5 мсек. На рис. 3 представлены

¹ В экспериментальной части работы принимали участие Т. П. Сурутина и Т. П. Королева.

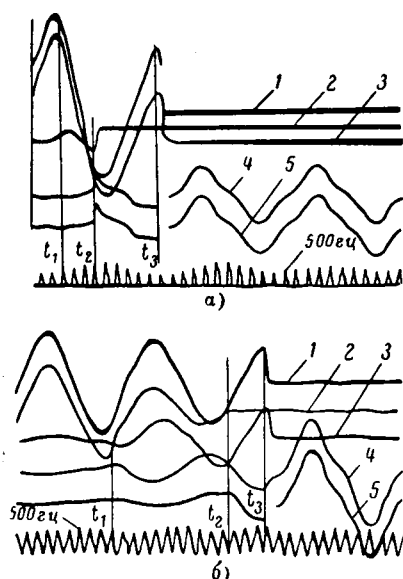


Рис. 4. Осциллограммы процесса отключения главных контактов с увеличенным сопротивлением заходной части.

а — 800 а, 50—700 мком; б — 800 а, 50—2300 мком. 1 — суммарный ток главных и дугогасительных контактов; 2 — ток главного контакта; 3 — ток дугогасительного контакта; 4 — напряжение на главных контактах; 5 — напряжение на дугогасительных контактах. t_1 — начало движения главных контактов; t_2 — момент размыкания главных контактов; t_3 — момент размыкания дугогасительных контактов.

осциллограммы размыкания с искрой и без искры, полученные во время опытов. В случае размыкания с искрой (рис. 3,а) $\tau=0,7$ мсек; перенапряжение на контактах в момент размыкания велико и вышло за пределы осциллограммы. Там же обозначены амплитуда тока искры $I_{и}$ и ее длительность $t_{и}$. При безыскровом размыкании (рис. 3,б) $\tau=2$ мсек; перенапряжение в момент размыкания составляет 5 в, что меньше порогового напряжения зажигания.

Сопротивление контакта и характер его изменения могут оказывать существенное влияние на интенсивность искрения. Чем раньше начинает увеличиваться сопротивление при движении главного контакта, тем более плавно ток переходит в параллельную ветвь. В случае контактов ножевого типа от начала движения до отрыва подвижного контакта от неподвижного проходит несколько миллисекунд. Если материал контактов однороден, контактное сопротивление быстро нарастает лишь перед самым моментом отрыва и скорость изменения тока велика, что вызывает увеличение напряжения на контактах (рис. 3). Если же заходная часть ножевых контактов имеет более высокое сопротивление (например, имеется металлокерамическая напайка), то рост сопротивления начинается раньше, большая часть тока успевает перейти и напряжение в момент отрыва контактов ниже. При опытах путем искусственного увеличения сопротивления заходной части контактов приблизительно до 1500 мком при начальном сопротивлении около 50 мком удалось устранить искрение при токах 800—900 а.

В замкнутом состоянии контакт осуществлялся по меди с низким переходным сопротивлением, на сходе же имелись дополнительные губки, сопротив-

ление которых можно было изменять подбором прокладок из молибдена.

На рис. 4 представлены осциллограммы, полученные при опытах с указанной специально изготовленной контактной системой, в которой можно было изменять сопротивление заходной части. Осциллограммы сняты при низком напряжении питания отключаемой цепи и, так как разрывная способность дугогасительных контактов велика, дуга на них гаснет форсированно. Однако нас интересуют не дугогасительные, а главные контакты, искрение которых зависит от тока, а не от напряжения питания. Поэтому осциллографирование при пониженном напряжении в данном случае правомерно. На осциллограммах видно распределение тока между главным и дугогасительным контактами в промежутке времени от начала движения t_1 до момента размыкания главных контактов t_2 . Осциллограмма рис. 4,а снята при сопротивлении заходной части 700 мком, а осциллограмма рис. 4,б — при изменении сопротивления контакта ступенями 50, 640, 1000, 1200, 1600 и 2300 мком на протяжении 20 мсек. При $L_2=1,5$ мкГн условие (10) в обоих случаях выполнялось и искры не было.

Следует отметить, что уменьшением индуктивности контура можно устранить искрение, если соблюдается неравенство (10). Если же оно не удовлетворяется, то лишь снижается длительность существования искры по соображениям, указанным в [Л. 6], но искрение сохраняется при больших токах вплоть до ничтожных значений индуктивности.

Выводы. 1. Интенсивность искрения главных контактов электрических аппаратов зависит от скорости размыкания, начального сопротивления контактов и индуктивности контура.

2. Искрение может быть сведено к минимуму или при умеренных токах устранено при необходимом условии, что произведение сопротивления контакта на время размыкания больше индуктивности контура, образованного контактом и шунтирующей его цепью.

Литература

1. Рюденберг Р., Переходные процессы в электрических системах, Изд-во иностр. лит., 1955.
2. Хольм Р., Электрические контакты, Изд-во иностр. лит., 1961.
3. Kisliuk P., Arcing at Electrical Contacts on closure, Journal of applied Physics, v. 25, № 7, 1954.
4. Финкельбург В. Ф. и Меккер Г., Электрические дуги и термическая плазма, Изд-во иностр. лит., 1961.
5. Рывкин А. М., Параллельная работа контактов в контакторах устройств РПН трансформаторов, «Электротехника», 1965, № 7.
6. Никифоровский Н. Н., О коммутации тока при размыкании одной из двух параллельных цепей электрических аппаратов, «Электричество», 1959, № 12.

[7.8.1969]



Сравнительная оценка статических преобразователей постоянного тока в трехфазный переменный на транзисторах, работающих в ключевом режиме

Канд. техн. наук Д. А. ПОПОВ

Москва

Критерии оценки выходных каскадов преобразователей. Для преобразования постоянного тока в синусоидальный переменный широкое применение получили преобразователи, основными преобразовательными элементами которых являются двухтактные автогенераторы Роера или двухтактные усилители [Л. 1 и 2].

Синусоидальная форма выходного напряжения получается благодаря применению фильтра на выходе преобразователя, а также широтно-импульсной модуляции транзисторов или фазокомпенсационного способа, основанного на суммировании нескольких прямоугольных напряжений, сдвинутых во времени (по фазе) и отличающихся по амплитуде.

Рассматриваемые преобразователи состоят из определенного числа синхронизированных двухтактных автогенераторов Роера или двухтактных усилителей, кратного числу фаз ($n = km$), причем процессы в этих n элементах сдвинуты относительно друг друга на $\frac{1}{2n}$ часть периода, что соответствует сдвигу первых гармоник выходных напряжений автогенераторов на угол π/n [Л. 2 и 4]. Общее число лучей звезды располагаемых э. д. с. N_π (по 1-й гармонике) с учетом встречной намотки выходных обмоток трансформаторов получается равным $2n$. Из этих напряжений и формируется трехфазное выходное напряжение преобразователя.

Суммирование прямоугольных (или в общем случае трапецидальных) напряжений с целью получения напряжения синусоидальной формы лежит в основе принципа построения распределенных якорных обмоток машин переменного тока [Л. 6]. В транзисторных преобразователях постоянного тока в переменный синусоидальной формы этот принцип впервые применен В. Г. Константиновым

и О. И. Шустером [Л. 3]. Преобразователи, в которых используется принцип суммирования сдвинутых прямоугольных напряжений, будем называть кратко бесфильтровыми. Роль фильтра в них выполняет схема суммирования напряжений т. е. выходной каскад.

В настоящее время известно большое число преобразователей, выполненных по этому принципу с числом двухтактных автогенераторов от 3 до 12 и более.

Выходные каскады трехфазных бесфильтровых преобразователей целесообразно сравнивать по форме кривой выходного напряжения, надежности и коэффициентам использования транзисторов и трансформаторов.

Форма кривой выходного напряжения может быть оценена с помощью коэффициента несинусоидальных искажений (клирфактора). Однако такая оценка является неполной, так как не учитывает содержания гармоник в выходном напряжении и не позволяет оценить сложность создания фильтра, требуемого для дальнейшего улучшения формы кривой напряжения. Более полноценной является оценка с помощью относительных значений на-

пряжений высших гармоник $E^*_{\nu} = \frac{E_{\nu}}{E_1}$.

Для определения E^*_{ν} по аналогии с теорией якорных обмоток машин переменного тока [Л. 6] введем понятие обмоточного коэффициента схемы выходного каскада преобразователя $K_{об\ \nu}$, как отношения геометрической суммы напряжений к их алгебраической сумме:

$$K_{об\ \nu} = \frac{\left| \sum_{i=1}^q \dot{E}_{\nu i} \right|}{\sum_{i=1}^q E_{\nu i}} = \frac{E_{\nu\phi}}{\sum_{i=1}^q E_{\nu i}}, \quad (1)$$

где $E_{\nu\phi}$ — действующее фазное значение ν -й гармоники э. д. с.; q — общее число обмоток, образующих цепь одной фазы преобразователя (при n нечетном $q = n$, а при n четном $q = n - 1$).

Согласно (1) находим:

$$E_{\nu\phi} = K_{об\ \nu} \sum_{i=1}^q E_{\nu i}. \quad (2)$$

На выходе простейшего преобразовательного звена э. д. с. имеет в общем случае неполную прямоугольную форму (рис. 1, б) и может быть представлена в виде:

$$e(t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} E_{\nu\nu} \cos \nu \omega t, \quad \nu = 1, 3, 5, 7, \dots, \quad (3)$$

где

$$E_{\nu\nu} = \frac{1}{\nu} E_0 K_{\nu\nu}; \quad K_{\nu\nu} = \sin \left(\nu \frac{\pi}{2} \frac{2t_n}{T} \right).$$

Для прямоугольных импульсов $K_{\nu\nu} = (-1)^{\frac{\nu-1}{2}}$, $|K_{\nu\nu}| = 1$. Величину E_0 можно выразить через напряжение питания автогенератора [Л. 5]:

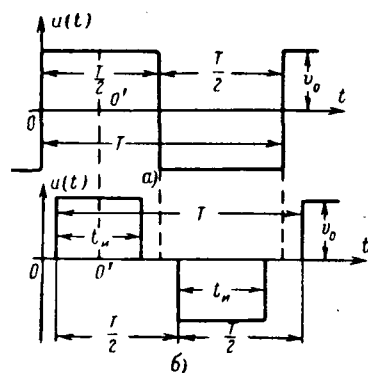


Рис. 1. Форма э. д. с. на выходе простейших преобразователей:

а — прямоугольная; б — неполная прямоугольная.

$$E_0 = E_k \frac{\omega_2}{\omega_1}; E_k = U_n \eta_1, \quad (4)$$

где η_1 — к. п. д. первичной цепи автогенератора.

Из (2) и (3) имеем:

$$E_{\text{вф}} = \frac{4\eta_1}{\pi \sqrt{2}} \left(\frac{1}{\nu} K_{\text{ув}} K_{\text{об в}} \right) U_n \frac{\omega_{2\Phi}}{\omega_1}, \quad (5)$$

где $\omega_{2\Phi} = \sum_{i=1}^q \omega_{2i}$ — общее число витков вторичных обмоток, входящих в фазу преобразователя.

Из (5) получаем:

$$\frac{E_{\text{вф}}}{E_{1\Phi}} = \frac{1}{\nu} \frac{K_{\text{ув}}}{K_{\text{у1}}} K_{\text{об в}}^*; K_{\text{об в}}^* = \frac{K_{\text{об в}}}{K_{\text{об1}}}. \quad (6)$$

Фильтрующие свойства выходного каскада преобразователя как раз и характеризуются относительными значениями обмоточных коэффициентов $K_{\text{об в}}^*$.

Для определения коэффициента использования транзисторов выразим полную выходную мощность преобразователя через напряжение питания U_n и ток $I_{\text{к.доп}}$, максимально допустимый для одного плеча простейшего преобразователя.

Кажущаяся мощность преобразователя может быть представлена в виде

$$S_{\text{вых}} = m U_{\Phi} I_{\Phi} = m \left(\frac{U_{\Phi}}{E_{\Phi}} \right) E_{\Phi} I_{\Phi} = K_n m E_{\Phi} I_{\Phi}, \quad (7)$$

где $K_n = U_{\Phi}/E_{\Phi}$ — коэффициент, учитывающий потерю напряжения во вторичных цепях трансформаторов.

Выразив действующее значение 1-й гармоники фазной э. д. с. согласно (5), найдем:

$$S_{\text{вых}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \eta_1 K_n K_{\text{у1}} \frac{U_n}{\omega_1} (m K_{\text{об1}} \omega_{2\Phi} I_{\Phi}). \quad (8)$$

Выражение, стоящее в скобках, представляет собой суммарную н. с. вторичных обмоток всех n трансформаторов, входящих в преобразователь:

$$F_{2\Sigma} = m K_{\text{об1}} \omega_{2\Phi} I_{\Phi}. \quad (9)$$

В общем случае н. с. вторичных обмоток различны у разных трансформаторов, причем один из трансформаторов имеет максимальную вторичную н. с., равную $F_{2\text{max}}$.

Назовем коэффициентом равномерности электромагнитной нагрузки трансформаторов отношение

$$K_F = \frac{F_{2\Sigma}}{n F_{2\text{max}}}. \quad (10)$$

Коэффициент K_F определяется с помощью векторных диаграмм вторичных н. с. всех трансформаторов.

Токи в первичной и вторичной цепях трансформаторов у преобразователей с улучшенной формой кривой выходного напряжения имеют практически синусоидальную форму. Поэтому, пренебрегая намагничивающими токами трансформаторов, можно написать:

$$F_{2\text{max}} = F_{1\text{max}} = \frac{I_{\text{к.доп}}}{\sqrt{2}} \omega_1. \quad (11)$$

Выражение (8) с учетом (9) — (11) принимает вид:

$$S_{\text{вых}} = \frac{1}{\pi} \eta_1 K_n K_{\text{у1}} K_F (2n U_n I_{\text{к.доп}}). \quad (12)$$

Коэффициент использования транзисторов определяется по уравнению:

$$K_{\text{нт}} = \frac{S_{\text{вых}}}{2n U_n I_{\text{к.доп}}}. \quad (13)$$

Подставив (11) в (13), получим:

$$K_{\text{нт}}^* = \frac{1}{\pi} \eta_1 K_n K_{\text{у1}} K_F. \quad (14)$$

Из (14) видно, что коэффициент использования транзисторов определяется величиной коэффициента равномерности нагрузки трансформаторов K_F , т. е. в конечном счете зависит от схемы выходного каскада преобразователя.

Если все трансформаторы загружены одинаково, то

$$F_{2\Sigma} = n F_{2i}; K_F = \frac{F_{2\Sigma}}{n F_{2\text{max}}} = 1.$$

Если же значения F_{2i} неодинаковы, то $K_F < 1$. Отсюда видно, что условием высокого использования транзисторов является равенство вторичных н. с. у всех автогенераторов при симметричной нагрузке преобразователя.

Чтобы определить коэффициент использования трансформаторов $K_{\text{н.тр}}$, выразим суммарную габаритную мощность всех трансформаторов через выходную мощность преобразователя:

$$S_{\text{тр2}} = \sum_{i=1}^n S_{\text{тр2i}} = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n E_{1i} I_{1i} + \sum_{i=1}^n E_{2i} I_{2i} \right] = S_{\text{тр1\Sigma}} + S_{\text{тр2\Sigma}}.$$

Так как $I_{2i} = I_2 = I_{\Phi}$, то

$$S_{\text{тр2\Sigma}} = \frac{1}{2} I_{\Phi} \sum_{i=1}^n E_{2i} = \frac{1}{2} I_{\Phi} \frac{m E_{\Phi}}{K_{\text{об1}}} = \frac{1}{2 K_n} \frac{S_{\text{вых}}}{K_{\text{об1}}}. \quad (15)$$

В трансформаторе со средней точкой первичная цепь состоит из двух полуобмоток, ток в которых протекает в течение одного полупериода. Действующее значение тока в одной половине первичной обмотки равно $I_{1i\text{max}}/2$, а расчетная мощность всей первичной цепи одного трансформатора определяется соотношением:

$$2 E_{1i} \frac{I_{1i\text{max}}}{2} = E_{1i} I_{1i\text{max}}. \quad (16)$$

Расчетная мощность первичных обмоток n трансформаторов, суммарная габаритная мощность и коэффициент использования мощности трансформаторов могут быть представлены в виде соответствующих выражений:

$$S_{\text{тр1\Sigma}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n E_{1i} I_{1i\text{max}} = \sqrt{2} \frac{1}{2 K_n} S_{\text{вых}}; \quad (17)$$

$$S_{\text{тр\Sigma}} = \frac{1}{2 K_n} \left(\sqrt{2} + \frac{1}{K_{\text{об1}}} \right) S_{\text{вых}}; \quad (18)$$

$$K_{\text{н.тр}} = \frac{S_{\text{вых}}}{S_{\text{тр\Sigma}}}. \quad (19)$$

Из (18) и (19) находим:

$$\frac{1}{K_{\text{н.тр}}} = \frac{1}{K_n \sqrt{2}} \left(1 + \frac{1}{K_{\text{об1}} \sqrt{2}} \right). \quad (20)$$

Отсюда видно, что коэффициент использования мощности трансформаторов определяется обмоточным коэффициентом $K_{\text{об1}}$.

Из изложенного следует, что для оценки схем бесфильтровых преобразователей можно использовать следующие параметры:

число простейших преобразовательных элементов n и число вторичных обмоток в фазе q , которые характеризуют надежность преобразователя;

обмоточный коэффициент для основной гармоники выходного напряжения $K_{об1}$, который характеризует использование габаритной мощности трансформаторов;

относительные значения обмоточных коэффициентов для высших гармоник выходного напряжения $K_{обv}^*$, а также коэффициент несинусоидальных искажений K_f , которые характеризуют степень несинусоидальных искажений выходного напряжения и его спектральный состав;

коэффициент равномерности нагрузки трансформаторов K_F , который характеризует степень использования транзисторов.

Оценивая весовые показатели преобразователей с различным числом автогенераторов n , необходимо учитывать, что с ростом n уменьшается мощность трансформатора в единице и его удельная мощность и, следовательно, увеличивается суммарный вес трансформаторов.

Сравнение и выбор схем выходных каскадов транзисторных преобразователей. В зависимости от соотношения чисел витков вторичных обмоток трансформаторов возможны три основных варианта схем, построенных на звеньях со средней точкой.

1. Схемы с равным числом витков вторичных обмоток («равномерные» схемы).

2. Схемы с неравным числом витков вторичных обмоток, обеспечивающие исключение из кривой фазного напряжения всех высших гармоник, кроме гармоник порядка $v = kN_{\pi} \pm 1$ («косинусные» схемы). При этом $q = n - 1$.

Соотношение чисел витков вторичных обмоток для таких схем подчиняется косинусоидальному закону (при q нечетном):

$$\omega_2^{(i)} = \omega_2^{(1)} \cos(i-1)\alpha; \alpha = \frac{\pi}{n}, \quad (21)$$

где $\omega_2^{(1)}$ — число витков вторичной обмотки, э. д. с. которой совпадает по фазе с результирующей э. д. с. фазы преобразователя (имеется в виду 1-я гармоника э. д. с.).

Рис. 2. Векторные диаграммы располагаемых э. д. с. и группировка лучей по фазам для преобразователя, имеющего $n=12$ и выполненного по различным схемам.

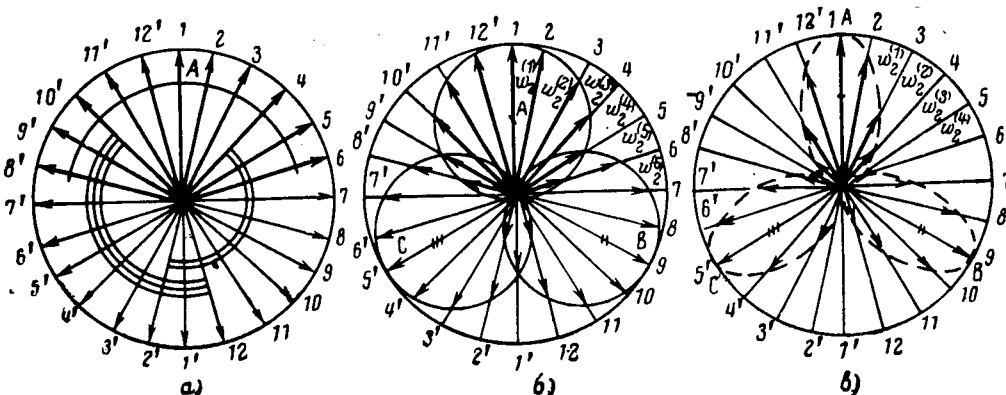
α — «равномерная» схема ($\omega_2 = \text{const}$, $q=11$); β — «косинусная» схема

$$\left(\omega_2^{(i)} = \omega_2^{(1)} \cos(i-1) \frac{\pi}{12} \right)$$

$q=11$); γ — «веерная» схема

$$(\omega_2^{(1)}; \omega_2^{(2)}; \omega_2^{(3)}; \omega_2^{(4)} =$$

$$= 1; 0,816; \frac{1}{\sqrt{3}}; 0,299 \text{ } q=7),$$



3. Схемы с неравным числом витков вторичных обмоток, обеспечивающие исключение всех гармоник, кроме гармоник порядка $v = kN_{\pi} \pm 1$ из кривой линейного напряжения («веерные» схемы).

В отличие от предыдущего случая, здесь в кривой фазного напряжения, кроме гармоник порядка $v = kN_{\pi} \pm 1$ ($k=1, 2, 3, \dots$), будут присутствовать также все нечетные гармоники, кратные трем ($v = 3k$). При этом $q = (2n/3) - 1$.

Для этого типа схем соотношение чисел витков определяется исходя из указанного выше содержания гармоник в кривой фазного напряжения.

Принцип образования любой из указанных выше схем можно пояснить с помощью звезды располагаемых э. д. с.

На рис. 2 изображены векторные диаграммы э. д. с. преобразователя с $n=12$ для всех указанных выше вариантов схем. Звезда располагаемых э. д. с. в данном случае имеет 24 луча, которые пронумерованы от 1 до 12 и от 1' до 12'. При этом цифра в номере луча указывает, какому трансформатору (автогенератору) принадлежит данная обмотка, а штрих означает встречную намотку обмотки. Векторы, образующие э. д. с. фазы А преобразователя, на рис. 2 изображены жирными линиями.

В случае равновитковой (рис. 2,а) и «косинусной» (рис. 2,б) схем в каждую фазу входит 11 вторичных обмоток ($q=11$). В первом случае, все обмотки имеют равное число витков, а векторы э. д. с. имеют равную длину. В фазной э. д. с. этой схемы имеются все нечетные гармоники ($v=1, 3, 5, 7, 9, 11, 13$ и т. д.).

При определении обмоточных коэффициентов удобно гармоники разбить на группы с равными $K_{об}$. Порядковые номера гармоник э. д. с. можно представить в виде:

$$v = kN_{\pi} \pm j; \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots (v > 0); \quad (22) \\ j = 1, 3, 5, 7, \dots$$

Из геометрического смысла $K_{обj}$ следует, что гармоники с одинаковым значением j имеют равные обмоточные коэффициенты, т. е. принадлежат к одной группе.

При $n=12$ и $N_{\pi}=24$ имеем шесть групп гармоник, соответствующих $j=1, 3, 5, 7, 9$ и 11 (рис. 3).

Таким образом, для оценки рассматриваемой схемы достаточно определить шесть обмоточных коэффициентов для $v=1, 3, 5, 7, 9$ и 11. Значения

Рис. 3. Определение обмоточных коэффициентов для «косинусной» схемы при $n=12$.

$a-v=24k \pm 1$ при $k=0,1,2,3,\dots$,
 $K_{обв} = 0,792$; $b-v=24k+3$, $K_{обв} = 0$;
 $c-v=24k \pm 9$, $K_{обв} = 0$; $d-v=$
 $=24k \pm 5$, $K_{обв} = 0$; $e-v=24k \pm 7$,
 $K_{обв} = 0$; $f-v=24k+11$, $K_{обв} = 0$.

обмоточных коэффициентов, определенные по формуле

$$K_{обв} = \frac{\sin v \frac{q\alpha}{2}}{q \sin v \frac{\alpha}{2}},$$

и другие характеристики «равномерной» схемы с $n=12$ приведены в таблице.

Для «косинусной» схемы (рис. 2,б) принято следующее соотношение чисел витков:

$$\begin{aligned} \omega_2^{(1)} : \omega_2^{(2)} : \omega_2^{(3)} : \omega_2^{(4)} : \omega_2^{(5)} : \omega_2^{(6)} = \\ = 1 : \cos 15^\circ : \cos 30^\circ : \cos 45^\circ : \cos 60^\circ : \cos 75^\circ. \end{aligned}$$

Числа витков $\omega_2^{(2)} \div \omega_2^{(6)}$ встречаются попарно.

Для определения длин векторов можно на луче 1, как на диаметре, построить вспомогательную окружность (см. рис. 2,б), на которой и должны лежать концы векторов э. д. с. отдельных обмоток, образующих фазу А.

Обмоточные коэффициенты для «косинусных» схем определяются выражением

$$K_{обв} = \frac{A_v}{B}, \quad (23)$$

Наименование параметра	«Равномерные» схемы			«Косинусные» схемы			«Верные» схемы		
Число двухтактных автогенераторов (или усилителей) n	6	9	12	6	9	12	6	9	12
Число лучей звезды э. д. с. N_λ	12	18	24	12	18	24	12	18	24
Число обмоток:									
в фазе q	5	9	11	5	8	11	3	5	7
всего m_q	15	27	33	15	24	33	9	15	21
Обмоточный коэффициент для основной гармоники $K_{об1}$	0,742	0,64	0,692	0,804	0,793	0,790	0,928	0,932	0,89
Относительное значение коэффициента $K_{об1}$ (при $n=\cos st$) ¹	0,92	0,82	0,89	1,0	1,0	1,0	1,15	1,17	1,13
Фильтрующие свойства схемы $K^*_{обв}$ для значений									
$v = \begin{cases} 3 \\ 5 \\ 7 \\ 9 \\ 11 \\ 13 \\ 15 \\ 17 \\ 19 \\ 21 \\ 23 \\ 25 \end{cases}$	0,27 0,053 0,053 0,27 1,0 1,0 0,27 0,053 0,053 0,21 1,0 1,0	0,343 0,226 0,185 0,171 0,185 0,226 0,343 1,0 1,0 0,343 0,226 0,185	0,318 0,172 0,10 0,06 0,017 0,017 0,06 0,172 0,318 0,09 1,0 1,0	0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1	0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1	0,5 0 0 0,5 1 1 0,5 0 0 0,5 1 1	0,441 0 0 0,1 0 0 0,441 1 1 0,441 0 0	0,436 0 0 0,084 0 0 0,084 0 0 0,436 1 1
Коэффициент несинусоидальных искажений (клирфактор) для фазной э. д. с. ¹	0,175	0,164	0,143	0,153	0,103	0,078	0,235	0,179	0,115
для линейной э. д. с.	0,149	0,113	0,09	0,153	0,103	0,078	0,153	0,103	0,078
Коэффициент равномерности электромагнитной нагрузки трансформаторов K_F	0,933	1	0,94	1	1	1	1	1	1

где

$$A_v = 1 + 2 \cos \alpha \cos v\alpha + 2 \cos 2\alpha \cos v2\alpha + \dots + 2 \cos p\alpha \cos vp\alpha; B = 1 + 2 \cos \alpha + 2 \cos 2\alpha + \dots + 2 \cos p\alpha = \frac{\sin \frac{qa}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}; \quad (24)$$

$p = \frac{q-1}{2}$ — число пар обмоток с попарно одинаковыми числами витков.

Легко показать, что

$$A_v = \begin{cases} \frac{n}{2} & \text{для } v = kN_n \pm 1, k = 1, 2, 3, \dots; \\ 0 & \text{для других значений } v. \end{cases} \quad (25)$$

Таким образом, для косинусных схем имеем:

$$K_{обv} = \begin{cases} K_{об1} = \frac{n}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} & \text{при } v = kN_n \pm 1; \\ 0 & \text{при всех других значениях } v. \end{cases} \quad (26)$$

Отсюда следует, что

$$K_{обv}^* = \begin{cases} 1 & \text{для } v = kN_n \pm 1; \\ 0 & \text{для остальных } v. \end{cases} \quad (27)$$

Обмоточные данные «веерной» схемы (рис. 2, в) могут быть получены исходя из условия получения максимального значения $K_{об1}$ и подавления всех высших гармоник, кроме гармоник, кратных трем, и гармоник порядка $v = kN_n \pm 1$.

В отличие от «косинусной» схемы здесь не требуется подавлять гармоники, кратные трем, что и дает возможность повысить значение $K_{об1}$. Для преобразователя с $n=12$, приняв $K_{об5} = K_{об7} = K_{об11} = 0$, получим три уравнения с пятью неизвестными $w_2^{(i)}/w_2^{(1)}$ ($i=2, 3, 4, 5, 6$).

Исходя из условия максимума $K_{об1}$, полагаем также $w_2^{(5)} = w_2^{(6)} = 0$.

Таким образом, получаем систему уравнений для определения числа витков для трех пар обмоток, из которой находим:

$$\frac{w_2^{(2)}}{w_2^{(1)}} = 0,816; \quad \frac{w_2^{(3)}}{w_2^{(1)}} = 0,578; \quad \frac{w_2^{(4)}}{w_2^{(1)}} = 0,299.$$

В общем случае при любом n имеем:

$$\frac{w_2^{(i)}}{w_2^{(1)}} = \frac{\cos(i-1)\alpha + \cos(i+p')\alpha}{1 + \cos(1+p')\alpha}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, p', \quad (28)$$

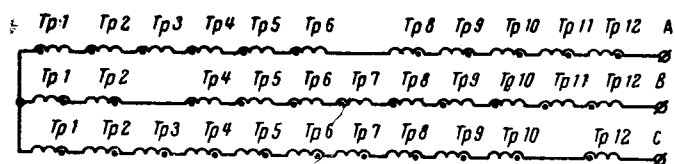
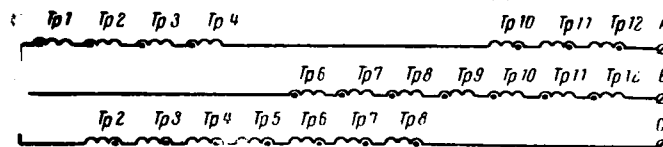
где p' — число групп гармоник, подлежащих подавлению при суммировании напряжений.

При $n=6$ имеем:

$$p' = 1; \quad w_2^{(2)}/w_2^{(1)} = 0,578;$$

при $n=9$ имеем:

$$p' = 2; \quad w_2^{(2)}/w_2^{(1)} = 0,743; \quad \frac{w_2^{(3)}}{w_2^{(1)}} = 0,395.$$

Рис. 4. Схема соединения обмоток преобразователя с $n=12$ и $q=11$.Рис. 5. «Веерная» схема соединения обмоток преобразователя с $n=12$ и $q=7$.

Схемы выходных каскадов преобразователей с $n=12$ при $q=11$ и $q=7$ показаны на рис. 4 и 5 соответственно. «Равномерная» и «косинусная» схемы имеют одинаковый вид и отличаются лишь соотношением чисел витков.

Параметры преобразователей с различным числом автогенераторов, выполненных по различным схемам, приведены в таблице.

Из таблицы видно, что по совокупности параметров наибольший интерес представляют «веерные» схемы выходных каскадов, которые имеют наибольшее значение $K_{об1}$ при одинаковой форме линейных выходных напряжений с «косинусными» схемами. И лишь в случаях, когда предъявляются высокие требования к форме фазного напряжения, должны применяться «косинусные» схемы.

Выбор числа автогенераторов n определяется требованиями к форме выходного напряжения и к надежности преобразователя. Эти требования противоречивы, поэтому при определенных условиях становится целесообразным применение комбинированных преобразователей, у которых низшие гармоники (кроме первой) выходного напряжения подавляются фазокомпенсационным способом, а высшие гармоники — с помощью фильтра.

Литература

1. Хасаев Ю. И., Транзисторные преобразователи напряжения и частоты, изд-во «Наука», 1966.
2. Ловушкин В. Н., Транзисторные преобразователи напряжения, изд-во «Энергия», 1967.
3. Константинов В. Г. и Шустер О. И., Полупроводниковый преобразователь постоянного тока в трехфазный ток. Авторское свидетельство № 133946. Бюллетень изобр., 1961, № 23.
4. Шереметьевский Н. Н. и Шустер О. И., Анализ и синтез транзисторных инверторов, выполненных по схемам кольцевых коммутаторов, «Электричество», 1967, № 11.
5. Журавлев А. А. и Мазель К. Е., Преобразователи постоянного тока на транзисторах, Госэнергоиздат, 1960.
6. Костенко М. П. и Пиотровский Л. М., Электрические машины, ч. II, изд-во «Энергия», 1965.

Расчет напряжения теплового пробоя твердого диэлектрика

Канд. техн. наук М. И. МАНТРОВ
Московский энергетический институт

Точное решение задачи о тепловом пробое диэлектрика связано с большими математическими трудностями [Л. 1], поэтому для практических расчетов необходимо иметь более доступный способ приближенного расчета пробивного напряжения твердого однородного диэлектрика при тепловом пробое.

Аналитическое исследование явления теплового пробоя. Пусть к пластине диэлектрика толщиной $d=2h$ с помощью электродов A и B достаточно больших размеров подведено напряжение $2U$ (рис. 1).

Перепадами температуры в электродах A и B ввиду их большой теплопроводности пренебрегаем.

Уравнение теплопроводности диэлектрика при наличии в нем самостоятельных источников тепла и при стационарном тепловом поле имеет вид:

$$\lambda \frac{d^2 t}{dy^2} + \gamma E^2 = 0, \quad (1)$$

где E — напряженность электрического поля в диэлектрике; γ — активная электропроводность диэлектрика при постоянном или переменном токе; t — температура диэлектрика; λ — теплопроводность диэлектрика.

Интегрирование уравнения (1) при $\gamma E^2 = \text{const}$ дает распределение температуры по толщине диэлектрика:

$$t = t_m - \frac{\gamma E^2}{2\lambda} y^2, \quad (2)$$

откуда при $y = h$ получим:

$$2\lambda \frac{t_m - t_s}{h} = \gamma E^2 h, \quad (3)$$

где t_m — максимальная температура в середине пластины диэлектрика; t_s — температура на его поверхности.

Правая часть (3) представляет собой тепло, возникающее в диэлектрике толщиной h при площади сечения его в один квадратный сантиметр.

Левая часть (3) выражает удвоенное количество тепла, передаваемого через стенку толщиной h . Следовательно, тепловое состояние диэлектрика можно анализировать, приняв, что половина тепла диэлектрических потерь сосредоточена в центре диэлектрика ($y=0$), а распределение температуры по толщине диэлектрика линейно:

$$t = t_m - \frac{t_m - t_s}{h} y. \quad (4)$$

В общем случае согласно (3) имеем:

$$UI_a = \frac{U^2}{Z_a} = 2\lambda \frac{t_m - t_s}{h}, \quad (5)$$

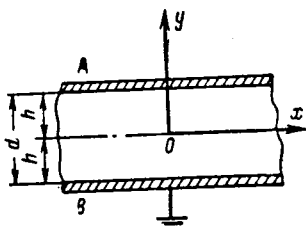


Рис. 1. К расчету напряжения теплового пробоя твердого диэлектрика.

где U — перепад напряжения на половине толщины диэлектрика;

I_a — активная составляющая плотности тока в диэлектрике;

Z_a — его активное сопротивление.

При тепловом равновесии диэлектрика все выделяющееся в нем тепло передается во внешнюю среду; следовательно, должно выполняться соотношение:

$$2\lambda \frac{t_m - t_s}{h} = \sigma (t_s - t_0), \quad (6)$$

где t_0 — температура окружающей среды; σ — коэффициент теплоотвода.

Из (6) выделим две зависимости:

$$t_s - t_0 = \frac{2\lambda (t_m - t_0)}{\sigma h + 2\lambda}; \quad (7)$$

$$t_m - t_s = \frac{\sigma h (t_m - t_0)}{\sigma h + 2\lambda}. \quad (8)$$

Из (5) и (8) получим:

$$t_m - t_0 = \frac{U^2 (\sigma h + 2\lambda)}{2Z_a \lambda \sigma}. \quad (9)$$

При постоянном токе имеем:

$$Z_a = R_o = \int_0^h \rho_o dy = \int_0^h \rho_o e^{-a(t-t_0)} dy.$$

С учетом (4) и (8) последнее выражение можно представить в виде

$$R_o = \rho_o e^{-a(t_m-t_0)} \frac{\sigma h + 2\lambda}{a\sigma (t_m - t_0)} \left[e^{\frac{a\sigma h (t_m - t_0)}{\sigma h + 2\lambda}} - 1 \right]. \quad (10)$$

При переменном токе активное сопротивление диэлектрика определяется выражением:

$$Z_a = \int_0^h \frac{dy}{\omega \epsilon_o \epsilon \operatorname{tg} \delta} = \int_0^h \frac{e^{-b(t-t_0)} dy}{\omega \epsilon_o \epsilon \operatorname{tg} \delta}.$$

С учетом (4) и (8) это уравнение имеет вид:

$$Z_a = \frac{(\sigma h + 2\lambda) e^{-b(t_m-t_0)}}{\omega \epsilon_o \epsilon \operatorname{tg} \delta_o b \sigma (t_m - t_0)} \left[e^{\frac{b\sigma h (t_m - t_0)}{\sigma h + 2\lambda}} - 1 \right]. \quad (11)$$

Подставив (10) или (11) в (9), найдем перепад температур $t_m - t_0$, а затем из (7) и (8) — значения $t_s - t_0$ и $t_m - t_s$. Соотношения (5) и (6) можно использовать для контрольной проверки результатов расчета.

Условие пробоя диэлектрика соответствует равенство:

$$\frac{dU}{dI_a} = 0. \quad (12)$$

Так как нам неизвестна функция $U = \Phi(I_a)$, то образуем новую функцию:

$$F(U, I_a) = \frac{I_a}{U} - \frac{1}{Z_a} = 0, \quad (13)$$

полная производная которой

$$\frac{dU}{dI_a} = - \frac{\frac{\partial F}{\partial I_a}}{\frac{\partial F}{\partial U}}. \quad (14)$$

Следовательно, условие пробоя (12) примет вид:

$$\frac{\partial F}{\partial I_a} = 0. \quad (15)$$

Из (15) с учетом (13) получим величину активной мощности при пробое диэлектрика на постоянном токе:

$$\left(\frac{U^2}{Z_a}\right)_{\text{пр}} = (UI_a)_{\text{пр}} = \frac{2\lambda}{ah} \ln \frac{\sigma h + 2\lambda}{2\lambda}. \quad (16)$$

При пробое на переменном токе коэффициент a в (16) надо заменить коэффициентом b , учитывающим зависимость $\text{tg } \delta$ от температуры.

Подставив (16) в (9), получим величину превышения максимальной температуры диэлектрика при пробое на постоянном токе:

$$(t_m - t_0)_{\text{пр}} = \frac{\sigma h + 2\lambda}{a\sigma h} \ln \frac{\sigma h + 2\lambda}{2\lambda}. \quad (17)$$

В случае пробоя диэлектрика при переменном токе вместо коэффициента a в (17) надо подставить коэффициент b .

Из (15) и (16), выражая λ и σ в тепловых единицах, получим формулы для пробивного напряжения диэлектрика толщиной $d=2h$ соответственно при постоянном и переменном токе:

$$U_{\text{пр}} = 5,78 \sqrt{\frac{\lambda \sigma h}{a\gamma_{\text{во}} (\sigma h + 2\lambda) \left(1 + \frac{\sigma h}{2\lambda}\right)^{\frac{2\lambda}{\sigma h}}}}, \text{ в}; \quad (18)$$

$$U_{\text{пр}} = 7,78 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{\lambda \sigma h}{b\epsilon f \text{tg } \delta_0 (\sigma h + 2\lambda) \left(1 + \frac{\sigma h}{2\lambda}\right)^{\frac{2\lambda}{\sigma h}}}}, \text{ в}. \quad (19)$$

При малых значениях h , когда $\sigma h \ll 2\lambda$, выражения (18) и (19) примут вид:

$$U_{\text{пр}} = 4,08 \sqrt{\frac{\sigma h}{a\gamma_{\text{во}}}}, \text{ в}; \quad (20)$$

$$U_{\text{пр}} = 5,5 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{\sigma h}{b\epsilon f \text{tg } \delta_0}}, \text{ в}. \quad (21)$$

При большой толщине диэлектрика ($\sigma h \gg 2\lambda$) имеем:

$$U_{\text{пр}} = 5,78 \sqrt{\frac{\lambda}{a\gamma_{\text{во}}}}, \text{ в}; \quad (22)$$

$$U_{\text{пр}} = 7,78 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{\lambda}{b\epsilon f \text{tg } \delta_0}}, \text{ в}. \quad (23)$$

то есть с увеличением толщины диэлектрика пробивное напряжение стремится к некоторому постоянному значению, что объясняется ухудшением условий охлаждения диэлектрика с увеличением его толщины.

Из (18) и (22), а также из (19) и (23) получим величину отношения пробивного напряжения для данной толщины диэлектрика к предельному значению пробивного напряжения при бесконечно большой его толщине:

$$\frac{U_{\text{пр}h}}{U_{\text{пр}h=\infty}} = \psi(h) = \sqrt{\frac{\sigma h}{(\sigma h + 2\lambda) \left(1 + \frac{\sigma h}{2\lambda}\right)^{\frac{2\lambda}{\sigma h}}}}. \quad (24)$$

В теории теплового пробоя [Л. 1—2] имеются аналогичные функции $\Phi(c)$ и $\varphi(c)$, относящиеся соответственно к пробую при постоянном и переменном токе, где

$$c = \frac{\sigma K_1 h}{(K_1 + \sigma \delta) \lambda}. \quad (25)$$

Здесь K_1 — коэффициент теплопроводности электродов; δ — их толщина.

При $\delta \leq 5 \text{ см}$ можно положить $K_1 \gg \sigma \delta$, тогда

$$c = \frac{\sigma h}{\lambda}. \quad (26)$$

Вычисленные значения функций $\psi(h)$, $\Phi(c)$ и $\varphi(c)$ для различных h при $\sigma = \lambda$ приведены в табл. 1.

Данные табл. 1 показывают практически полное совпадение функций $\psi(h)$ и $\Phi(c)$ при малых значениях h и расхождение их не более чем на 6% при $h=10 \text{ см}$. При пере-

менном токе наблюдается более значительное расхождение функций $\psi(h)$ и $\varphi(c)$, которое объясняется допущением при выводе функции $\varphi(c)$, что в диэлектрике $E = \text{const}$ [Л. 2 и 3]. Функция $\varphi(c)$ получена без учета перераспределения поля в диэлектрике за счет градиента температуры, возникающего в процессе формирования теплового пробоя.

Пример расчета. Пусть $E = \text{const}$, тогда при тепловом равновесии диэлектрика (рис. 1) имеем:

$$\omega \epsilon_0 \epsilon h E^2 \text{tg } \delta = \sigma (t_s - t_0). \quad (27)$$

Выражение (27) с учетом (7) примет вид:

$$\omega \epsilon_0 \epsilon h E^2 \text{tg } \delta = \frac{2\lambda \sigma (t_m - t_0)}{\sigma h + 2\lambda}. \quad (28)$$

Пробой диэлектрика наступит при выполнении условий (рис. 2):

$$Q_{\text{д}} = Q_{\text{с}}; \quad (29)$$

$$\frac{dQ_{\text{д}}}{dt_m} = \frac{dQ_{\text{с}}}{dt_m}, \quad (30)$$

где $Q_{\text{д}}$ — тепло диэлектрических потерь; $Q_{\text{с}}$ — тепло, отводимое от диэлектрика в окружающую среду.

Из (29) и (30) с учетом (28) получим превышение температуры при пробое:

$$(t_m - t_0)_{\text{пр}} = \frac{1}{b}. \quad (31)$$

Подставив (31) в (28), получим величину пробивного напряжения диэлектрика толщиной $d=2h$:

$$U_{\text{пр}} = 4,67 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{\lambda \sigma h}{b\epsilon f \text{tg } \delta_0 (\sigma h + 2\lambda)}}, \text{ в}. \quad (32)$$

Формула для пробивного напряжения при переменном токе, предложенная в [Л. 2 и 3], имеет вид:

$$U_{\text{пр}} = 7,78 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{\lambda}{b\epsilon f \text{tg } \delta_0}} \varphi(c), \text{ в}. \quad (33)$$

Вычисленные значения пробивных напряженностей по формулам (32) и (33) приведены в табл. 2 при значениях: $\epsilon = 6$; $f = 50 \text{ гц}$; $\text{tg } \delta_0 = 2 \cdot 10^{-2}$; $b = 2 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$;

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C}}; \quad \sigma = 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Из данных табл. 2 следует, что расчетные формулы (32) и (33), полученные в предположении $E = \text{const}$, дают значения пробивных напряжений, мало различающиеся между собой в широком интервале практически встречающихся толщин изоляции.

Графический анализ явления теплового пробоя. Количество тепла $Q_{\text{д}}$, выделяющегося в диэлектрике под действием приложенного постоянного или переменного напряжения, изменяется с температурой по экспоненциальному закону в соответствии с характером изменения γ_0 или $\text{tg } \delta$ с температурой. Поэтому при напряжениях $U_1 < U_2 < U_3$ количество выделяющегося тепла соответственно будет представлено экспонентами $Q_1 < Q_2 < Q_3$ (рис. 2).

Количество тепла $Q_{\text{с}}$, отводимого от диэлектрика во внешнюю среду, согласно (27) линейно зависит от температуры. Графически $Q_{\text{с}}$ может быть представлено на рис. 2 некоторой прямой CD , наклон которой к оси абсцисс прямо пропорционален коэффициенту теплоотвода σ .

Таблица 1

$h, \text{ см}$	$\psi(h)$	$\Phi(c)$	$\varphi(c)$
0,1	0,122	0,122	0,12
0,5	0,286	0,275	0,27
1,0	0,382	0,375	0,365
4,0	0,62	0,59	0,53
10,0	0,762	0,72	0,61

Таблица 2

$2h, \text{ мм}$	$E_{\text{пр}}, \text{ кв/мм}$	
	по формуле (32)	по формуле (33)
1	47,6	47,5
2	32,8	32,5
4	22,1	21,9
6	18,1	18,0
8	15,0	15,0
10	13,4	13,5
20	8,8	9,1
40	5,3	5,63
60	3,9	4,16

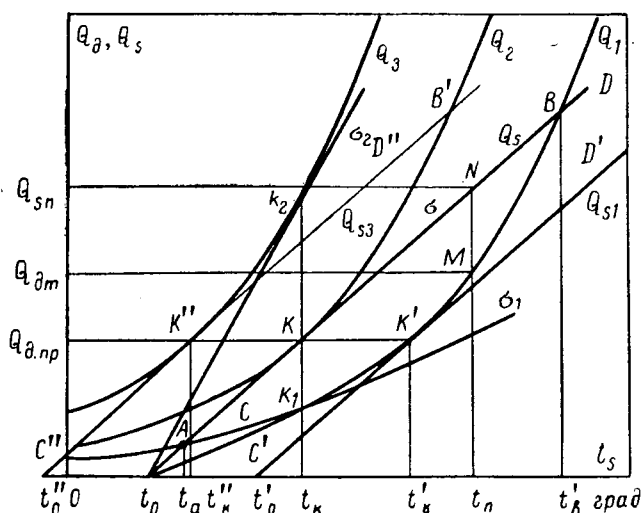


Рис. 2. Диаграмма для графического анализа явления теплового пробоя диэлектрика.

Когда $t_s = t_o$, то $Q_s = 0$, и, следовательно, прямая CD должна пересекать ось абсцисс в точке, соответствующей этой температуре. Если t_o и σ известны, то прямая CD вполне определена. Значения температуры t_s и t_m определяются из соотношений (7) и (8).

Пусть прямая CD пересекает кривую Q_1 в двух точках A и B . Докажем, что точка A соответствует устойчивому тепловому состоянию диэлектрика. В самом деле, если диэлектрик случайно нагреется до некоторой более высокой температуры на его поверхности t_n , при которой от него отводится количество тепла $Q_{sn} > Q_{dm}$, то диэлектрик будет охлаждаться до температуры t_a , при которой кривая Q_1 и прямая CD пересекаются в точке A , где $Q_d = Q_s$. Если же температура диэлектрика по какой-либо причине окажется ниже t_a , то Q_d будет превышать Q_s , вследствие чего температура диэлектрика снова повысится до t_a . Отсюда видно, что точка A соответствует устойчивому тепловому равновесию диэлектрика и является его рабочей точкой при напряжении U_1 . Точка B пересечения прямой CD с кривой Q_1 , соответствующая температуре поверхности диэлектрика t_b , является устойчивой слева, где $Q_d < Q_s$, и неустойчивой справа, где $Q_d > Q_s$.

С повышением приложенного напряжения U кривая тепловыделения в диэлектрике Q_d перемещается на диаграмме

вверх и влево, а разность температур $t_b - t_a$ уменьшается при соответствующем сближении точек A и B . При напряжении $U_2 > U_1$ может оказаться, что прямая CD будет касаться кривой тепловыделения Q_2 в точке K . В этом случае диэлектрик не имеет точки теплового равновесия, аналогичной точке A на кривой Q_1 , так как влево и вправо от точки K всегда $Q_d > Q_s$, поэтому даже весьма небольшое превышение напряжения U_2 неизбежно вызовет тепловую неустойчивость и пробой диэлектрика. При напряжении U_3 тепловое равновесие диэлектрика тем более невозможно, так как при любой температуре $Q_d \gg Q_s$.

Итак, графический анализ показывает, что тепловой пробой твердого диэлектрика (точки K, K_1, K_2, K', K'' на рис. 2) возникает при совместном выполнении условий (29) и (30).

С изменением температуры окружающей среды t_o при неизменной величине коэффициента теплоотвода σ прямая CD перемещается на рис. 2 параллельно самой себе, соответственно изменяя ширину рабочего интервала температур $t_b - t_a$.

При напряжениях U_1, U_2 и U_3 для одного и того же значения σ при $t'_k - t'_o = t_k - t_o = t''_k - t''_o$ и $(t_m - t_o)_{пр} = \text{const}$ соответственно имеем соотношения: температуры t_a неустойчивого теплового состояния диэлектрика — $t'_k > t_k > t''_k$; температуры окружающей среды — $t'_o > t_o > t''_o$, тепловыделения в начальной стадии развития пробоя — $Q'_d = Q_d = Q''_d = Q_{д.пр}$.

При различных значениях коэффициента теплоотвода $\sigma_1 < \sigma < \sigma_2$ в точках K_1, K и K_2 на рис. 2, соответствующих пробую диэлектрика, будем иметь $Q_{д.пр} < Q_{пр} < Q_{2д.пр}$, т. е. $U_{1пр} < U_{пр} < U_{2пр}$. Температура поверхности диэлектрика при возникновении теплового пробоя теперь будет одинакова и равна t_k , однако максимальное превышение температуры возрастает с уменьшением σ согласно (17).

Под напряжением U_1 и при теплоотводе, определяемом прямой CD , диэлектрик будет работать длительно и устойчиво в точке A , если при этом нагрев диэлектрика вследствие повышения температуры окружающей среды, а также за счет нагрузки токоведущих частей, действия посторонних источников излучения и возможных перенапряжений в сети не вызовет сужения рабочего интервала температур $t_b - t_a$ до опасных значений, при которых может возникнуть тепловая неустойчивость диэлектрика.

Литература

1. Фок В. А., К тепловой теории электрического пробоя, Труды Ленинградской физико-технической лаборатории, вып. 5, 1928.
2. Брагин С. М. и др., Теория и практика пробоя диэлектриков, Госиздат, 1929.
3. Сканава Г. И., Физика диэлектриков (область сильных полей), ГИФМЛ, 1958.

[17.10.1969]



Объявление

Научно-исследовательский институт постоянного тока принимает заказы от организаций, библиотек и отдельных лиц на высылку «Известий НИИ постоянного тока (передача энергии постоянным и переменным током)» № 15 и последующих номеров «Известий», распространяющихся только через НИИПТ.

Сборник высылается наложенным платежом.

Заказы направлять по адресу:

Ленинград К-21, ул. Курчатова, д. 1/39, НИИПТ,

Отдел научно-технической информации.

Анализ устройств кольцевыми фазочувствительными схемами

Канд. техн. наук Э. М. ШНЕЕРСОН

Чувашский электротехнический научно-исследовательский институт

Важным для анализа устройств на основе кольцевых фазочувствительных схем (КФС) является нахождение зависимости между действующими значениями входных величин и средним значением тока в нагрузке. Некоторые варианты симметричных КФС приведены на рис. 1, а и б.

Как схемы с явно выраженными нелинейностями, КФС в различные моменты времени могут находиться в различных режимах в зависимости от соотношения мгновенных значений и знаков сравниваемых величин, что необходимо учитывать при определении выходного сигнала.

Рассмотрение режимов КФС при различных соотношениях знаков мгновенных значений входных величин показывает, что при каждой из четырех возможных комбинаций знаков по крайней мере один из диодов открыт независимо от соотношений значений входных сигналов и один постоянно закрыт.

На рис. 1, в приведена эквивалентная схема замещения, к которой можно привести каждую из рассматриваемых схем. При этом сопротивления R_1 и R_2 включают в себя как балластные сопротивления, так и внутренние сопротивления устройств, формирующих величины E'_1 и E'_2 , сопротивления R включают в себя сопротивление диодов, а величины e_1 и e_2 представляют собой мгновенные значения эквивалентно преобразованных величин E_1 и E_2 .

В эквивалентной схеме замещения при принятых направлениях мгновенных значений величин всегда открыт вентиль D_3 независимо от величин e_1 и e_2 , а вентиль D_1 закрыт. Для определения состояний двух других вентилях необходимо составить возможные схемы замещения, приняв сопротивление открытых вентилях равным нулю, а закрытых — бесконечностью.

Возможные схемы замещения при принятых направлениях мгновенных значений э. д. с. изображены на рис. 2. В дальнейшем обозначения режимов КФС будем вести по номерам открытых вентилях, причем номер «особого» всегда открытого при данных направлениях мгновенных значений э. д. с. вентиля будем ставить первым.

Каждой из четырех возможных комбинаций знаков входных величин будет соответствовать свой особый вентиль. Для схемы замещения в режиме 324 имеет следующие значения токов в вентилях:

$$i_2 = \frac{e_1 R (R_1 + 2R_2 + R + 2R_H) - e_2 (R + \dots + R_1) (2R_1 + 2R_2 + R + 4R_H)}{\Delta} \dots \rightarrow \leftarrow \dots \quad (1)$$

$$i_4 = \frac{-e_1 (2R_1 + 2R_2 + R + 4R_H) (R + R_2) + \dots \leftarrow \dots + e_2 R (2R_1 + R_2 + R + 2R_H)}{\Delta} \dots \rightarrow \quad (2)$$

При этом

$$\Delta = -2a^2b + 2bcd + 2bc^2 + ad^2 + ab^2, \quad (3)$$

где

$$a = R_1 + R_2 + R + R_H; b = R + R_2; c = R_H; d = R_2. \quad (4)$$

Анализ показывает, что справедливо условие $\Delta < 0$. Схема замещения того или иного режима справедлива лишь в случае, когда все токи в вентилях положительны. С учетом этого и условия $\Delta < 0$ получим следующие условия существования отдельных режимов:

$$\frac{e_1}{e_2} < k_1 \text{ — для режима 32;} \quad (5)$$

$$k_1 < \frac{e_1}{e_2} < k_2 \text{ — для режима 324;} \quad (6)$$

$$\frac{e_1}{e_2} > k_2 \text{ — для режима 34.} \quad (7)$$

При этом

$$k_1 = \frac{R(2R_1' + R_2 + R + 2R_H)}{(R + R_2)(2R_1 + 2R_2 + R + 4R_H)}; \quad (8)$$

$$k_2 = \frac{(R + R_1)(2R_1 + 2R_2 + R + 4R_H)}{R(R_1 + 2R_2 + R + 2R_H)}. \quad (9)$$

Токи в нагрузке

$$i_H = -\frac{R[(R + 2R_2)e_1 + (R + 2R_1)e_2]}{\Delta} \text{ в режиме 324;} \quad (10)$$

$$i_H = \frac{2e_1}{2R_1 + R_2 + R + 2R_H} \text{ — в режиме 32;} \quad (11)$$

$$i_H = \frac{2e_2}{R_1 + 2R_2 + R + 2R_H} \text{ — в режиме 34.} \quad (12)$$

При подаче на КФС синусоидальных напряжений $e_1 = 0,5 E_{1m} \sin \omega t$, $e_2 = 0,5 E_{2m} \sin (\omega t - \varphi)$ в течение периода каждый из вентилях на определенное время становится особым, т. е. открытым независимо от соотношения значений входных сигналов. На рис. 3 показаны области различных режимов в течение периода изменения входных сигналов. При совпадении знаков мгновенных значений величин (области особых вентилях 3 и 1) примем знак тока в нагрузке поло-

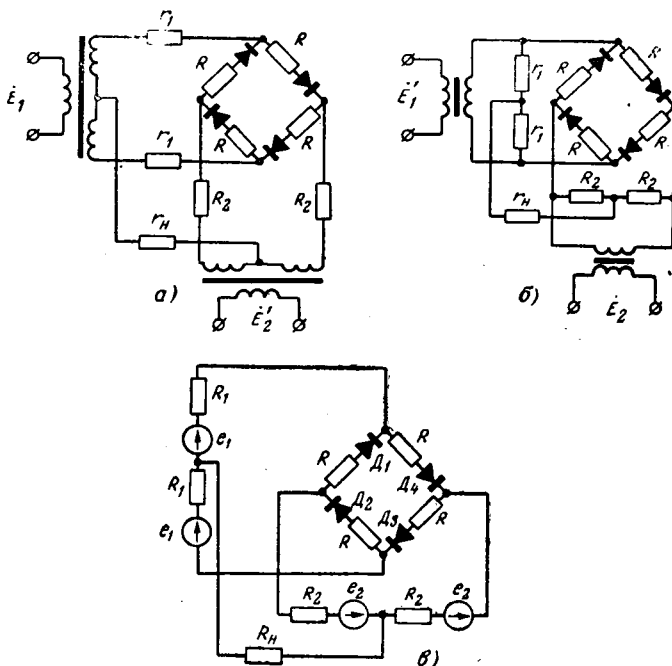


Рис. 1. Симметричные КФС.

а — нагрузка включена между средними точками трансформаторов; б — нагрузка включена между средними точками делителей; в — эквивалентные схемы замещения.

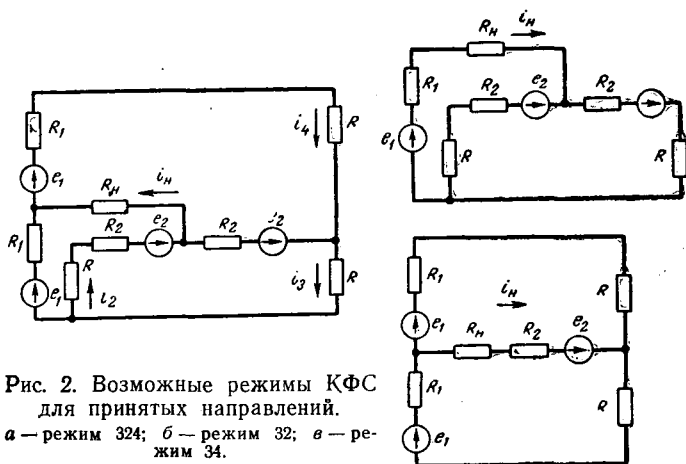


Рис. 2. Возможные режимы КФС для принятых направлений.
а — режим 324; б — режим 32; в — режим 34.

жительным, а при особых вентилях 4 и 2 ток в нагрузке отрицательный.

Границы этих областей определяются при подстановке в неравенства (5) ÷ (7) для случая особого вентиля 3 или в аналогичные им неравенства для других особых вентилях, значений э. д. с.

Границы областей отдельных режимов для отрезка $0 \leq \omega t \leq \pi$ (рис. 3):

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \arctg \frac{k_1 \gamma \sin \varphi}{1 + k_1 \gamma \cos \varphi} \text{ при } 1 + k_1 \gamma \cos \varphi > 0; \\ \alpha_1 &= \pi - \arctg \frac{-k_1 \gamma \sin \varphi}{1 + k_1 \gamma \cos \varphi} \text{ при } 1 + k_1 \gamma \cos \varphi < 0; \\ \alpha_2 &= \arctg \frac{k_2 \gamma \sin \varphi}{1 + k_2 \gamma \cos \varphi} \text{ при } 1 + k_2 \gamma \cos \varphi > 0; \\ \alpha_2 &= \pi - \arctg \frac{-k_2 \gamma \sin \varphi}{1 + k_2 \gamma \cos \varphi} \text{ при } 1 + k_2 \gamma \cos \varphi < 0; \\ \alpha_3 &= \pi - \arctg \frac{k_2 \gamma \sin \varphi}{1 + k_2 \gamma \cos \varphi} \text{ при } 1 - k_2 \gamma \cos \varphi > 0; \\ \alpha_3 &= \arctg \frac{-k_2 \gamma \sin \varphi}{1 - k_2 \gamma \cos \varphi} \text{ при } 1 - k_2 \gamma \cos \varphi < 0; \\ \alpha_4 &= \pi - \arctg \frac{k_1 \gamma \sin \varphi}{1 - k_1 \gamma \cos \varphi} \text{ при } 1 - k_1 \gamma \cos \varphi > 0; \\ \alpha_4 &= \arctg \frac{-k_1 \gamma \sin \varphi}{1 - k_1 \gamma \cos \varphi} \text{ при } 1 - k_1 \gamma \cos \varphi < 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

При этом

$$\gamma = \frac{E_{2m}}{E_{1m}}. \quad (14)$$

При особых вентилях 2 и 1, т. е. в интервале $\pi < \omega t < 2\pi$ диапазоны аналогичных режимов сдвинуты по отношению к $\alpha_1 \div \alpha_4$ на угол π .

Связь между средним значением тока в нагрузке I_H и значениями E_{1m} , E_{2m} , φ определится выражением

$$I_H = \frac{1}{\pi} \sum_{\alpha_n}^{\alpha_{n+1}} \int_{\alpha_n}^{\alpha_{n+1}} i_H d\omega t. \quad (15)$$

Обозначив:

$$R_3 = \frac{2R_1 + R_2 + R + 2R_H}{2}; \quad R_4 = \frac{2R_2 + R_1 + R + 2R_H}{2};$$

$$R_5 = -\frac{\Delta}{R(R + 2R_2)}; \quad R_6 = -\frac{\Delta}{R(R + 2R_1)}$$

и учитывая знаки тока i_H в нагрузке при различных комбинациях знаков входных величин, получим:

$$I_H = \frac{1}{\pi} \left[- \int_0^{\alpha_3} \frac{E_{1m}}{2R_3} \sin \omega t d\omega t - \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{E_{1m}}{2R_5} \sin \omega t d\omega t + \right.$$

$$+ \int_{\alpha_1}^{\alpha_3} \frac{E_{2m}}{2R_6} \sin(\omega t - \varphi) d\omega t + \int_{\alpha_2}^{\varphi} \frac{E_{2m}}{2R_4} \sin(\omega t - \varphi) d\omega t +$$

$$+ \int_{\varphi}^{\alpha_3} \frac{E_{2m}}{2R_4} \sin(\omega t - \varphi) d\omega t + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \frac{E_{1m}}{2R_5} \sin \omega t d\omega t +$$

$$+ \int_{\alpha_4}^{\pi} \frac{E_{2m}}{2R_6} \sin(\omega t - \varphi) d\omega t + \int_{\pi}^{\alpha_4} \frac{E_{1m}}{2R_3} \sin \omega t d\omega t. \quad (16)$$

Примем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \sqrt{1 + 2k_1 \gamma \cos \varphi + k_1^2 \gamma^2}; \\ \gamma_2 &= \sqrt{1 + 2k_2 \gamma \cos \varphi + k_2^2 \gamma^2}; \\ \gamma_3 &= \sqrt{1 - 2k_2 \gamma \cos \varphi + k_2^2 \gamma^2}; \\ \gamma_4 &= \sqrt{1 - 2k_1 \gamma \cos \varphi + k_1^2 \gamma^2}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

После преобразований выражение (16) приводится к виду:

$$I_H = \frac{E_1}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{\gamma_1 - \gamma_4}{R_{\Sigma 1}} + \frac{\gamma_2 - \gamma_3}{R_{\Sigma 2}} \right), \quad (18)$$

где

$$R_{\Sigma 1} = \frac{2R_1 + R_2 + R + 2R_H}{2} \left(1 + k_1 \frac{R + 2R_2}{R + 2R_1} \right);$$

$$R_{\Sigma 2} = \frac{R_1 + 2R_2 + R + 2R_H}{2} \left(k_2 + \frac{R + 2R_1}{R + 2R_2} \right).$$

Переход от значений E_1 и E_2 к E'_1 и E'_2 производится путем несложных преобразований, которые не приводятся.

Выражение (18) связывает среднее значение тока в нагрузке и действующие значения входных сигналов во всем диапазоне изменения их амплитуд и фаз. Для абсолютно симметричной КФС при $R_1 = R_2$

$$I_H = \frac{E_1}{\sqrt{2} \pi R_{\Sigma}} (\gamma'_1 + \gamma'_2 - \gamma'_3 - \gamma'_4), \quad (19)$$

где

$$R_{\Sigma} = \frac{3R_1 + R + 2R_H(1 + k)}{3};$$

$$\gamma'_1 = \sqrt{1 + 2k\gamma \cos \varphi + k^2 \gamma^2}; \quad \gamma'_2 = \sqrt{k^2 + 2k\gamma \cos \varphi + \gamma^2};$$

$$\gamma'_3 = \sqrt{k^2 - 2k\gamma \cos \varphi + \gamma^2}; \quad \gamma'_4 = \sqrt{1 - 2k\gamma \cos \varphi + k^2 \gamma^2};$$

$$k = \frac{R(3R_1 + R + 2R_H)}{(R + R_1)(4R_1 + R + 4R_H)}.$$

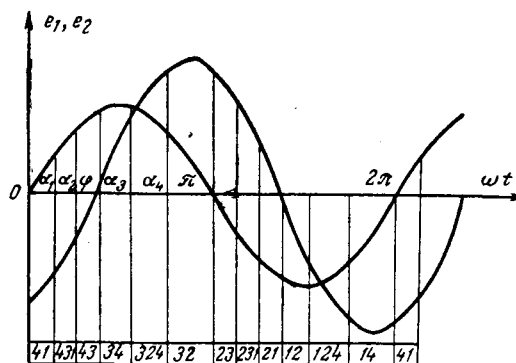


Рис. 3. Области различных режимов КФС.

Магнитная система без стали для создания приближенно равномерного магнитного поля

А. И. БОДЯКШИН

Москва

Приближенно равномерное магнитное поле можно получить с помощью двух одинаковых катушек, расположенных друг от друга на определенном расстоянии («катушек Гельмгольца»). Эта система обладает такими ценными качествами, как простота конструкции и изготовления (особенно важно в случае хрупких сверхпроводников), легкость доступа в рабочее пространство.

Общезвестны круглые катушки Гельмгольца малого сечения [Л. 1] с расстоянием между ними, равным радиусу катушки:

$$2h=r. \quad (1)$$

В рабочем пространстве такой системы выполняются условия:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = 0. \quad (3)$$

Поэтому составляющие вектора магнитной индукции B_x , B_y и B_z удовлетворяют уравнению Лапласа. Пусть ось z совпадает с магнитной осью катушек, а начало координат — с центром рабочего пространства. В качестве условия получения приближенно равномерного поля примем:

$$\left. \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} \right|_{x=0, y=0, z=0} = 0. \quad (4)$$

Можно показать, что при этом остальные частные производные второго порядка в точке $(0, 0, 0)$ равны нулю или близки к нулю (см. приложение). Частные производные всех нечетных порядков равны нулю в силу симметрии. (В принципе можно сделать поле еще более равномерным, обратив в нуль частные производные высших четных порядков. Для этого требуется большее число катушек.)

Для круглых катушек с прямоугольным радиальным сечением (рис. 1) из (4) имеем:

$$\sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \frac{(-1)^{m+n}}{h_n} \left(\frac{r_m}{\sqrt{r_m^2 + h_n^2}} \right)^3 = 0. \quad (5)$$

При бесконечно малом сечении получается формула (1).

Рассмотрим теперь прямоугольные катушки (рис. 2). При малых размерах сечения имеем:

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \frac{x_i y_j}{\sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}} \left(\frac{1}{x_i^2 + z_k^2} + \frac{1}{y_j^2 + z_k^2} \right), \quad (6)$$

где I — полный ток одной катушки;

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= a - x; & y_1 &= b - y; & z_1 &= h - z; \\ x_2 &= a + x; & y_2 &= b + y; & z_2 &= h + z; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2}; \quad b = \frac{b_1 + b_2}{2}; \quad h = \frac{h_1 + h_2}{2}, \quad (8)$$

откуда с учетом условия (4) получаем:

$$\{(3a^2 + 2b^2 + 3h^2)[(3a^2 + 3b^2 + 4h^2)h^2 - a^4 - a^2b^2] - 2b^2h^2(a^2 + h^2)\}(b^2 + h^2)^3 + \{(2a^2 + 3b^2 + 3h^2)[(3a^2 + 3b^2 + 4h^2)h^2 - a^2b^2 - b^4] - 2a^2h^2(b^2 + h^2)\}(a^2 + h^2)^3 = 0. \quad (9)$$

При сечении произвольных размеров аналитическое выражение в конечном виде записать для B_z затруднительно, но для $\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2}$ это возможно. Продифференцировав (6) по z 2 раза,

проинтегрируем результат по сечению катушки. Из условия (4) получим:

$$\sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \frac{h_n (-1)^{m+n}}{\sqrt{a_m^2 + b_m^2 + h_n^2}} \left[\frac{2}{a_m + b_m + \sqrt{2(a_m^2 + b_m^2 + h_n^2)}} + \frac{a_m}{b_m^2 + h_n^2} + \frac{b_m}{a_m^2 + h_n^2} \right] = 0, \quad (10)$$

где $a_1, a_2, b_1, b_2, h_1, h_2$ — размеры магнитной системы (рис. 2).

При выводе выражения (10) принято, что

$$\Delta a = \Delta b \quad (11)$$

и плотность тока по сечению катушки распределена равномерно.

При размерах по оси x , значительно больших размеров по оси y , выражение (10) упрощается:

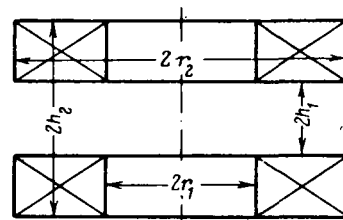


Рис. 1.

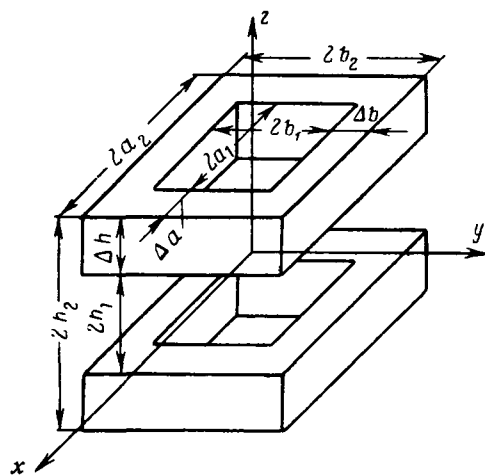


Рис. 2.

Следует отметить, что основные уравнения КФС (18) и (19) по форме аналогичны полученным автором уравнениям для схем сравнения абсолютных значений двух электрических величин с помощью выпрямления при несовпадении сравниваемых величин по фазе [Л. 1 и 2], что говорит об общности уравнений электрических схем с вентилями при синусоидальных сигналах.

Выводы. 1. При нахождении зависимостей, описывающих поведение КФС при синусоидальных входных сигналах, необходимо учитывать различные состояния схемы в отдельные моменты времени.

2. На значение выходного сигнала КФС влияют соотношения фаз и амплитуд входных сигналов. Полученные зависимости можно использовать при анализе различных устройств, содержащих КФС.

Литература

1. Шпеерсон Э. М., Поведение релейных органов на основе детекторных схем сравнения при несовпадении по фазе сравниваемых величин, Известия АН Латв. ССР, 1968, № 4.
2. Шпеерсон Э. М., К анализу детекторных релейных органов с двумя величинами, «Электричество», 1969, № 4.



$$b_1^2 b_2^2 = h_1 h_2 (b_1^2 + b_2^2 + h_1^2 + h_2^2). \quad (12)$$

При практических расчетах индукция определяется численным интегрированием. Расчеты удобно вести с помощью ЦВМ.

Пример 1. Опытная магнитная система с размерами: $a = 0,2$ м, $b = 0,05$ м, $h = 0,028$ м, $\Delta a = \Delta b = \Delta h = 0,01$ м. Каждая катушка имеет 80 витков провода ПЭВ-2 с диаметром в один миллиметр. При токе $i = 16$ а имеем в центре рабочего пространства $B_z = 0,0162$ тл. В рабочем пространстве $0,2 \times 0,05 \times 0,028$ м неравномерность поля не превышает 3%. Распределение индукции, рассчитанное на ЦВМ «Урал-2», совпадает с измеренным (баллистическим гальванометром) в пределах точности измерений.

Пример 2. Проект системы со сверхпроводящими обмотками размерами: $a_1 = 1,5$ м, $a_2 = 2,7$ м, $b_1 = 0,6$ м, $b_2 = 1,8$ м, $h_1 = 0,5$ м, $h_2 = 0,6$ м; рабочее пространство $3,0 \times 0,8 \times 0,6$ м. При расчетной плотности тока $j = 6,45 \cdot 10^7$ а/м² (равномерно распределенной по сечению катушки) в центре рабочего пространства имеем $B_z = 5$ тл, при $j = 1,03 \cdot 10^8$ а/м² имеем $B_z = 8$ тл. Неравномерность поля в рабочем пространстве не превышает 15%. (Распределение индукции рассчитано на ЦВМ «Урал-2».) Для сравнения рассчитанная при тех же значениях B_z , j и размерах рабочего пространства магнитная система без стали с поперечным сечением обмотки в виде двух пересекающихся эллипсов [Л. 2] (система для создания равномерного поля, оптимальная по расходу материала, но более сложная с точки зрения конструкции и изготовления) дала уменьшение расхода сверхпроводника всего на 15%.

Приложение. Разложим функцию $B_z = f(x, y, z)$ в степенной ряд:

$$B_z = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i y^j z^k}{i!j!k!} \left(\frac{\partial^{i+j+k} B_z}{\partial x^i \partial y^j \partial z^k} \right) \Big|_{\substack{x=0 \\ y=0 \\ z=0}}, \quad (\text{П-1})$$

где $\frac{\partial^0 B_z}{\partial x^0 \partial y^0 \partial z^0} = B_z$, $0! = 1$. Если все частные производные равны нулю, начиная с первого порядка и выше, поле будет строго равномерным:

$$B_z(x, y, z) = B_z(0, 0, 0) = \text{const}. \quad (\text{П-2})$$

Это выполнимо лишь в случае замкнутого пространства, ограниченного со всех сторон обмоткой с током или средой с проницаемостью, отличающейся от μ_0 .

В незамкнутом пространстве можно получить приближенно равномерное поле, обратив в нуль хотя бы частные про-

изводные первого и второго порядка. Для симметричной магнитной системы в (П-1) равны нулю все члены, кроме тех, у которых одновременно i, j, k четные числа, т. е. равны нулю частные производные первого и всех нечетных порядков, а из частных производных второго порядка

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial^2 B_z}{\partial x \partial z}, \quad \frac{\partial^2 B_z}{\partial y \partial z}.$$

Остаются $\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2}$, любая из которых обращается в нуль соответствующим выбором расстояния $2h$ между катушками. Можно записать уравнения для нахождения: $h = h_x$, при котором $\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = 0$; $h = h_y$, при котором $\frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2} = 0$; $h = h_z$, при котором $\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} = 0$. Для круглых и квадратных катушек все три уравнения одинаковы и $h_x = h_y = h_z$.

Рассмотрим прямоугольные катушки при $a \geq b$. Ограничимся для простоты случаем малых размеров поперечного сечения, для которого имеем:

$$\begin{aligned} (3a^2 + 2b^2 + 3h_x^2) [(3a^2 + 3b^2 + 4h_x^2) h_x^2 - a^4 - a^2 b^2] - \\ - 2b^2 h_x^2 (a^2 + h_x^2) &= 0, \\ (2a^2 + 3b^2 + 3h_y^2) [(3a^2 + 3b^2 + 4h_y^2) h_y^2 - a^2 b^2 - b^4] - \\ - 2a^2 h_y^2 (b^2 + h_y^2) &= 0. \end{aligned}$$

Здесь h_z определяется уравнением (9). Решение этих уравнений показывает, что будет справедливо неравенство:

$$h_x \geq h_z \geq h_y.$$

Поэтому представляется целесообразным принять $h = h_z$. При этом условии $\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} = 0$, а $\left| \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} \right|$ и $\left| \frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2} \right|$ сравнительно невелики (в пределах от нуля до $0,13 \frac{B_z}{b^2}$).

Литература

1. Шимопи К., Теоретическая электротехника, изд-во «Мир», 1964.
2. Dzung L. S., Das Magnetfeld des Gleichstromdurchflossenen geraden Leiters von Elliptischen Querschnitt «Arch. f. Elektr.», 1962, Bd. 47, H 1.



УДК 621.382:621.317.799

Прибор для измерения времени выключения тиристоров

А. П. САВРУХИН

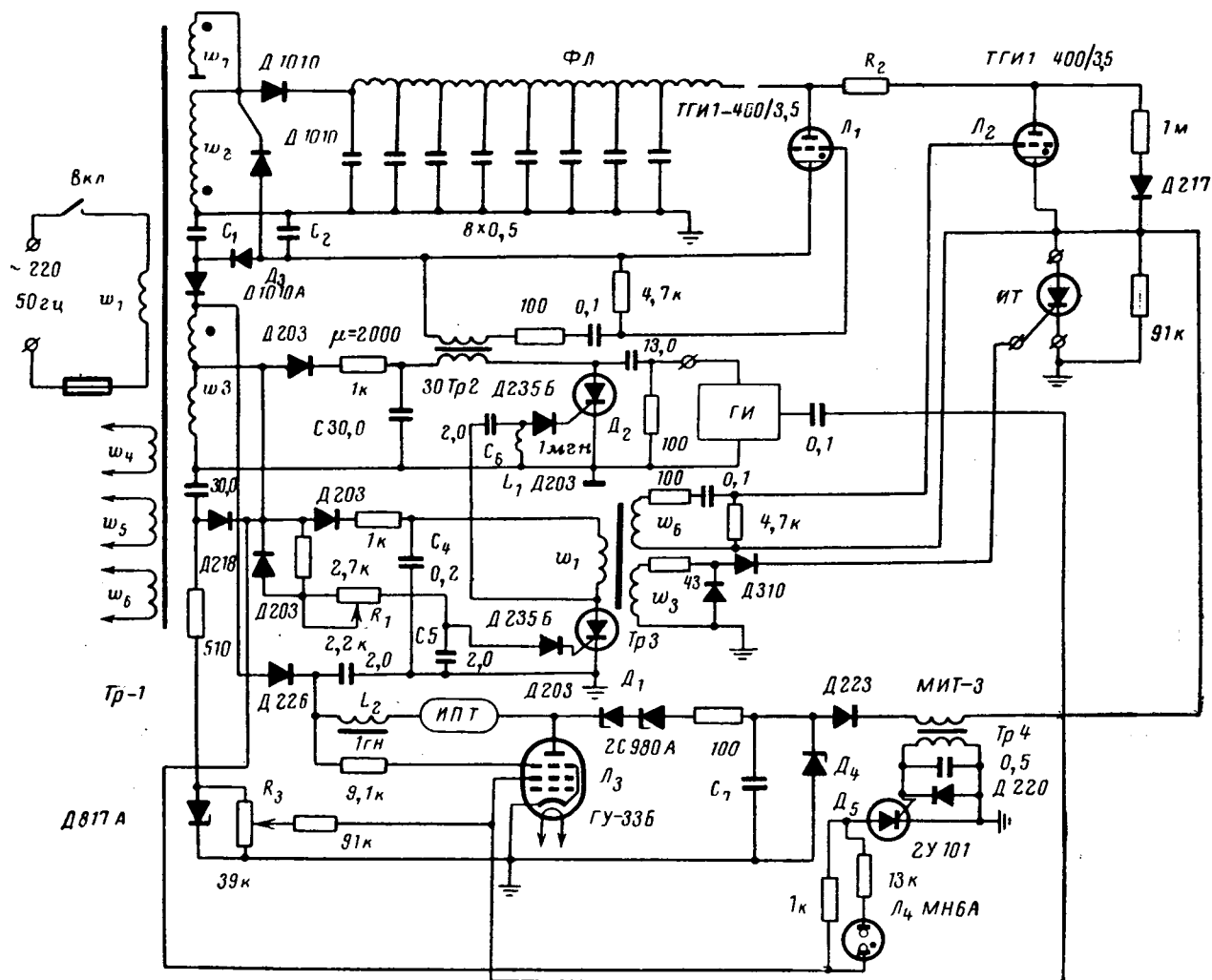
Московский лесотехнический институт

В современной аппаратуре, предназначенной для преобразования электрической энергии и управления агрегатами, мощность которых достигает десятков мегаватт, все более широко применяются четырехслойные управляемые полупроводниковые вентили — тиристоры [Л. 1], одной из важнейших характеристик которых является время выключения, определяющее частотный диапазон работы преобразовательных устройств, например инверторов [Л. 2].

Время выключения тиристора определяется наименьшим временным интервалом между моментом окончания протекания тока через тиристор и моментом, когда на него вновь подается прямое напряжение с допустимой крутизной нарастания и амплитудой, причем тиристор не переводится этим напряжением в открытое состояние.

Время выключения $t_{\text{выкл}}$ логарифмически связано с величиной прямого тока, поскольку последний определяет накопленный в базах тиристора заряд, и поэтому должно измеряться на наибольшем допустимом прямом токе, длительность

протекания которого ограничена временем установления напряжения анода тиристора (25—50 мксек) и мощностью, рассеиваемой на приборе. Скорость уменьшения тока на этапе запираания тиристора должна быть как можно большей, поскольку она определяет остаточный заряд в момент перехода тока через нулевое значение. Увеличение амплитуды обратного тока испытуемого тиристора на этапе восстановления обратного сопротивления и обратного напряжения на тиристоре после его запираания приводит к уменьшению $t_{\text{выкл}}$ в отдельных случаях на 100% и более, а поскольку в некоторых устройствах, в которых применяются тиристоры, величины обратного тока и напряжения ограничены, необходимо и в измерительном устройстве стремиться к снижению их до возможно малых значений. Перечисленные требования к измерительной аппаратуре не всегда выполняются, что снижает достоверность результата измерения. Так, например, некоторые авторы [Л. 3—5] рекомендуют ограничивать обратный ток путем включения последовательно с испытуемым тиристором полу-



проводникового диода или тиристора [Л. 6], которые имеют практически не контролируемое время восстановления обратного сопротивления.

На рисунке приведена схема прибора для измерения $t_{\text{выкл}}$ тиристоров, в котором в качестве вентильного элемента используется импульсный тиратрон. Подтвержденный экспериментом анализ работы тиратрона на этапе его запирающего показывает, что по своим вентильным свойствам тиратрон является аналогом электронной лампы и может применяться для измерения тиристоров с $t_{\text{выкл}} \geq 0,25$ мксек.

В течение положительной полуволны напряжения в обмотке w_2 и отрицательной полуволны в обмотках w_3 , w_7 трансформатора $Tr1$ заряжаются конденсаторы формирующей линии $\Phi Л$ и конденсаторы C_1 — C_5 . В следующий полупериод напряжения в момент максимума напряжения обмотки w_3 ($Tr1$) изменяется полярность напряжения U_{C5} благодаря перезаряду конденсатора C_5 через подстроечный реостат R_1 , включается вспомогательный тиристор D_1 и, следовательно, лампа L_2 и испытуемый тиристор. Амплитуда прямого тока испытуемого тиристора регулируется сменным резистором R_2 , а длительность протекания равна четверти периода колебаний в контуре $C_6 L_1$.

В момент смены знака напряжения на катушке L_1 включается вспомогательный тиристор D_2 и тиратрон L_1 . В результате приложения обратного напряжения запирается тиратрон L_2 , и после перезаряда формирующей линии $\Phi Л$ запирается L_1 . Конденсатор C_2 заряжается до высокого напряжения, необходимого для компенсации индуктивного всплеска в контуре, содержащем испытуемый тиристор ИТ. Когда напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 становятся равными, открывается диод D_3 и поэтому $\Phi Л$ перезаряжается лишь до напряжения $U_{C1} < U_{C2}$. Это позволяет снизить мощность прибора и средний ток L_1 . Одновременно с прекращением

протекания тока через испытуемый тиристор запускается генератор задержанных импульсов ГИ (например, типа ГИС-2М), выходной отрицательный импульс которого запирает лампу L_3 с тока, определяемого по показаниям измерителя тока ИПТ и устанавливаемого с помощью потенциометра R_3 .

Благодаря свойствам дросселя L_2 , конденсатор C_7 заряжается линейно, что означает формирование переднего фронта импульса объективного контроля (ИОК) на аноде испытуемого тиристора. В момент, когда напряжение U_{C7} достигает предельно допустимой для данного типа испытуемого тиристора величины, открывается стабилитрон D_4 и формируется плоская вершина импульса объективного контроля. Если задержка импульсов ГИ меньше $t_{\text{выкл}}$ данного испытуемого тиристора, последний переводится в открытое состояние, в обмотках $Tr4$ формируется импульс тока, включается вспомогательный тиристор D_5 и загорается сигнальная лампа L_4 . Искомое $t_{\text{выкл}}$ определяется по наименьшей задержке выходного импульса ГИ, при которой L_4 остается погашенной.

Рассматриваемый прибор имеет следующие характеристики.

Амплитуда прямого тока 0,2—100 а, длительность протекания тока 50 мксек, время уменьшения тока < 20 нсек; диапазон измеряемого времени выключения 0,25—200 мксек; амплитуда ИОК равна 50—600 в; нелинейность переднего фронта ИОК составляет 10%, диапазон крутизны 5—200 в/мксек; погрешность измерения $t_{\text{выкл}}$ равна $\pm 10\%$.

Прибор позволяет исследовать характеристики мощных полупроводниковых и газоразрядных приборов, поскольку в своей основе содержит генератор прямоугольных импульсов тока с крутым задним фронтом.

Расчет магнитных цепей электромагнитов постоянного тока методом относительных единиц

В. Н. ГУРНИЦКИЙ и Л. П. БЫЧКОВ

Барнаул

Наиболее полно расчеты магнитных цепей отражены в [Л. 1], где рассмотрены случаи, часто встречающиеся на практике. Однако получение конечных результатов связано со следующими затруднениями:

невозможностью сравнить варианты расчета и выбрать наиболее подходящий до проведения самих расчетов;

относительной трудоемкостью расчетов, особенно, если их нужно повторить для нескольких положений якоря или различных соотношений геометрических размеров;

необходимостью применить методику расчета наиболее пригодную для данной структуры магнитной цепи, от чего зависит также и точность расчета.

Возможности простейшего получения результатов расчета магнитной цепи открываются при использовании метода относительных единиц [Л. 2].

Рассмотрим решение задачи на примере Ш-образного электромагнита постоянного тока с плоским прямоходовым якорем.

Выразим размеры магнитной цепи электромагнита в относительных единицах, сделав приведение к основному размеру a (рис. 1):

$$\frac{a}{a} = 1; \quad \frac{b}{a} = b_a; \quad \frac{c}{a} = c_a; \quad \frac{h}{a} = h_a; \quad \frac{\delta}{a} = \delta_a. \quad (1)$$

Изменяя соотношение между относительными величинами b_a, c_a, h_a, δ_a в приемлемых пределах, определим значения проводимостей всех путей магнитного потока. Измерения проведем по способу эквивалентной емкости [Л. 3] (рис. 1, где ИЕ — измеритель емкостей, поток электрической энергии показан стрелками).

Переход от величин емкостей C' к значениям магнитных проводимостей G' осуществляется на основе равенства:

$$G' = \nu' C', \quad (2)$$

где ν' — размерный коэффициент пересчета, определяемый из нижеследующих соображений.

Для емкости плоского конденсатора, в пренебрежении электрическим выпучиванием, имеем соотношение:

$$C'_\delta = \epsilon_0 \frac{s}{\delta},$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, ф/м; s — сечение пластины конденсатора, м²; δ — расстояние между пластинами, м.

Для магнитной проводимости между теми же пластинами, в пренебрежении магнитным выпучиванием, имеем:

$$C'_\delta = \mu_0 \frac{s}{\delta},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума.

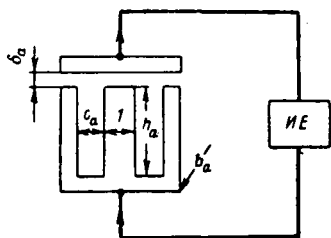


Рис. 1.

Для области, не занятой токами, основные уравнения магнитного поля аналогичны уравнениям электрического поля в диэлектрической среде при отсутствии зарядов; это означает, что картины электрических и магнитных полей будут одинаковыми, если условия их распределения сходны [Л. 4].

Отсюда следует, что полная проводимость G' отличается от проводимости G'_δ во столько же раз, во сколько полная емкость C' отличается от емкости C'_δ , т. е.

$$\frac{G'}{C'} = \frac{G'_\delta}{C'_\delta} = \frac{\mu_0}{\epsilon_0} = \nu' = 1,42 \cdot 10^5 \frac{\text{гн}}{\text{ф}}. \quad (3)$$

Для получения опытных данных, необходимых для построения кривых магнитных проводимостей, были изготовлены сердечники Ш-образной структуры.

Для Ш-образной электрической цепи, учитывая направление потоков электрической и магнитной энергии, соответственно получим:

$$C_\delta = \epsilon_0 \frac{2ab}{\delta}; \quad (4)$$

$$G_\delta = \mu_0 \frac{ab}{2\delta}; \quad (5)$$

$$\frac{G_\delta}{C_\delta} = \nu = \frac{\mu_0}{4\epsilon_0} = 0,355 \cdot 10^5, \quad \frac{\text{гн}}{\text{ф}}. \quad (6)$$

Заметим также, что использование метода эквивалентной емкости для Ш-образной цепи не дает возможности учесть проводимость рассеяния, так как емкость рассеяния шунтируется.

Проводимость рассеяния может быть определена по формуле [Л. 5]:

$$G_p = \mu_0 \frac{h}{3} \left[\frac{4}{\pi} \ln \left(1 + \frac{\pi a}{2c} \right) + \frac{2b}{c} \right]. \quad (7)$$

Прежде чем перейти к дальнейшему анализу магнитных проводимостей Ш-образной цепи, рассмотрим ее схему замещения (рис. 2), из которой следует, что полное потокоцепление обмотки может быть записано в виде выражения:

$$\psi = \omega \Phi = \omega \Phi_\delta + \omega \Phi_p + k_p \omega \Phi_p, \quad (8)$$

где Φ — результирующий магнитный поток, состоящий из потоков воздушного зазора Φ_δ , выпучивания Φ_p и рассеяния Φ_p ; ω — число витков обмотки электромагнита; k_p — коэффициент рассеяния, учитывающий, что эквивалентный сосредоточенный поток рассеяния охватывает не все витки, а только часть их — витки рассеяния ω_p .

Для определения k_p была снята зависимость величины потока рассеяния в функции высоты сердечника h .

Опыты показывают, что почти независимо от b_a, c_a и h_a изменение потока рассеяния соответствует параболической за-

Катушка формирующей линии ФЛ имеет диаметр 30 мм, намотана проводом ПЭЛ диаметром 1,4 мм. Эта катушка имеет отводы от 32, 59, 86, 113, 140, 167, 194 и 226 витков.

Литература

1. Gutzwiller F. W., Thyristors and rectifiers diodes — the semiconductor workness, IEEE Spectrum, 1967, v. 4.
2. Горохов В. А., Техническое обоснование системы параметров триодных тиристоров и оценка перспектив их применения, Сборник работ МЛТИ, вып. 16, Вопросы физики и применения тиристоров, 1967.

3. Dyer R. F., Houghton G. K., Turn-off time characterization of silicon controlled rectifiers, «Direct Current», 1962, v. 7.

4. Somos I., Switching characteristic of silicon power — controlled rectifiers, Trans. IEEE, 1964, v. 83.

5. Dyer R. F., Concurrent characterization of SCR switching parametes for inverter applications, «SCP and solid state technology», 1965, v. 8.

6. Düll P., A new simplified testing equipment for the forward recovery of silicon — controlled rectifiers, Direct Current, 1964, v. 83.



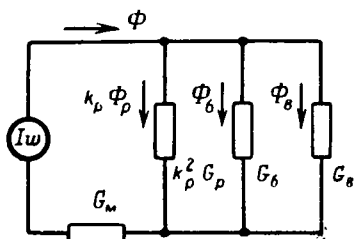


Рис. 2.

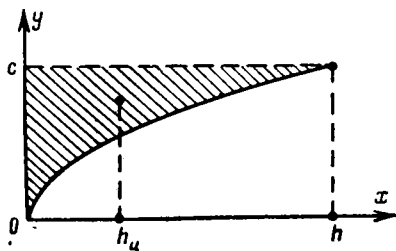


Рис. 3.

зависимости (рис. 3):

$$y = k\sqrt{x}, \quad (9)$$

где k — постоянный коэффициент; y — ось интенсивности потока рассеяния; x — координата, параллельная оси катушки.

Если вычислить по x положение центра тяжести заштрихованной на рис. 3 фигуры, то, очевидно, этим мы определим линию как бы сконцентрированного потока рассеяния, охватывающего ω_p число витков.

Согласно [Л. 6] координата центра тяжести определяется по формуле:

$$h_u = \frac{\int_0^h x dx \int_0^c \frac{dy}{k\sqrt{x}}}{\int_0^h dx \int_0^c \frac{dy}{k\sqrt{x}}} = 0,3 h. \quad (10)$$

Таким образом, средняя линия потока рассеяния при заполнении всего катушечного пространства обмоткой, будет проходить на расстоянии $0,3h$ от торца сердечника. Это обстоятельство указывает, что поток рассеяния охватывает 0,7 общего числа витков обмотки, т. е. $k_p = 0,7$.

Выражение для полного потокоцепления обмотки может быть также записано в виде:

$$\psi = I\omega^2 G, \quad (11)$$

где G — суммарная магнитная проводимость всех воздушных путей потока (предполагаем вначале, что магнитным сопротивлением магнитопровода можно пренебречь).

Приравняв правые части (8) и (11) и деля их на ω , имеем:

$$G = \frac{\Phi_\delta + \Phi_a + k_p \Phi_p}{I\omega} = G_\delta + G_a + k_p^2 G_p = G_o + 0,49 G_p, \quad (12)$$

где $G_o = G_\delta + G_a$ — переменная в функции величины воздушного зазора проводимость.

В (12) использовано равенство:

$$\frac{k_p \Phi_p}{I\omega} = k_p^2 G_p \quad (13)$$

или

$$\frac{\Phi_p}{G_p} = k_p / \omega,$$

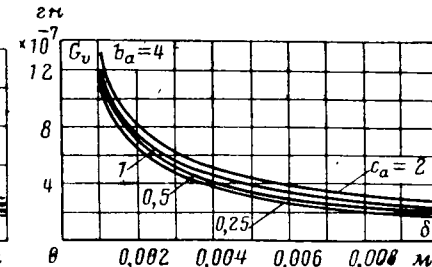
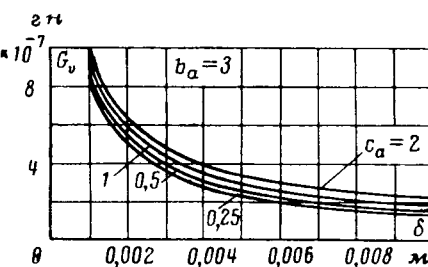
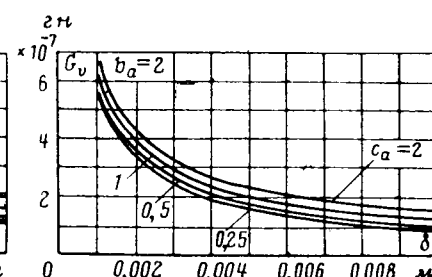
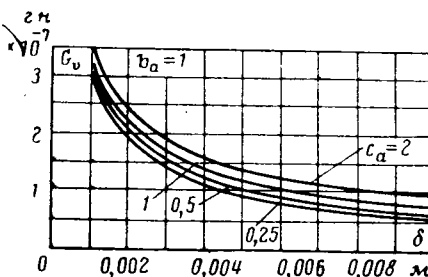


Рис. 4.

куда входят не расчетные, а вполне реальные величины, которые можно измерить. Формулы (13) и (7) позволяют также вычислить величину Φ_p .

На рис. 4 приведены зависимости G_o от δ при

$$b_a^* = 1 \div 4, \quad c_a^* = 0,25 \div 2, \quad h_a^* = [0,5 \div 3, \quad a = 0,02 \text{ м.}$$

Чтобы воспользоваться кривыми рис. 4 для Ш-образной цепи с любыми a', b', c', h' необходимо: определить отношение $\frac{a'}{a}$; на характеристиках рис. 4 отыскать точку, для которой

удовлетворялось бы равенство $\frac{a'}{a} = \frac{b'}{b} = \frac{c'}{c}$; взятое по кривым значение G_o умножить на $\frac{a'}{a}$.

Если для нахождения электромагнитной силы требуется вычислить производную $\left(\frac{dG_o}{d\delta}\right)'$, то кривыми рис. 4 можно пользоваться непосредственно, так как согласно теории подобия электромагнитов

$$\left(\frac{dG_o}{d\delta}\right)' = \frac{dG_o}{d\delta}.$$

Сила тяги электромагнита при отсутствии насыщения магнитопровода довольно точно может быть определена по формуле:

$$F = - \frac{(I\omega)^2}{2} \frac{dG_o}{d\delta}. \quad (14)$$

Если проводимость магнитопровода G_m относительно мала, нужно учитывать и ее действие, находя результирующую проводимость G_Σ из выражения:

$$G_\Sigma = \frac{GG_m}{G + G_m}. \quad (15)$$

Проводимость рассеяния G_p незначительно влияет на величину силы тяги, так как в линейной магнитной цепи она примерно постоянна, а в нелинейной — ее изменением (по отношению к проводимости G_o) можно пренебречь.

Проводимость выпучивания G_a определяется вычитанием из соответствующих значений ординат кривых рис. 4 значений проводимостей воздушного зазора (5).

Таким образом, любая из составляющих проводимости G может быть определена независимо от других, что дает возможность анализировать их влияние на величину электромагнитной силы.

Коммутация цепи индуктивного накопителя энергии с помощью вакуумного выключателя

А. В. РЕЙМЕРС, А. А. ЦВЕТКОВА, Ю. П. ИВАНОВ

и канд. техн. наук В. П. ЖИЛЬЦОВ

Москва

При использовании генератора импульсов с индуктивным накопителем энергии большие затруднения вызывает эффективный разрыв его электрической цепи. Представляет интерес исследовать возможность применения для этой цели вакуумного выключателя [Л. 1]. Как известно, погасание дуги в вакуумном выключателе происходит в момент прохождения тока через нуль. В случае установки такого выключателя в цепях постоянного тока (в частности, в генераторе импульсов с индуктивным накопителем энергии) переход тока через нуль достигается применением специального гасящего устройства, которое представляет собой конденсаторную батарею, разряжаемую в нужный момент на выключатель [Л. 2]. Целесообразность использования выключателя данного типа в цепи индуктивного накопителя энергии в значительной мере определяется габаритами и стоимостью вспомогательной конденсаторной батареи. Основной задачей статьи является определение необходимой энергии конденсатора гасящего устройства при коммутации цепи индуктивного накопителя энергии вакуумным выключателем.

Схема простейшего гасящего контура, включенного в цепь индуктивного накопителя энергии, изображена на рис. 1.

Кривые восстанавливающегося напряжения и тока через выключатель при разряде конденсатора гасящего контура в упрощенном виде приведены на рис. 2.

Длительность процесса коммутации (в результате которого ток в выключателе уменьшается от I_0 до 0, а в нагрузке возрастает от 0 до I_0) определяется суммой времени спада тока и времени восстановления напряжения:

$$t_k = t_{\text{сп}} + t_n = \frac{T}{4} + \frac{U_m C}{I_0} \alpha, \quad (1)$$

где T — период колебаний гасящего контура; C — емкость конденсатора гасящего контура; I_0 — отключаемый ток; $U_m \approx I_0 R_n$ — максимальное напряжение на нагрузке с сопротивлением R_n ; α — некоторый коэффициент, зависящий от момента подключения нагрузки (в дальнейшем будем считать $\alpha \approx 1$, что достаточно оправдано, если нагрузка подключается в тот момент, когда восстанавливающееся напряжение близко к U_m).

Минимальная длительность коммутации, необходимая для успешного отключения, может рассматриваться как характеристика выключателя данного типа.

Определим зависимость между энергией, на которую должен быть рассчитан конденсатор гасящего контура, и длительностью коммутации. Необходимая емкость конденсатора гасящего контура находится из соотношения

$$C = \frac{T I_0}{2 \pi U_0}, \quad (2)$$

где U_0 — начальное напряжение на конденсаторе гасящего контура. Нетрудно показать, что энергия E_1 , запасаемая в конденсаторе гасящего контура, будет минимальна при $U_0 = U_m$.

С учетом (1) и (2) находим:

$$E_1 = \frac{C U_m^2}{2} = \frac{t_k I_0 U_m}{\pi + 2};$$

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{2}{\pi + 2} \cdot \frac{t_k}{\tau} = 0,39 \frac{t_k}{\tau}, \quad (3)$$

где L_0 — индуктивность накопителя энергии;

$$E_0 = \frac{L_0 I_0^2}{2} = \frac{U_m I_0 \tau}{2}; \quad \tau = \frac{L_0}{R_n}.$$

Таким образом, энергия, запасаемая в конденсаторе гасящего контура, пропорциональна времени коммутации. Соотношение (3) можно записать в несколько другом виде, если ввести понятие о предельной частоте гасящего контура:

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{1}{2 \pi f_{\text{пред}} \tau}, \quad (4)$$

где

$$f_{\text{пред}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_k} \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2\pi} \right).$$

Наряду с простейшей схемой гасящего контура, рассмотренной выше, возможно применение других схем, обеспечивающих лучшие условия для погасания дуги в выключателе. Например, при наличии насыщающегося дросселя в цепи выключателя [Л. 3] соблюдается приблизительное равенство нулю тока и восстанавливающегося напряжения в течение периода коммутации t_k . Подобный эффект имеет место, когда в качестве гасящего контура используется искусственная линия. Нетрудно показать, что для указанных схем длительность коммутации равна:

$$t_k = \frac{2 C U_m}{I_0} \quad (\text{при } U_m \approx U_0).$$

Необходимая энергия конденсатора гасящего контура определяется соотношением, аналогичным (3):

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{t_k}{2\tau}. \quad (5)$$

Из соотношений (3)–(5) видно, что для оценки энергии конденсатора гасящего контура необходимо знать минимальную длительность коммутации t_k (или предельную частоту $f_{\text{пред}}$). Указанные величины были определены экспериментально для вакуумных дугогасительных камер типа КДВ-12М. Схема опытов аналогична представленной на рис. 1 с той разницей, что ток в цепи испытуемой камеры создавался путем разряда батареи конденсаторов емкостью $C = 1400 \text{ мкф}$; индуктивность накопителя L_0 составляла $0,25 \text{ мГн}$.

Следует отметить, что применявшаяся методика не воспроизводила полностью условий работы выключателя в цепи индуктивного накопителя энергии, так как в процессе испыта-

Аналогичные приведенным на рис. 4 универсальные кривые могут быть построены для любой структуры магнитной цепи, что сделано авторами для 24 типовых форм магнитопроводов.

Литература

1. Буль Б. К., Основы теории и расчета магнитных цепей, изд-во «Энергия», 1964.
2. Гурницкий В. Н., Использование метода относительных единиц при расчетах магнитных цепей постоянного

тока, Материалы научно-технической конференции, Барнаул, 1967.

3. Гурницкий В. Н. и Бычков Л. П., Установка для измерения магнитных сопротивлений методом эквивалентной емкости, Технический листок Алт. ЦБТИ № 35, 1968.

4. Бессонов Л. А., Теоретические основы электротехники, изд-во «Высшая школа», 1964.

5. Витенберг М. И., Расчет электромагнитных реле, Госэнергоиздат, 1961.

6. Бронштейн И. Н. и Семендяев К. А., Справочник по математике, Гостехиздат, 1956.



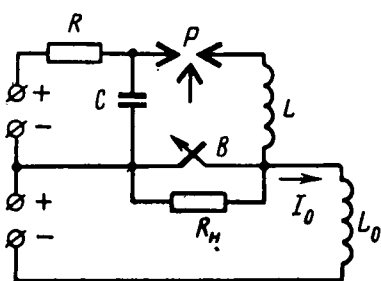


Рис. 1. Схема коммутации цепи индуктивного накопителя энергии с линейным гасящим контуром LC.

C — конденсатор гасящего контура; L — дроссель гасящего контура; B — вакуумный выключатель; L₀ — накопитель энергии; P — разрядник; R_н — сопротивление нагрузки; R — зарядное сопротивление.

ний отсутствовала стадия длительного прохождения тока через замкнутые контакты в период накопления энергии. Для устранения сильного разогрева контактов вакуумной дугогасительной камеры может оказаться необходимым шунтирование ее с помощью дополнительного коммутатора, размыкающегося лишь перед срабатыванием вакуумного выключателя.

Во время опытов контакты вакуумной дугогасительной камеры разводились одновременно с началом разряда конденсаторной батареи, что приводило к возникновению дуги между ними. Разряд конденсаторов гасящего контура осуществлялся в момент, когда расстояние между контактами камеры достигало 2—3 мм. Как правило, этот момент соответствовал максимуму тока в цепи камеры, наступавшему через одну миллисекунду после начала разряда основной конденсаторной батареи. В ходе экспериментов было установлено, что длительность горения дуги между контактами сильно влияет на предельный отключаемый ток. Например, при уменьшении длительности горения дуги с 4 до 1 мсек предельный отключаемый ток возрастал примерно в 1,5 раза.

Относительно малое время горения дуги (1 мсек) достигалось путем быстрого размыкания контактов камеры с помощью специального электродинамического привода, состоящего из двух катушек, взаимно отталкивающихся при разряде на них конденсатора емкостью 100 мкф, заряженного до напряжения 1,5 кВ.

Сопротивление нагрузки, подключавшееся через разрядник с пробивным напряжением около 20 кВ, составляло 5 ом. Начальное напряжение на конденсаторе гасящего контура выбиралось в пределах 23—25 кВ.

Наряду со схемой, изображенной на рис. 1, была испытана схема с насыщающимся дросселем, который включался в цепь дугогасительной камеры (в этом случае дроссель L отсутствовал).

В ходе экспериментов осциллографировались ток в цепи вакуумной дугогасительной камеры и восстанавливающееся напряжение (рис. 3). Отключаемый ток определялся как ток, предшествующий моменту срабатывания гасящего контура. За предельный принимался ток, соответствующий 90% удачных отключений. Длительность коммутации определялась по осциллограммам с момента спада тока до момента достижения максимума восстанавливающегося напряжения. Результаты опытов сведены в таблицу.

Тип схемы	Емкость гасящего контура, мкф	Частота гасящего контура, кГц	Время коммутации, мксек	Предельный отключаемый ток, кА	Амплитуда восстанавливающегося напряжения, кВ
С линейным дросселем	16	8,3	120	6	23
	4	13,5	50	5,8	24
	2	30	22	4,4	25
	1	47,5	15	3,1	25
С насыщающимся дросселем	16		32	6,3	23
	4		22	6,1	25
	2		15	4,2	24

При отсутствии нагрузки (R_н=∞) напряжение могло восстанавливаться до весьма большой величины; в этом слу-

Рис. 2. Кривые тока и восстанавливающегося напряжения.

1 — при наличии линейного гасящего контура LC; 2 — при наличии гасящего контура с насыщающимся дросселем.

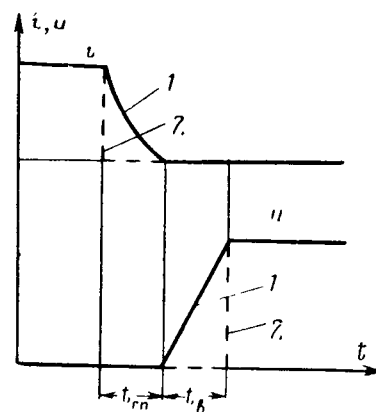
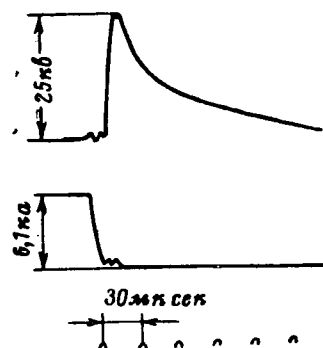


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока в цепи вакуумной дугогасительной камеры (гасящий контур с насыщающимся дросселем).



чае происходил пробой между контактами камеры при напряжении 35—46 кВ.

Из таблицы видно, что предельный отключаемый ток мало зависит от частоты гасящего контура в пределах 8—14 кГц; значительное уменьшение отключаемого тока происходило при частотах гасящего контура 30 кГц и более.

При заданной емкости конденсатора гасящего контура применение насыщающегося дросселя дает возможность некоторого увеличения отключаемого тока. Интересно, что при увеличении длительности коммутации до 500 мксек отключаемый ток повысился лишь до 7 кА.

На основе полученных данных может быть выбрана длительность коммутации и произведена оценка энергии, на которую должна быть рассчитана батарея конденсаторов гасящего контура. По-видимому, применение выключателя с гасящим контуром в цепи индуктивного накопителя целесообразно при условии, если энергия конденсаторов гасящего контура будет, по крайней мере, на порядок меньше энергии, запасенной в индуктивном накопителе. Из экспериментальных данных, приведенных в таблице, и соотношений (3)—(5) следует, что указанное условие для исследованного вакуумного выключателя будет соблюдаться, если длительность разряда индуктивного накопителя τ составляет сотни микросекунд и более.

$$\left(\text{Например, при } f_{\text{пред}} = 10 \text{ кГц } \frac{E_1}{E_0} = 0,1; \tau \geq \frac{1}{2\pi f_{\text{пред}} \frac{E_1}{E_0}} = 160 \text{ мксек.} \right)$$

Литература

1. Попов Н. А., Вакуумные выключатели, изд-во «Энергия», 1965.
2. Верещагин И. П., Анализ трансформаторной схемы индуктивного накопителя энергии, Труды МЭИ, вып. 45, «Электротехника», 1963.
3. Ивашин В. В. и Сипайлов Г. А., Бездуговое отключение больших токов, «Электротехника», 1964, № 9.

О РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПОМОЩЬЮ НЕНАПРАВЛЕННЫХ ГРАФОВ

(Статья О. М. Богатырева, «Электричество», 1969, № 4)

Канд. техн. наук С. Ф. ВОРОБЬЕВ

Свердловск

Во время бурного научно-технического прогресса трудно ожидать, что он не коснется такого установившегося раздела, как методы расчета электрических цепей. Примером этого является применение в теории цепей одного из разделов математики — теории графов.

Какие бы новые методы ни появлялись, целесообразность применения их должна быть тщательно проанализирована, прежде чем принять их или отвергнуть, полностью или частично. В этом смысле статья О. М. Богатырева [Л. 1] представляет определенный интерес, но, к сожалению, автор рассматривает только направленные графы.

В предлагаемой на обсуждение статье сделана попытка рассмотреть особенности ненаправленных графов и внести некоторую ясность в отношении их применения.

Топологический закон передачи. Рассмотрим упрощенный вывод топологического закона передачи, положенного в основу теории ненаправленных графов. На основании этого упрощенного вывода можно сделать оценку метода.

По методу контурных токов любой контурный ток может быть определен по формуле $I_{kk} = \Delta_{kk} / \Delta$, где Δ — определитель цепи, а Δ_{kk} — минор, полученный разложением определителя по элементам столбца k и строки k . Полагая в разложении все э. д. с., кроме одной, например E_1 , равными нулю, получим:

$$I_{k1} = E_1 \Delta_{k1} / \Delta.$$

Определитель Δ_{k1} , составленный из сопротивлений по методу контурных токов, заменим определителем, составленным из проводимостей по методу узловых потенциалов [Л. 2]: $\Delta(r) = \Delta(g) r_1 r_2 r_3 \dots r_n$, где $r_1 r_2 r_3 \dots r_n$ — произведение всех сопротивлений, входящих в рассматриваемую электрическую цепь. Следовательно,

$$I_{k1} = E_1 \Delta_{k1}(r) / \Delta(r) = E_1 \Delta_{k1}(r) / \Delta(g) r_1 r_2 \dots r_n,$$

откуда имеем:

$$I_{k1} / E_1 = \Delta_{k1}(r) / \Delta(g) r_1 r_2 r_3 \dots r_n. \quad (1)$$

Смысл правой части (1) выясним на простом примере, иллюстрирующем подход к расчету этим методом.

Пример. Дана трехконтурная схема с э. д. с. в первой ветви (рис. 1). Определить ток первой ветви. Находим минор:

$$\Delta_{11} = r_{22} r_{33} - r_{23} r_{32}, \quad (2)$$

где

$$r_{22} = r_2 + r_3 + r_4; \quad r_{33} = r_4 + r_5 + r_6; \quad r_{23} = r_{32} = \pm r_4.$$

Таким образом, выражения для минора Δ_{11} , следовательно, можно записать в виде:

$$\Delta_{11} = r_2 r_4 + r_3 r_4 + r_4^2 + r_2 r_5 + r_3 r_5 + r_4 r_5 + r_2 r_6 + r_3 r_6 +$$

$$+ r_4 r_6 - r_4^2;$$

$$\Delta_{11} / r_1 r_2 r_3 r_4 r_5 r_6 = g_1 g_2 g_5 g_6 + g_1 g_2 g_5 g_6 + g_1 g_3 g_4 g_6 + g_1 g_2 g_4 g_6 +$$

$$+ g_1 g_2 g_5 g_6 + g_1 g_3 g_4 g_5 + g_1 g_2 g_4 g_5 + g_1 g_2 g_5 g_6. \quad (3)$$

На рис. 2 указаны все пути тока от э. д. с. E_1 и их дополнения. Величина пути равна произведению проводимостей всех ветвей, входящих в путь. Дополнением пути является определитель графа, остающегося после закорачивания рассматриваемого пути. При закорачивании всех узлов определитель равен единице [Л. 3].

Сумму произведений величин всех путей на их дополнения получаем в виде выражения:

$$\Sigma P'_k \Delta'_k = g_1 g_2 g_5 (g_3 + g_4 + g_6) + g_1 g_3 g_6 (g_2 + g_4 + g_5) +$$

$$+ g_1 g_2 g_4 g_6 \cdot 1 + g_1 g_3 g_4 g_5 \cdot 1 = g_1 g_2 g_5 g_6 + g_1 g_2 g_4 g_5 + g_1 g_2 g_5 g_6 +$$

$$+ g_1 g_2 g_5 g_6 + g_1 g_3 g_4 g_6 + g_1 g_3 g_5 g_6 + g_1 g_2 g_4 g_6 + g_1 g_3 g_4 g_5. \quad (4)$$

Сравнивая (3) и (4), имеем

$$\Delta_{11} / r_1 r_2 r_3 r_4 r_5 r_6 = \Sigma P'_k \Delta'_k$$

и, следовательно,

$$I_{11} = E_1 \Sigma P'_k \Delta'_k / \Delta(g).$$

Так как ток каждой ветви можно сделать контурным, то, обобщая эту формулу на случай тока любой ветви, получим топологический закон передачи, предложенный Мэзоном [Л. 3].

В справедливости такого обобщения нетрудно убедиться для электрической цепи любой сложности. Более строгое обоснование топологического закона передачи дано в [Л. 3 и 4].

Рассмотрев топологический закон передачи, можно сделать следующие выводы.

Достоинства. 1. Топологический закон передачи позволяет, не составляя и не решая системы уравнений, определить для электрической цепи любой сложности при действии одной э. д. с. следующие величины:

все токи данной цепи;

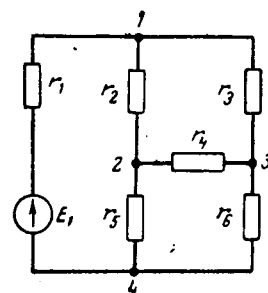


Рис. 1.

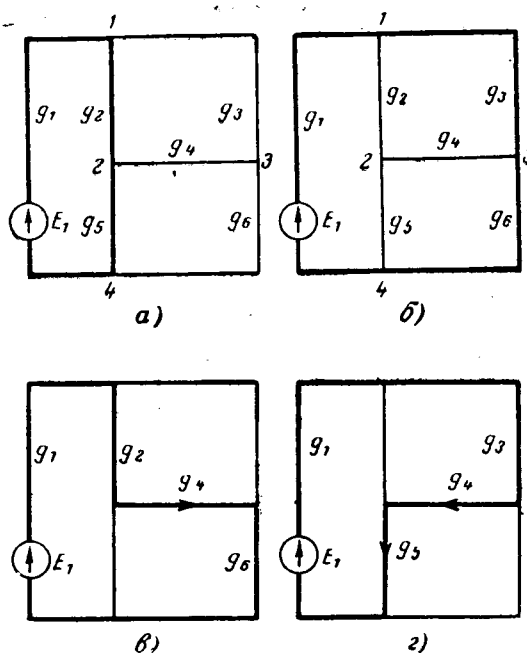


Рис. 2.

входные проводимости и входные сопротивления любой ветви;
взаимные проводимости и взаимные сопротивления любых пар ветвей;
коэффициент передачи по напряжению и току.

2. Исключение системы уравнений резко уменьшает объем вычислительной работы для сложных электрических цепей и, следовательно, уменьшает возможность ошибок, т. е. повышается надежность расчета, причем, чем сложнее схема цепи, тем преимущества проявляются больше.

3. Рассмотрение при расчете возможных путей тока вносит большую наглядность в расчеты, что также повышает надежность расчетов.

4. Топологический закон передачи позволяет получить более простым способом те же результаты, что и при известных методах: преобразования, контурных токов, узловых потенциалов, эквивалентного генератора (при неизменных сопротивлениях) и ряда других.

5. Применяя комплексные величины, топологический закон передачи можно применять и для расчета цепей переменного тока.

6. Вычисление главного определителя электрической цепи, входящего в топологический закон передачи, с помощью теории графов также упрощается за счет исключения работы по вычислению отрицательных членов.

Недостатки. 1. При наличии в цепи нескольких э. д. с., находящихся в разных ветвях, необходимо произвести расчет токов от каждой э. д. с. в отдельности и затем, применяя принцип наложения, найти результирующие токи в ветвях. В отличие от обычного метода наложения расчет можно производить частично, только для ветвей, в которых нужно найти токи.

2. При определении тока только в одной ветви, при переменном сопротивлении этой ветви, метод эквивалентного генератора имеет преимущество по сравнению с методом графов.

Укороченные способы вычисления главного определителя электрической цепи [Л. 3]. Теория графов дает несколько способов расчета определителя без вычисления отрицательных членов.

1. Суммирование деревьев в в. Деревом называется часть графа, содержащая все узлы, но ни одного контура. Величина дерева равна произведению проводимостей ветвей, входящих в дерево. Количество деревьев графа определяется двумя способами:

для симметричных графов, в которых имеются связи между всеми узлами, $n = y^{y-2}$, где y — число узлов графа;

при неполной симметрии или при отсутствии ее — с помощью определителя, содержащего количество ветвей в узлах и между узлами. Порядок определителя равен $y-1$. Для схемы с четырьмя узлами, например, имеем:

$$n = \begin{vmatrix} +b_{11} & -b_{12} & -b_{13} \\ -b_{21} & +b_{22} & -b_{23} \\ -b_{31} & -b_{32} & +b_{33} \end{vmatrix},$$

где b_{11} , b_{22} , b_{33} — количество ветвей, присоединенных соответственно к узлам 1, 2, 3; b_{12} , b_{23} , b_{31} — количество ветвей соответственно между узлами 1—2, 2—3, 3—1.

Расчет определителя суммированием деревьев целесообразно делать при полной симметрии для числа узлов, не превышающего трех, а при неполной симметрии — при большем числе узлов, например, при отсутствии перекрестных связей (для многоугольников) число узлов может доходить до 7—8.

2. Разложение определителя по путям любой пары узлов. Расчетная формула имеет вид: $\Delta(g) = \sum P_k \Delta_k$, где P_k — все пути между выбранной парой узлов, а Δ_k — дополнения, получающиеся при закорачивании рассматриваемого пути. Расчет показывает, что выгоднее выбирать пары узлов, к которым подходит большее число ветвей.

3. Разложение определителя по узлу. Запишем формулу разложения для узла с тремя ветвями:

$$\Delta = a\Delta_a + b\Delta_b + v\Delta_v + ab\Delta_{ab} + bv\Delta_{bv} + va\Delta_{va} + abv\Delta_{abv},$$

где Δ_a — определитель графа, остающегося после закорачивания ветви a и при исключении ветвей b и v ;

Δ_{ab} — определитель графа, получающегося после закорачивания ветвей ab и исключении ветви v .

При ином количестве ветвей формула может быть по аналогии расширена или укорочена.

Наиболее целесообразно разложение по узлу, от которого отходит меньше ветвей.

4. Разложение определителя по ветви. Расчетная формула имеет вид:

$$\Delta = \Delta_0 + x\Delta_x,$$

где Δ_0 — определитель графа, остающегося после исключения ветви, по которой производится разложение (опредетель холостого хода); Δ_x — определитель графа, получающегося при закорачивании ветви x , по которой производится разложение (опредетель короткого замыкания).

Если оставшийся граф оказался достаточно сложным, то разложение следует произвести повторно.

Сравнение способов вычисления определителя для цепной схемы, имеющей граф с четырьмя узлами, дано в табл. 1.

Таблица 1

Способ разложения	Количество величин	Объем вычислительной работы, %	Сложность
Обычное разложение	15	100	5
По путям (4 пути)	14	93,3	4
То же (3 пути)	11	73,3	1
По узлу (3 ветви)	14	93,3	4
То же (2 ветви)	11	73,3	1
По ветви (между узлами с 2 и 3 ветвями)	12	80	2
По ветви (между узлами с 3 ветвями)	13	86,6	3

Из табл. 1 видно, что наиболее целесообразно применять разложение по путям между узлами, к которым подходит большее число ветвей, и по узлу, к которому подходит меньшее число ветвей. Объем вычислительной работы меньше обычного на 26,7%, кроме того, сложность вычислений меньше, что повышает надежность расчета.

Результаты разложения определителя мостовой схемы даны в табл. 2.

Таблица 2

Способ разложения	Количество величин	Объем вычислительной работы, %	Сложность
Обычное	30	100	4
По путям (1—2, 1—4)	23	76,6	3
По узлу (внутреннему или наружному)	21	70,0	1
По ветвям (1—2, 1—4)	22	73,3	2

Для мостовой схемы наиболее целесообразно применять разложение по узлу, при этом работа по вычислению сокращается на 30%.

Сравнение расчета определителя обычным путем и с помощью теории графов для полностью симметричных графов дано в табл. 3.

Таблица 3

Способ вычисления	2 узла	3 узла	4 узла	5 узлов	6 узлов
Обычный, %	100	100	100	100	100
Методом графов, %	100	83,3	70	64,1	(58)
Уменьшение вычислений, %	0	16,7	30	36,9	(42)

Оценка расчета определителя. 1. Расчет определителя с помощью теории графов целесообразнее, чем обыч-

ным способом, не говоря уже о том, что сложность вычислений при этом меньше.

2. Наиболее целесообразно производить расчет определителя разложением по узлу.

3. Если нужен главный определитель для сопротивлений, то его легко получить из определителя для проводимостей пересчетом $\Delta(r) = \Delta(g)r_1 r_2 r_3 \dots r_n$.

4. Расчет определителя методом графов целесообразно применять и для цепей, не связанных с теорией графов.

Литература

1. Богатырев О. М., О расчете цепей методом графов, «Электричество», 1969, № 4.
2. Сешу С. и Балабанян Н., Анализ линейных цепей, Госэнергоиздат, 1963.
3. Мэзон С. и Циммерман Г., Электрические цепи, сигналы и системы, Изд-во иностр. лит., 1963.
4. Робинсо Л. и др., Направленные графы и их применение к электрическим цепям и машинам, изд-во «Энергия», 1964.

ОТВЕТ АВТОРА¹

Поступающие в редакцию журнала «Электричество» статьи по затронутому вопросу, а также письма в мой адрес показывают, что многие читатели неправильно поняли мою статью, а может быть, находясь под впечатлением модной теории графов, не видят простоты алгебраического решения. Считают, что я должен окончательное выражение привести к общему знаменателю, раскрыть скобки, уничтожить большое количество разнозначных членов и привести выражение к «оптимальному» виду, хотя число операций (умножений и сложений) для вычисления этого выражения стало больше, чем было первоначально. Думают о каком-то анализе этого выражения, в которое часто проводимости входят в операционном виде.

Что же мы имеем в действительности? Подавляющее большинство задач расчета электрических цепей сводится к решению двух, трех или четырех полных уравнений Кирхгофа, написанных тем или иным способом. Случаи многих неполных уравнений, как показано в [Л. 2], легко сводятся к трем уравнениям, а случай пяти полных уравнений можно рассмотреть особо, выведя для него наилучшие формулы.

Итак, неужели для решения указанных систем уравнений нужна какая-то новая теория графов?

Рассмотрим по порядку решения двух, трех и четырех полных уравнений в общем виде. Решение двух уравнений проводится элементарно, без алгебраических действий, непосредственно по формулам определителей. Решение трех уравнений также достаточно просто делается по готовым формулам, полученным разумным раскрытием определителей. Так, уравнения вида

$$a_1 x + a_2 y + a_3 z = A;$$

$$b_1 x + b_2 y + b_3 z = B;$$

$$c_1 x + c_2 y + c_3 z = C$$

дают решение:

$$x = \frac{\Delta x}{\Delta} = \frac{A\Delta_a - B\Delta_b + C\Delta_c}{a_1\Delta_a - b_1\Delta_b + c_1\Delta_c},$$

где $\Delta_a = b_2 c_3 - b_3 c_2$; $\Delta_b = a_2 c_3 - a_3 c_2$; $\Delta_c = a_2 b_3 - a_3 b_2$. Для y и z решения получаются автоматическим круговой заменой индексов у коэффициентов a, b, c в выражениях для $\Delta_a, \Delta_b, \Delta_c$ только в числителе.

В случае четырех полных уравнений вида

$$a_1 x + a_2 y + a_3 z + a_4 u = A;$$

$$b_1 x + b_2 y + b_3 z + b_4 u = B \text{ и т. д.}$$

решение может быть найдено по формулам:

$$x = \frac{K_1 n_2 - K_2 n_1}{\Delta_2}; \quad y = \frac{K_2 m_1 - K_1 m_2}{\Delta_2}.$$

Здесь вычисляются следующие величины:

$$\Delta_1 = a_3 b_4 - a_4 b_3; \quad f_1 = b_1 a_4 - a_1 b_4; \quad g_1 = b_2 a_4 - a_2 b_4;$$

$$H_1 = a b_4 - B a_4; \quad f_2 = b_3 a_1 - a_3 b_1; \quad g_2 = b_3 a_2 - a_3 a_3; \quad H_2 = B a_3 - A b_3.$$

¹ Редакция публикует только часть из присланных О. М. Богатыревым замечаний и примеров, подтверждающих его точку зрения. В [Л. 1] замечены следующие опечатки: на стр. 89 вместо (1-а) напечатано (1+а); на стр. 90 перед выражением $\left(\mu' + \frac{\mu}{2}\right)$ μ_{xx} отсутствует знак минус и вместо R_a напечатано r_a .

Затем через найденные величины вычисляются те, которые входят в формулы для x и y

$$m_1 = c_1 + \frac{1}{\Delta_1} (c_3 f_1 + c_4 f_2); \quad n_1 = c_2 + \frac{1}{\Delta_1} (c_3 g_1 + c_4 g_2);$$

$$K_1 = C - \frac{1}{\Delta_1} (c_3 H_1 + c_4 H_2);$$

$$m_2 = d_1 + \frac{1}{\Delta_1} (d_3 f_1 + d_4 f_2); \quad n_2 = d_2 + \frac{1}{\Delta_1} (d_3 g_1 + d_4 g_2);$$

$$K_2 = D - \frac{1}{\Delta_1} (d_3 H_1 + d_4 H_2); \quad \Delta_2 = m_1 n_2 - n_1 m_2.$$

Для получения других неизвестных проще всего подставить найденные x и y в два самых простых из четырех уравнений и решить их относительно неизвестных z и u . Нетрудно подсчитать число операций (возьмем только умножения и деления) для вычисления двух неизвестных x и y . В предлагаемом способе их 40. Если же раскрывать определители четвертого порядка, то действий будет 144.

Метод графов по утверждению сторонников этого метода дает, якобы, более простое решение указанных задач потому, что, обходя граф по определенным правилам, рисуя или воображая разные подграфы, можно получить окончательное выражение для искомого неизвестного через исходные данные более просто, чем алгебраическим решением уравнений. Но зачем нужно такое выражение через первоначальные исходные данные, если оно очень длинное? Все равно для вычислений оно трудоемко, а для анализа в общем виде тоже ничего не дает. Поэтому алгебраическое решение, представленное через промежуточные величины, будет проще и легче и для подсчета и для анализа.

Все те восемь примеров, которые приведены в [Л. 1], представляют собой системы из двух или трех уравнений. Алгебраическое решение их получается в менее компактном виде, чем решение с помощью графов, но зато оно проще, так как число вычислительных операций в нем меньше, чем в «компактном» выражении. Если же система описывается большим числом уравнений, то решение методом графов дает такое длинное выражение, что его не только анализировать, но и вычислять громоздко и трудно.

Таким образом, не видно даже, где бы метод графов мог конкурировать с рациональным алгебраическим методом. В доказательство вышесказанного рассмотрим несколько примеров из [Л. 1].

Пример 1. Оценим точно весь объем вычислений для решения этого примера. Составляем уравнения методом узловых напряжений, что проще, чем чертить граф [см. уравнения (1.1)–(1.4)]. Выражаем U_1 и U_2 из (1.2) и (1.3) через U_3 и U_m и получаем два уравнения:

$$U_3 \left[\underbrace{c + d + g - \frac{c^2}{g_{acf}} - \frac{d^2}{g_{bde}}}_M \right] - U_m \left[\underbrace{\frac{ac}{g_{acf}} + \frac{bd}{g_{bde}}}_N \right] = 0;$$

$$- U_3 \left[\underbrace{\frac{ac}{g_{acf}} + \frac{bd}{g_{bde}}}_N \right] + U_m \left[\underbrace{a + b - \frac{a^2}{g_{acf}} - \frac{b^2}{g_{bde}}}_Q \right] = I_{sx}.$$

По этим уравнениям сразу пишем ответ:

$$U_3 = \frac{NI_{\text{вх}}}{MQ - N^2} = \frac{I_{\text{вх}}x}{g}$$

Что же может быть проще и легче. Зачем здесь применять графы? Полученное выражение содержит 13 сложений и 15 умножений.

Решение этого же примера с помощью графов дает следующие результаты (рассмотрим три способа).

1. Используя граф Коутса, по формуле Коутса — Де-зауэра получаем

$$\frac{I_{\text{вх}}x}{I_{\text{вх}}} = \frac{(acg_{bde} - g_{afe}g_{bde}(c+d+g)(a+b) - g_{afe}(c+d+g)^2b - bdg_{afe})g}{-(a+b)d^2g_{afe} - (a+b)c^2g_{bde} - (c+d+g)a^2g_{bde} - 2abcd}$$

В этом выражении имеем 13 сложений и 24 умножения.

2. Используя граф Мэзона (с вычерчиванием или запоминанием 13 подграфов), получаем следующий ответ:

$$\frac{I_{\text{вх}}x}{I_{\text{вх}}} = \frac{acg(b+d+e) + ab[(c+d)(e+f+g) + (e+f)g] + cd(a+b)(e+f+g) + bdg(a+c+f) + ef(a+b)(c+d+g) + ceg(a+b) + dfg(a+b)}{+ef(a+b)(c+d+g) + ceg(a+b) + dfg(a+b)}$$

в котором содержится 15 сложений и 23 умножения.

3. Наконец, по топологической формуле Мэзона

$$K_I = \frac{\Sigma p'_k \Delta'_k}{\Delta} = \frac{(acg_{bde} + acde + bdgg_{afe} + bdcf + bdg_{afe})g}{+af[(c+g)g_{bde} + d(b+e)] + be[(d+g)g_{afe} + c(a+f)]}$$

получаем 16 сложений и 24 умножения.

По-моему, совершенно очевидно, что алгебраическое решение значительно легче и проще, а выражения в последних двух случаях вовсе не являются оптимальными.

Пример 2. Составляются четыре элементарных уравнения (2.1) — (2.5), которые очень просто приводятся к двум уравнениям:

$$U_m \left[\underbrace{a+d+f}_{N} - \underbrace{\frac{a^2}{a+c} - \frac{d^2}{b+d}}_{M} \right] + I \left[\underbrace{\frac{a}{a+c} - \frac{d}{b+d}}_{M} \right] = I_{\text{вх}};$$

$$U_m \left[\underbrace{\frac{a}{a+c} - \frac{d}{b+d}}_{M} \right] e - I \left[\underbrace{\frac{e}{a+c} + \frac{e}{b+d} + 1}_{P} \right] = 0.$$

Отсюда сразу пишем

$$I = \frac{I_{\text{вх}}Me}{NP + M^2e}.$$

Здесь имеем 9 сложений и 10 умножений.

Решение с помощью топологической формулы Мэзона при вспомогательных 9 подграфах приведено в [Л. 1]. Оно содер-

жит 12 сложений и 16 умножений и опять-таки вовсе не является оптимальным.

Пример 5. Этот пример имеет только одно уравнение узлового напряжения U_1 , а вовсе не два каких-то громоздких уравнения, как пишет В. Т. Долбня [Л. 3]. Далее, произведя в этом уравнении замену:

$$\mu_1 g_{i_1} = S_1; \quad \mu_2 g_{i_2} = S_2; \quad u_{C1} = U_1 + \Delta u_1; \quad u_{C2} = U_1,$$

получим сразу выражение для U_1 . Затем по закону Ома для ветви выражается ток Δi_3 , что и показано в [Л. 1].

Решение методом графов будет, конечно, тоже простое, потому что сама схема несложная (одно уравнение). Но для этого надо еще применить схему замещения лампы в графе (т. е. вторичную искусственную схему замещения).

Пример 6. Почему-то считают, что этот пример с помощью графов и теорем деления решается проще, чем алгебраическим методом. Приведу мое решение в полном виде, не выпуская никаких промежуточных действий.

1. Записываем уравнения (6.1) — (6.3).

2. Выражаем напряжения $(u_n - u_{K1})$ и $(u_m - u_{K2})$ через токи i_1 и i_2 , как это и сделано в [Л. 1].

3. После подстановки и группировки подобных членов, которые не требуют никаких усилий или дополнительных знаний, получаем два уравнения:

$$i_1 \underbrace{[R_I + \mu'(R_I + r_k) + \mu R_k]}_{R_2} + i_2 \underbrace{[R_k - \mu'R_k + \mu R_k]}_{R_3} + i_{\text{вх}} R_a = \left(\mu\mu' + \frac{\mu}{2} \right) u_{\text{вх}};$$

$$i_2 \underbrace{[R_I + \mu'(R_I + r_k) + \mu R_k]}_{R_2} + i_1 \underbrace{[R_k - \mu'R_k + \mu R_k]}_{R_3} - i_{\text{вх}} R_a = - \left(\mu\mu' + \frac{\mu}{2} \right) u_{\text{вх}}.$$

Симметрия схемы автоматически проявилась в этих уравнениях.

Поэтому, вычитая второе уравнение из первого, найдем:

$$(i_1 - i_2)(R_2 - R_3) + 2i_{\text{вх}} R_a = \mu(2\mu' + 1)u_{\text{вх}},$$

$$(i_1 - i_2)R_a + i_{\text{вх}}(2R_a + R_{\text{вх}}) = 0.$$

Из последних двух уравнений пишем сразу ответ:

$$i_{\text{вх}} R_{\text{вх}} = \frac{-\mu(2\mu' + 1)R_a R_{\text{вх}} u_{\text{вх}}}{(R_2 - R_3)(2R_a + R_{\text{вх}}) - 2R_a^2}.$$

Литература

1. Богатырев О. М., О расчете цепей с помощью графов, «Электричество», 1969, № 4.
2. Богатырев О. М., Элементарная методика расчета линейных электрических цепей, «Электричество», 1953, № 4.
3. Долбня В. Т., В защиту метода графов, «Электричество», 1970, № 1.

О. М. Богатырев



ОТ РЕДАКЦИИ

Редакция считает полезным состоявшийся обмен мнениями по методам расчета линейных электрических цепей. К сожалению, участники дискуссии недостаточно осветили вопрос о наиболее целесообразных областях применения различных методов расчета, в частности, удобство использования того или иного метода для сложных цепей, расчет которых должен выполняться с помощью ЦВМ. Поэтому дискуссия на эту тему может быть продолжена.

К определению нормальной составляющей напряженности поля на поверхности цилиндра

Ю. С. РУСИН

Ленинград

При решении целого ряда электротехнических задач (определение емкости, индуктивности и т. д.) прибегают к различного рода идеализации геометрии исходной системы. Обычно стремятся свести задачу к расчету плоских или осесимметричных моделей, для которых наиболее хорошо разработан математический аппарат исследования.

В статье устанавливается приближенная аналитическая связь между нормальными составляющими напряженности поля для плоской и осесимметричной систем, имеющих аналогичные граничные условия в плоскости симметрии.

Пусть имеется бесконечный цилиндр радиуса R (ось z цилиндрической системы координат совпадает с осью цилиндра). Потенциал на поверхности цилиндра ($\rho=R$) задан:

$$U(\rho=R, z) = U_0(z).$$

В случае аналогичной плоской задачи (прямоугольную систему координат для удобства обозначим также через ρ, z) будем иметь:

$$U(\rho=0, z) = U_0(z).$$

Решение для обеих задач может быть записано в виде:

$$U_a(\rho, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty F(\lambda) K_1(\lambda \rho) \cos \lambda z d\lambda;$$

$$U_n(\rho, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty f(\lambda) e^{-\rho \lambda} \cos \lambda z d\lambda,$$

где U_a и U_n — потенциал аксиального и плоского полей;

$F(\lambda)$ и $f(\lambda)$ — неизвестные функции параметра разделения λ .

В соответствии с граничными условиями для обоих случаев будем иметь:

$$\text{при } \rho=R \quad U_a(\rho=R, z) = U_0(z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty F(\lambda) K_1(\lambda R) \cos \lambda z d\lambda;$$

$$\text{при } \rho=0 \quad U_n(\rho=0, z) = U_0(z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty f(\lambda) \cos \lambda z d\lambda;$$

откуда

$$F(\lambda) = f(\lambda).$$

Тогда с учетом того, что при $\rho \approx R$:

$$\frac{K_1(\lambda \rho)}{K_1(\lambda R)} \approx \sqrt{\frac{R}{\rho}} e^{-\lambda(\rho-R)},$$

будем иметь в зоне, близкой к рассматриваемой поверхности¹:

¹ Иосель Ю. Л., Кочанов Э. С. и Струнский М. Г., Вопросы расчета и моделирования электрохимической антикоррозийной защиты судов, изд-во «Судостроение», 1965.

$$U_n(\rho, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty f(\lambda) e^{-\rho \lambda} \cos \lambda z d\lambda, \quad \rho \approx 0;$$

$$U_a(\rho, z) \approx \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \sqrt{\frac{R}{\rho}} f(\lambda) e^{-(\rho-R)\lambda} \cos \lambda z d\lambda, \quad \rho \approx R.$$

Соответственно величины напряженностей поля на поверхностях $\rho=0$ и $\rho=R$ определяются выражениями (промежуточные преобразования опускаем):

$$E_{np}|_{\rho=0} = -\frac{\partial U_n}{\partial \rho} \Big|_{\rho=0} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \lambda f(\lambda) \cos \lambda z d\lambda;$$

$$E_{ap}|_{\rho=R} = -\frac{\partial U_a}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R} \approx \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \lambda f(\lambda) \cos \lambda z d\lambda + \frac{U_0(z)}{2R} = E_{np}|_{\rho=0} + \frac{U_0(z)}{2R}.$$

Таким образом, решение сложной задачи удалось свести к более простому решению. Необходимо заметить, что полученному соотношению удовлетворяют и многие другие конфигурации электродов. Например, все электроды, поверхности которых суть эллипсоидальные и эллиптические координаты, два одноименно заряженных провода и кольцо и др.

Пример. Дано распределение потенциала по цилиндру радиуса R :

при $\rho=R, |z| < a \quad U_a = U_0;$

при $\rho=R, |z| > a \quad U_a = 0.$

Решение для аналогичной плоской задачи, т. е. при $\rho=0, |z| < a, U_n = U_0; \rho=0, |z| > a, U_n = 0$ будет иметь вид (может быть получено, например, с помощью интеграла Пуассона):

$$E_{np} = 2U_0 a [\pi(a^2 - z^2)]^{-1}, \quad |z| < a;$$

$$E_{np} = -2U_0 a [\pi(z^2 - a^2)]^{-1}, \quad |z| > a.$$

В соответствии с выведенным в статье соотношением получим решения:

$$E_{ap} \approx 2U_0 a [\pi(a^2 - z^2)]^{-1} + \frac{U_0}{2R} \quad \text{при } |z| < a;$$

$$E_{ap} \approx -2U_0 a [\pi(z^2 - a^2)]^{-1} \quad \text{при } |z| > a,$$

что совпадает с данными, приведенными в книге Ю. И. Иоселя, Э. С. Кочанова и М. Г. Струнского.

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

В практике производства измерений сопротивления пола (как элемента цепи), напряжений прикосновения и в других случаях, когда необходима имитация ступней ног человека, например при расследовании случаев поражения электрическим током, применяется укладка на пол медной пластины площадью, равной площади двух ступней человека.

Ряд авторов в своих работах приводят различные данные измерений сопротивлений для одних и тех же видов полов.

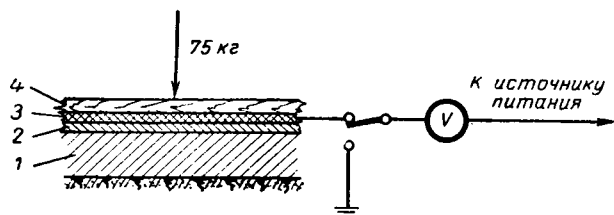


Схема измерения сопротивления пола.

1 — пол; 2 — влажное сукно 26×26 см; 3 — металлическая пластина 25×25×0,2 см; 4 — деревянная плита 25×25 см.

Объективное сравнение этих данных невозможно, так как в СССР для указанных измерений нет единой стандартной методики: размеров пластин; способа осуществления контакта металлической пластины с поверхностью пола; давления на пластину и метода создания его.

Для осуществления подобных измерений использовались пластины размером: 24×24; 25×25 и 26×26 см. Давление на пластину применялось 75—80 кг. Для создания контакта ме-

таллической пластины с поверхностью пола также предлагались различные решения. Измерения проводились непосредственно с увлажнением пола под пластиной, с применением полупроводящих материалов и с применением увлажненной ткани.

Насколько влияют указанные выше факторы, можно видеть из результатов измерений сопротивлений пола, выполненных автором (см. таблицу). Как видно из таблицы, разница в способе измерения особенно резко сказывается при сухих цементных полах.

Вид пола	Сопротивление пола при различном контакте между пластиной и полом, ком	
	Непосредственный контакт	Через влажную ткань
Пластикат	2 700	1 460
Цементный на бетонной плите	2 100	9,7
Цементный	280	40
Цементные плиты	4,5	1,15
Метлахская плитка	1 740	526

Представляется целесообразным принять в Советском Союзе единый метод, принятый в нормах VDE и предложениях ГДР по унификации защитных мер в странах, входящих в СЭВ (см. рисунок).

Канд. техн. наук М. Р. Найфельд,
инж. Ю. М. Курпьянович



НОВЫЕ КНИГИ

издательства «ЭНЕРГИЯ»

Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. 1970. 416 с. 1 р. 53 к.

Кацнельсон О. Г., Эдельштейн А. С. Автоматические измерительные приборы с магнитной подвеской. 1970. 216 с. 82 к.

Николаев Ю. А. и др. Динамика цифровых следящих систем. 1970. 496 с. 1 р. 54 к.

Орлов Д. В. Электромагниты с замедлением. 1970. 96 с. 28 к.

Ткалин И. М. и др. Технология производства электроизмерительных приборов. 1970. 356 с. 1 р. 30 к.

Устинов П. И. Стационарные аккумуляторные установки. 1970. 312 с. 1 р. 03 к.

Эйгенброт В. М. Преобразователи рода энергии сигналов в системах автоматического управления. 1970. 272 с. 80 к.

БИБЛИОТЕКА ПО АВТОМАТИКЕ

Махнанов В. Д., Милохин Н. Т. Устройства частотного и время-импульсного преобразования. 1970. 128 с. 44 к. Вып. 378.

Пересада В. П. Автоматическое распознавание образов. 1970. 92 с. 30 к. Вып. 392.

Полоник В. С. Телевизионная автоматика. 1970. 80 с. 31 к. Вып. 386.

Потапов А. М. Настройка и испытания следящих приводов. 1970. 104 с. 43 к. Вып. 387.

Райцин Т. М. Синтез систем автоматического управления методом направленных графов. 1970. 96 с. 29 к. Вып. 391.

Степанов И. М., Электрохимическая запись. 1970. 96 с. 32 к. Вып. 375.

О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Быстро развивающаяся советская энергетика ставит перед наукой и производством целый ряд научно-технических проблем, в решении которых активную помощь оказывают ученые, инженеры, техники и рабочие-новаторы производства, объединяемые Научно-техническим обществом энергетики и электротехнической промышленности.

У истоков современных научно-технических обществ стоял В. И. Ленин.

В 1918 г. по его указанию и инициативе Л. В. Красина и А. В. Винтера был создан Центральный электротехнический совет (ЦЭС), объединивший лучшую часть энергетической общественности. Представители ЦЭС приняли самое деятельное участие в разработке плана ГОЭЛРО, способствовали дальнейшему развитию народного хозяйства страны на базе электрификации.

В настоящее время Общество насчитывает около 195 тыс. действительных членов, состоящих в 90 республиканских, краевых и областных правлениях и в 3000 первичных организациях.

В организациях Общества действуют более 6000 творческих бригад, около 3000 общественно-технических бюро и групп экономического анализа.

При Центральном правлении организовано 28 научно-технических секций, которые проводят работу в соответствии со своей специальностью. Секции возглавляются обычно ведущими научными работниками и специалистами.

Основная задача Научно-технического общества заключается в содействии развитию творческой инициативы ученых, инженеров, техников и новаторов производства в разработке вопросов, связанных с развитием энергетики и электротехники.

Члены Общества оказывают практическую помощь предприятиям и организациям Министерств в осуществлении технической политики, в разработке и выполнении планов научно-исследовательских работ, способствуют проведению широкой пропаганды достижений науки и техники.

Первичные организации общества на производстве занимаются вопросами прогрессивной технологии, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, повышения качества изделий, улучшения экономики производства, научной организации труда и совершенствования системы планирования.

Начиная с 1962 г., Общество совместно с Министерствами энергетики и электротехнической промышленности проводит общественные смотры выполнения планов научно-исследовательских работ и внедрения достижений науки и техники в народное хозяйство.

Обсуждая вопросы технического прогресса в энергетике и электротехнической промышленности, научная энергетическая общественность вырабатывает рекомендации, способствующие дальнейшему развитию этих отраслей.

Основным в работе Общества является научно-техническая деятельность в форме проведения научно-технических совещаний и конференций по проблемам энергетического строительства, технического прогресса в энергетике и электротехнической промышленности, повышения уровня эксплуатации энергохозяйства, содействия электрификации сельского хозяйства и отраслевой экономики.

За последние два года Центральным правлением, республиканскими и краевыми обществами были проведены Всесоюзные совещания по весьма актуальной тематике:

- проблеме топливно-энергетического баланса СССР;
- качеству напряжения и его регулированию в сетях и энергосистемах;
- развитию теплофикации;
- применению электронно-вычислительных машин для исследований режимов энергосистем;
- рациональному использованию электроэнергии в промышленности;

- освоению проектных показателей мощных энергоблоков; высоковольтным силовым кабелям;
- вопросам устойчивости и надежности энергосистем;
- передаче энергии постоянным током;
- гидроаккумулирующим станциям.

В ноябре этого года будет проведено Всесоюзное совещание, посвященное совершенствованию энергоблоков 300 Мвт.

В апреле 1969 г. Президиум Общества совместно с Бюро отделения физико-технических проблем энергетики Академии наук рассмотрели вопросы развития энергетики и электрификации Узбекской ССР и республик Средней Азии.

По всем этим совещаниям разработаны конкретные рекомендации, которые сейчас реализуются.

Активно работает секция электрификации сельского хозяйства, поскольку потребление электроэнергии в сельскохозяйственном производстве должно значительно возрасти.

В настоящее время сельское хозяйство, как правило, получает электрооборудование общепромышленного значения, не приспособленное для работы в сельских условиях. Частые аварии в сетях и вывод из строя электрооборудования объясняется также недостатком квалифицированных кадров в эксплуатации электросетей и низким качеством электрооборудования на селе.

Общество постоянно уделяет внимание электрификации сельского хозяйства, в том числе и подготовке кадров сельских электрификаторов.

В последнее время Общество стало больше уделять внимания вопросу электрификации быта населения.

Электрификация быта городского и сельского населения привлекает наше внимание с точки зрения создания промышленности электробытового оборудования, проведения широкого исследования эксплуатации приборов и оборудования, особенно для сельского населения.

Более направленно специалисты общества начали заниматься проблемами строительства атомных электростанций. В октябре 1969 г. было проведено научно-техническое совещание «Состояние и перспективы проектирования парогенераторов АЭС с водоводяными реакторами», на котором обсуждались вопросы расчета, конструирования и изготовления парогенераторов АЭС, а также экспериментального исследования и опыта эксплуатации.

В октябре Пленум Центрального правления рассмотрел проблемы развития энергетики, электротехнической промышленности в новом пятилетии 1971—1975 гг. Были заслушаны доклады Министерств и намечены мероприятия общественности, которые должны будут способствовать выполнению этих планов.

Главное в работе Общества — широкая и многогранная деятельность первичных организаций; именно здесь получают путевку в жизнь все решения, связанные с разработкой и внедрением новой техники.

Для всестороннего решения проблем производства Советы НТОЭП и ЭП первичных организаций используют различные формы и методы общественной деятельности.

Большое место в их работе занимает общественное обсуждение результатов научных исследований, проектов, новых технологических процессов, конструкций машин и аппаратов, вопросы эксплуатации энергетических блоков. Многие первичные организации выполняют функции технических советов предприятий.

Так, например, на Славянской ГРЭС обсуждались первые итоги опытно-наладочной и опытно-промышленной эксплуатации двухвалового энергоблока 800 *квт*. Совет первичной организации ЛО «Теплоэлектропроект» обсуждал проектное задание Северной ТЭЦ Ленинграда. В результате обсуждения задания были приняты предложения, позволившие внести в проект существенные коррективы, на основе которых разработан новый вариант проектного задания, что дало возможность значительно снизить стоимость станции.

В сферу деятельности общественных бюро экономического анализа входит изыскание и использование резервов снижения себестоимости продукции, повышения производительности труда и рентабельности производства.

Заслуживает внимания опыт работы общественной лаборатории Дарницкой ТЭЦ, в которой помимо работников станции принимают участие члены НТОЭ и ЭП теплоэнергетического факультета Киевского политехнического института. В работе участвует около 40 членов общества. Результаты некоторых работ используются в качестве материалов для научных диссертаций. Разработанные в лаборатории рекомендации внедряются в производство, и по некоторым из них Дарницкая ТЭЦ уже получила значительный экономический эффект.

В первичных организациях успешно работают Советы НОТ. Так, при первичной организации ЮО ОРГРЭС в план мероприятий НОТ на 1969 г. включено 19 пунктов, в том числе: организация учебы и стажировки техников и лаборантов цеха по настройке и обслуживанию типовых приборов и аппаратуры.

Первичная организация Московского энергетического института проводит большую работу со студентами. Около 4000 студентов под руководством Совета НТОЭ и ЭП ведут научно-исследовательскую работу. Большое место уделяется повышению научно-технического уровня членов общества — проведению лекций, докладов, семинаров.

Большинство первичных организаций широко используют печать для научно-технической пропаганды; выпускаются сборники по обмену опытом и технические бюллетени, используются заводские многотиражки.

Совет первичной организации «Ленгидропроект» регулярно выпускает Технический листок «Новости техники», ежегодно ко Дню энергетика организует выставку. В некоторых первичных организациях регулярно проводятся просмотры технических фильмов.

Участвуя во всенародном движении за достойную встречу 100-летия со дня рождения В. И. Ленина, Центральное и местные правления, Советы первичных организаций взяли творческие обязательства и значительно активизировали свою деятельность в направлении, способствующем ускорению технического прогресса в энергетике и электротехнической промышленности. Члены Общества обязались на основе внедрения рекомендаций и предложений, разработанных в коллективах, дать народному хозяйству не менее 90 млн. руб. экономии. Эти обязательства успешно выполняются. В ходе подготовки к славному юбилею организации общества уделяют большое внимание совершенствованию производства, разработке и внедрению новой техники.

Так, в обязательствах ЛЭО «Электросила» намечены конкретные мероприятия по оказанию помощи в изготовлении нагрузочного турбогенератора мощностью 1 000 000 *квт*, по разработке гидрогенераторов для Саяно-Шушенской ГЭС мощностью 640 тыс. *квт*.

Члены НТОЭ и ЭП Свердловского отделения института «Энергосетьстрой» способствовали заводу в эксплуатации объектов сетевого строительства нефтяных и газовых месторождений Тюменской области, а также устройства Тюменского энергоузла в связи с включением ЛЭП Тюмень — Сургут.

Многие первичные организации Общества, в том числе заводов «Динамо» им. С. М. Кирова и Владимира Ильича, приняли дополнительные творческие обязательства.

В последнее время значительно расширилась пропаганда ленинских идей. Членами НТОЭ и ЭП читаются доклады на темы: «Ленин и научная организация труда», «Ленин и производительность труда» и др.

Энергетическая общественность будет всемерно принимать активное участие в быстрейшем вводе и освоении мощных электростанций, линий электропередачи, создании надежных машин и аппаратов, чтобы достойно встретить 100-летие со дня рождения Владимира Ильича Ленина.

Председатель НТОЭ и ЭП Н. Н. Ковалев,

Ученый секретарь А. С. Михайлов



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. В. Афанасьев, А. И. Бертинов, В. Г. Бирюков, В. А. Веников, И. С. Ефремов, Л. А. Жекулин, Д. Г. Жимерин, А. М. Залесский, П. М. Ипатов, М. П. Костенко, Л. Г. Мамиконянц (зам. главного редактора), Л. Р. Нейман, И. И. Петров, С. И. Рабинович, Д. В. Разевиг (главный редактор), А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов.

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. 2/10. Телефон 294-24-80.

Почтовый адрес: Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648.

Адрес для телеграмм: МОСКВА, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

СОДЕРЖАНИЕ

Г. В. Алексенко — Состояние и перспективы развития электроэнергетики и электропромышленности	1	ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
В. Г. Бирюков — В. И. Ленин и электротехническая наука	10	М. И. Мантров — Расчет напряжения теплового пробоя твердого диэлектрика	74
В. И. Дикушин, В. Г. Зусман и В. А. Найдис — Электрификация и автоматизация в станкостроении за годы Советской власти	15	СООБЩЕНИЯ	
В. В. Афанасьев и Л. К. Грейнер — Новые направления в развитии аппаратов высокого напряжения	22	Э. М. Шнейерсон — Анализ устройств с кольцевыми фазочувствительными схемами	77
В. А. Веников, Б. И. Головицын, В. Д. Ковалев, И. С. Рокотян и Д. А. Федоров — Анализ погрешности при решении с помощью ЦВМ задач оптимального распределения нагрузок	29	А. И. Бодякшин — Магнитная система без стали для создания приближенно равномерного магнитного поля	79
Ю. И. Каринский — Статистический расчет торможения токовых дифференциальных защит многоконцевых электроустановок	36	А. П. Саврухин — Прибор для измерения времени выключения тиристорov	80
И. А. Зборовский и В. Г. Накрохин — О регулировании возбуждения крупных синхронных двигателей	40	В. Н. Гурницкий и Л. П. Бычков — Расчет магнитных цепей электромагнитов постоянного тока методом относительных единиц	82
Р. С. Бабис и Н. Н. Хубларов — Проектная оптимизация трансформаторов на ЦВМ	43	А. В. Реймерс, А. А. Цветкова, Ю. П. Иванов и В. П. Жильцов — Коммутация цепи индуктивного накопителя энергии с помощью вакуумного выключателя	84
И. И. Талалов, В. К. Мишуков, А. П. Горшков и Ю. Я. Щелыкалов — Уточненный расчет частотных и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин	47	ДИСКУССИИ	
Е. Г. Орлов и И. В. Булин-Соколов — Установившиеся процессы в импульсной системе регулирования электрических машин	54	О расчете электрических цепей с помощью ненаправленных графов — С. Ф. Воробьев. Ответ автора — О. М. Богатырев	86
С. Я. Березин — Графо-аналитический метод построения амплитудно-фазовых характеристик систем автоматического управления и стабилизации	57	ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
А. Н. Чернышев, В. Л. Грушко и М. Л. Прудков — О демпфировании упругих колебаний автоматизированного электропривода постоянного тока	61	К определению нормальной составляющей напряженности поля на поверхности цилиндра	90
А. М. Рывкин — Искрение главных контактов коммутационных аппаратов	67	Письмо в редакцию	91
Д. А. Попов — Сравнительная оценка статических преобразователей постоянного тока в трехфазный переменный на транзисторах, работающих в ключевом режиме	69	ХРОНИКА	
		О деятельности Научно-технического общества энергетики и электротехнической промышленности	92



CONTENTS

The Present State and Future Prospects for the Power Production and Electrical Manufacturing Industries — G. V. Alexenko	1	Sparkling of the Power Contacts in Switchgear — A. M. Rivkin	66
V. I. Lenin and Electrical Engineering — V. G. Biriukov	10	A Comparison of D. C. — Three — phase A. C. Static Converters Using Transistors Functioning Under Key Mode Conditions — D. A. Popov	69
Electrification and Automation in the Machine Tool Industry During the Years of the Soviets — V. I. Di-kushin, V. G. Zushman, V. A. Naidis	15	FROM OPERATING EXPERIENCE	
New Trends in the Development of H. V. Apparatus — V. V. Afanasiev, L. K. Greyner	22	Calculating the Stress for Thermal Breakdown in a Solid Dielectric — M. I. Mantrov	74
Analysis of the Error in Digital Computer Calculations of Optimum Load Distribution — V. A. Venikov, B. I. Golovitsin, V. D. Kovalev, I. S. Rokotian, D. A. Fedorov	29	REPORTS	
A Statistical Calculation for the Biassing in Differential Current Relays for Multiterminal Installations — U. I. Karinski	36	Analysis of Devices Using Phase — sensitive Ring Circuits — E. M. Shneyerson	77
Field Regulation for Large Synchronous Motors — I. A. Zborovski, V. G. Nakrokhin	40	A Non — ferrous Magnetic System for Creating an Almost Uniformly Distributed Magnetic Field — A. I. Bodiakshin	79
Optimum Design of Transformers Using Digital Computers — R. S. Babis, N. N. Hublarov	43	An Instrument for Measuring the Time for Thyristors to Switch Off — A. P. Savrukhn	80
An Accurate Calculation for the Frequency and Starting Characteristics of Salient Pole Synchronous Machines — I. I. Talalov, V. K. Mishukov, A. P. Gorshkov, U. J. Shelikalov	47	Using Per Unit Quantities for Calculating Magnetic Circuits for D. C. Electromagnets — V. N. Gurnitski, L. P. Bitchkov	82
Steady — state Conditions for a Pulse Regulating System for Electrical Machines — E. G. Orlov, I. V. Bulin-Sokolov	54	Switching the Circuit of an Inductive Energy Storing Element Using a Vacuum Type Breaker — A. V. Raymers, A. A. Tsvetkova, U. P. Ivanov, V. P. Djiltsov	84
A Graphical Computation Approach for Constructing the Amplitude — phase Characteristics of Automatic Control and Stabilizing Systems — S. J. Beresin	57	DISCUSSION	86
On Damping Resilient Oscillations in an Automated D. C. Drive — A. N. Chernishev, V. L. Grushko, M. L. Prudkov	61	NOTES AND LETTERS	90
		CHRONICLE	92

УДК 621.311.115.003.1

Анализ погрешностей при решении с помощью ЦВМ задачи оптимального распределения активных нагрузок в теплоэнергетической системе

Веников В. А., Головицын Б. И.,
Ковалев В. Д., Рокотян И. С., Федоров Д. А.

«Электричество», 1970, № 4

Предлагается методика оценки суммарной погрешности решения на ЦВМ задачи оптимального распределения нагрузок и ее отдельных составляющих. В качестве составляющих суммарной погрешности анализируются методическая погрешность и погрешность, вносимая неточностью исходных данных.

Методическая погрешность оценивается проведением сопоставительных расчетов по эталонному и исследуемому методу. Погрешность, вызванная неточностью исходной информации, при допущении о случайном характере изменения параметров внутри заданного диапазона оценивается с помощью методов статистических испытаний. Табл. 6. Илл. 5. Библ. 8.

УДК 621.316.925.2.001.24

Статистический расчет торможения токовых дифференциальных защит многоконцевых электроустановок

Каринский Ю. И.

«Электричество», 1970, № 4

Описывается статистический метод расчета торможения токовых дифференциальных защит многоконцевых электроустановок. Рассматриваются устройства защиты, у которых результирующее тормозное воздействие дифференциального реле равно арифметической сумме воздействий всех тормозных обмоток, устанавливаемых на присоединениях защищаемой электроустановки. Исходной информацией к расчету торможения являются законы распределения случайного значения рабочей и с. при расчетных внешних коротких замыканиях электроустановки. За условие расчета торможения принята вероятность отстройки защиты от действия, не ниже заданной, при всех внешних расчетных коротких замыканиях. Описывается метод выбора присоединений, на которых целесообразно устанавливать торможение в случаях, когда число тормозных обмоток реле меньше числа присоединений защищаемой электроустановки. Табл. 3. Илл. 4. Библ. 7.

УДК 621.3.013.8:621.313.323

О регулировании возбуждения крупных синхронных двигателей

Зборовский И. А., Накрохин В. Г.

«Электричество», 1970, № 4

Предлагается АРВ, использующий принцип ограничения токов по температуре обмоток ротора и статора. Ограничение минимального тока ротора в зависимости от активной составляющей тока статора осуществляется по цепи жесткой отрицательной обратной связи ЖОС по току возбуждения.

ЖОС по току возбуждения обеспечивает линейную зависимость между отклонением напряжения на входе АРВ и отклонением напряжения возбуждения в статических режимах. Она позволяет получить высокий коэффициент регулирования по отклонению напряжения в переходных режимах и достаточный коэффициент регулирования в статических режимах. ЖОС по току возбуждения улучшает качество напряжения узла нагрузки как при возмущении со стороны сети, так и со стороны вала синхронного двигателя. Введение в закон регулирования производной от отклонения напряжения в узле нагрузки позволяет уменьшить дисперсию напряжения. Табл. 1. Илл. 2. Библ. 6.

УДК 621.314.212.681.142—523.8.001.24

Проектная оптимизация трансформаторов на ЦВМ

Бабис Р. С., Хубларов Н. Н.

«Электричество», 1970, № 4

Применяемые в трансформаторостроении методы расчета оптимальных мощных трансформаторов основаны на переборе значений независимых переменных, что обеспечивает учет всех исходных неравенств и дискретного характера величин и обуславливает простоту этих методов. Для уменьшения количества сочетаний этих значений использованы приемы (соответствующие динамическому программированию), вытекающие из особенностей трансформаторов с концентрическими обмотками. Выбор основных размеров выполняется по критерию «годовые затраты». В методе ВИТ, разработанном применительно к вычислительной машине «Урал-1», оптимизация размеров проводов обмоток выполняется упрощенно. В методе ВЭИ (Минск-22) введен критерий оптимальности одной обмотки, соответствующий общим затратам, что обеспечивает тщательную оптимизацию размеров проводов обмоток с учетом добавочных потерь в них. Илл. 2. Библ. 13.

УДК 621.313.32.001.24

Уточненный расчет частотных и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин

Талалов И. И., Горшков А. П.,

Мишуков В. К., Шелькалов Ю. Я.

«Электричество», 1970, № 4

Описан метод уточненного расчета частотных и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин, основанный на решении полной системы уравнений для напряжений цепей машины по продольной и поперечной осям. Принимается во внимание изменение параметров успокоительной обмотки, обусловленное насыщением путей потока пазового рассеяния, вытеснением тока и повышением температуры.

Тепловой расчет успокоительной обмотки производится с учетом отвода тепла. Учет зависимости индуктивного сопротивления рассеяния стержней успокоительной обмотки от насыщения осуществляется итерационным методом с заданной погрешностью по току. Расчет запрограммирован для ЦВМ «Урал-2». Приводятся расчетные и экспериментальные данные для нескольких синхронных машин. Илл. 8. Библ. 12.

УДК 62—523.2

Установившиеся процессы в импульсной системе регулирования электрических машин

Орлов Е. Г., Булин-Соколов И. В.

«Электричество», 1970, № 4

Рассматриваются дискретные системы регулирования электрических машин при вынуждающем сигнале пилообразной формы, содержащемся в управляющем воздействии. Получены соотношения, определяющие параметры пилообразного сигнала, обеспечивающие устойчивый синхронный режим работы системы. Показано, что расчет этих систем по методу вибрационной линеаризации приводит к ошибкам в определении погрешности работы системы регулирования. Приведенные соотношения позволяют с достаточной точностью рассчитать характеристики системы в установившемся режиме работы, что подтверждается вычисленной характеристикой дискретной системы регулирования скорости вращения микроэлектродвигателя постоянного тока типа ДПР-52-Н6-03 и результатами эксперимента. Илл. 7. Библ. 4.

УДК 62—523.2

Графо-аналитический метод построения амплитудно-фазовых характеристик систем автоматического управления и стабилизации

Березин С. Я.

«Электричество», 1970, № 4

В статье изложена методика определения амплитудно-фазовых характеристик по заданному переходному процессу для систем автоматического управления и автоматической стабилизации. Для удобства расчетов в ней приведены графики. Илл. 7. Библ. 4.

УДК 62—523.2

О демпфировании упругих колебаний автоматизированного электропривода постоянного тока

Чернышев А. Н., Грушко В. Л.,

Прудков М. Л.

«Электричество», 1970, № 4

Анализируются условия возникновения колебаний момента автоматизированных электроприводов постоянного тока с упругим звеном в механической передаче к рабочей машине и способы демпфирования колебаний скорости.

Приведены графики амплитуд колебаний момента в системах автоматического регулирования скорости электропривода или механизма. Табл. 1. Илл. 5. Библ. 4.

УДК 621.316.5

Искрение главных контактов коммутационных аппаратов

Рывкин А. М.

«Электричество», 1970, № 4

Интенсивность искрения главных контактов, зашунтированных дугосаистительными, зависит от скорости замыкания, начального сопротивления контактов и индуктивности контура. Анализ напряжения на размыкающихся контактах дает критерий: интенсивность искрения минимальна при условии, что произведение сопротивления контакта на время размыкания больше индуктивности контура. Полученные зависимости качественно подтверждены экспериментальной кривой интенсивности искрения в функции от скорости размыкания и осциллограммами. Илл. 4. Библ. 6.

**Сравнительная оценка статических преобразователей
постоянного тока в трехфазный переменный
на транзисторах, работающих в ключевом режиме**

Попов Д. А.

«Электричество», 1970, № 4

Рассматриваются бесфильтровые статические преобразователи постоянного тока в переменный, у которых трехфазное синусоидальное напряжение формируется из сдвинутых по отношению друг к другу напряжений прямоугольной формы. Различные схемы преобразователей с последовательным соединением вторичных обмоток нескольких выходных трансформаторов оцениваются по содержанию высших гармоник в выходном напряжении и коэффициентам использования транзисторов и трансформаторов. На основе сравнительного анализа даются рекомендации по выбору схем преобразователей и числа двухтактных автогенераторов, входящих в схему преобразователя. Табл. 1. Илл. 5. Библ. 6.

УДК 621.3.015.51.001.24

Напряжения теплового пробоя твердого диэлектрика

Мантров М. И.

«Электричество», 1970, № 4

Проводится аналитический и графический анализ явления теплового пробоя твердого диэлектрика. Приведены расчетные выражения для определения напряжения пробоя диэлектрика при постоянном и переменном токе. Табл. 2. Илл. 2. Библ. 3.

УДК 621.317.77

**Анализ устройств с кольцевыми фазочувствительными
схемами**

Шнеерсон Э. М.

«Электричество», 1970, № 3

Выводятся соотношения между входными и выходными сигналами устройств с кольцевыми фазочувствительными схемами в широком диапазоне амплитуд и фаз входных сигналов.

В течение периода изменения входных величин учитывается, что при несовпадении по фазе входных величин в течение периода возможные различные комбинации открытых и закрытых вентилях, при которых значение выходного сигнала по-разному зависит от мгновенных значений входных величин. Илл. 3. Библ. 2.

**Прибор для измерения времени выключения
тиристоров**

Саврухин А. П.

«Электричество», 1970, № 4

Описывается прибор для измерения времени выключения тиристоров, в котором роль вентиля, осуществляющего развязку генератора импульсов прямого тока и импульсов объективного контроля и ограничивающего обратный ток тиристора в процессе запирающего, выполняет мощный импульсный водородный тиратрон. Илл. 1. Библ. 6.

УДК 621.3.013.001.24

**Магнитная система без стали для создания
приближенно равномерного магнитного поля**

Бодякшин А. И.

«Электричество», 1970, № 4

Рассмотрена магнитная система без стали, которая может быть выполнена с использованием сверхпроводников или проводников, работающих при низких температурах. Магнитная система состоит из двух одинаковых прямоугольных катушек, расстояние между которыми выбирается так, чтобы обеспечить в рабочем пространстве между катушками приближенно равномерное магнитное поле. Даны примеры расчета. Илл. 2. Библ. 2.

УДК 621.318.3.001.24

**Расчет магнитных цепей электромагнитов постоянного
тока методом относительных единиц**

Гурницкий В. Н., Бычков Д. П.

«Электричество», 1970, № 4

В предлагаемом методе расчета значения магнитных проводимостей воздушных зазоров для геометрически подобной магнитной цепи определяются из соотношений подобия.

В расчетах используются универсальные характеристики для типовых магнитных структур. Подобные характеристики приведены для Ш-образного электромагнита с плоским прямоходным якорем. Илл. 4. Библ. 6.

УДК 621.373.014.2

**Коммутация цепи индуктивного накопителя энергии
с помощью вакуумного выключателя**

Реймерс А. В., Цветкова А. А.,

Иванов Ю. П., Жильцов В. П.

«Электричество», 1970, № 4

Приведены результаты испытаний вакуумной дугогасительной камеры типа КДВ-12М в качестве коммутатора в цепи индуктивного накопителя энергии. Определены требования к гасящему контуру. Показана возможность применения вакуумного выключателя в устройствах с индуктивным накопителем энергии при длительности выделения энергии порядка сотен микросекунд и более. Табл. 1. Илл. 3. Библ. 3.