

Нарвская гидроэлектростанция

Инж. Б. А. ДЕРМАН, инж. С. Л. ТРАУБЕНБЕИ
и инж. Ю. М. УСПЕНСКИЙ

Ленинградское отделение Гидроэнергoprojecta

Река Нарва широко известна своими водопадами. Вопрос об использовании этих водопадов для получения электрической энергии возник в конце прошлого столетия. Однако ни правительство царской России, ни правительство буржуазной Эстонии не смогли решить его. Только после образования Эстонской ССР и вхождения ее в состав Советского Союза эта идея была претворена в жизнь.

Река Нарва вытекает из Чудского озера и впадает в Финский залив, протекая по границе Ленинградской области и Эстонской ССР. Протяженность реки 78,5 км, падение примерно 30 м. Большая часть падения сосредоточена на коротком участке в низовьях реки, в районе водопадов.

Головной узел и подводящий канал. Нарвская гидроэлектростанция деривационная. Ее головной узел расположен выше водопадов. В состав сооружений головного узла входят: водосливная плотина, водоприемник с ледозащитной стенкой и земляные дамбы.

Длина водосливной плотины 208 м; плотина рассчитана на пропуск расхода 2 450 м³/сек и имеет 11 пролетов шириной по 16 м. Водосливные отверстия закрываются плоскими затворами. Опускание и подъем затворов производятся двумя портальными кранами грузоподъемностью по 60 т.

Для предохранения затворов плотины от давления льда предусмотрена подача воздуха под воду к их нижней части. Воздух препятствует образованию льда. Для предупреждения примерзания пазы четырех затворов имеют электрический обогрев.

Водоприемник расположен на правом берегу реки и служит как для регулирования впуска воды в подводящий канал, так и для закрытия входа в канал в случае необходимости его опорожнения.

Водоприемник имеет три отверстия шириной по 16 м, закрываемые плоскими затворами. Затворы обслуживаются портальными кранами плотины, для чего крановые пути водоприемника соединены с крановыми путями плотины. Выше водоприемника устроена ледозащитная стенка, не допускающая попадания плавающих тел в канал.

От водоприемника к зданию станции вода направляется по подводящему каналу длиной 2,3 км, проходящему по правому берегу реки. В поперечном сечении канал имеет трапециoidalную форму. Ширина канала по верху 75 м, по дну 20 м, крутизна откосов 1 : 2,5. Откосы и дно канала имеют железобетонную облицовку.

Станционный узел. Станционный узел (рис. 1) расположен на правом берегу реки, ниже водопадов, в 2,5 км от головного узла.

Основные сооружения станционного узла: здание станции, короткий отводящий канал, ледосброс, напорный бассейн, открытые распределительные устройства 110 и 35 кВ. Для пропуска в верхний бьеф молодых угрей, поднимающихся из Финского залива, устраивается специальное сооружение — угреход.

Станционный узел соединен железнодорожной веткой с магистралью Ленинград — Таллин. Разница между отметками правого берега, по которому ветка подходит к гидроэлектростанции, и уровня воды в нижнем бьефе составляет 24 м. Это усложнило доставку грузов на монтажную площадку и обусловило принятую компоновку здания станции. Грузы в вагонах подаются сначала в перегрузочное помещение, а затем, посредством мостового крана грузоподъемностью 75 т, на монтажную площадку, расположенную почти на 10 м ниже пола перегрузочной площадки.

Гидроагрегаты. На станции установлены три вертикальные поворотнолопастные гидротурбины типа ПЛ-495-ВВ-660, изготовленные Ленинградским металлическим заводом. По конструкции

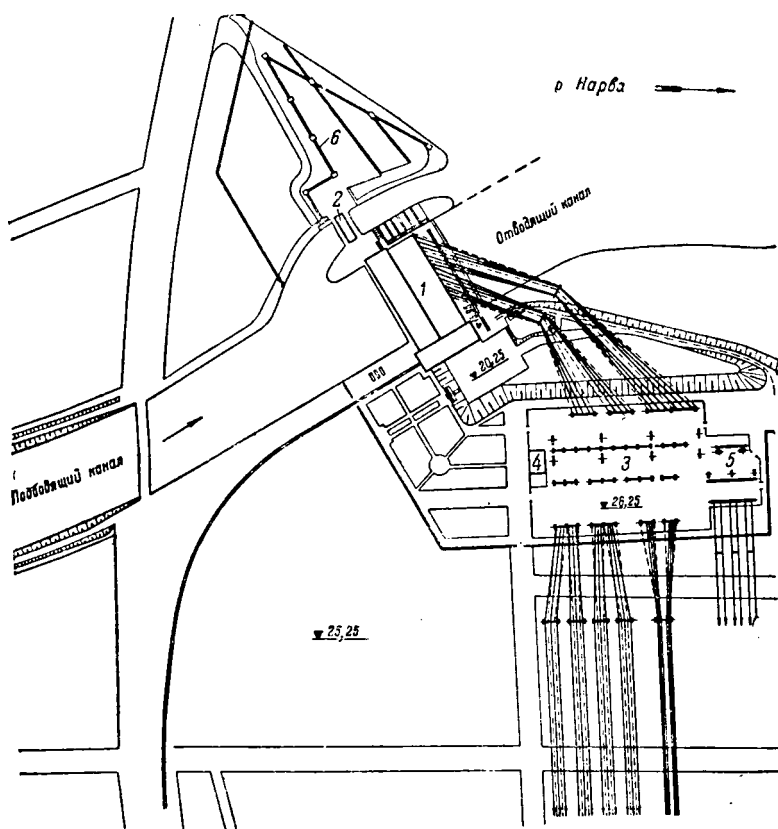


Рис. 1. План станционного узла.

они аналогичны турбинам Цимлянской гЭС. Спиральные камеры турбин бетонные. Нормальная скорость вращения турбины 88,2 об/мин, угловая — 180 об/мин. Расчетная мощность, отдаваемая турбиной при напоре 22 м, равна 48 мвт.

Гидрогенераторы Нарвской гЭС, изготовленные заводом «Электросила» имени Кирова, также аналогичны гидрогенераторам Цимлянской гЭС. Мощность гидрогенератора 52 мвта, напряжение 10,5 кв. Маховой момент генератора, определенный по условиям регулирования турбины, 15 000 т·м². Обмотка статора стержневая, ротор снабжен продольно-поперечной успокоительной обмоткой.

Возбуждение генератора осуществляется от возбuditеля и подвозбудителя, расположенных на одном валу с ротором.

Охлаждение генератора осуществляется по замкнутому циклу посредством водяных воздухоохладителей. Предусмотрен отбор горячего воздуха для обогрева машинного зала и прилегающих к нему помещений.

Особенность конструкции агрегатов Цимлянской и Нарвской гидроэлектростанций состоит в том, что турбина и генератор имеют один общий вал, а подпятник помещен на крышке турбины. Благодаря этому нижняя крестовина генератора, перестав быть несущей, значительно уменьшилась по высоте, что вместе с отсутствием фланцевого соединения валов привело к существенному снижению высоты агрегата.

Подпятник и подшипник генератора погружены в масляную ванну, и смазка их осуществляет-

ся без внешней циркуляции масла. Ванна имеет постоянный объем масла, циркуляция масла внутри нее создается вращающимися частями подпятника. Масло охлаждается посредством водяного маслоохладителя, помещенного в масляную ванну.

Конструкция генератора позволяет осуществить выемку ротора без демонтажа агрегата и нарушения линии вала. Демонтаж агрегата требуется лишь при выемке рабочего колеса турбины. Общий вес генератора 520 т, вес ротора с валом — 274 т.

Главная схема электрических соединений гЭС. Нарвская гидроэлектростанция расположена на стыке Ленинградской и Эстонской энергосистем: вырабатываемая ею электроэнергия передается как в ту, так и в другую энергосистемы.

Передача выработанной электроэнергии в основном осуществляется на напряжении 110 кв. Местный промышленный район, г. Нарва и Иван-город, снабжаются энергией на напряжении 10 кв. Кроме того, на гидроэлектростанции устанавливаются два трансформатора 35/10 кв по 7,5 мвта и сооружается распределительное устройство 35 кв для снабжения энергией прилегающего к станции района.

Вначале схема была запроектирована в виде трех одиночных блоков генератор — трансформатор, из которых два — с ответвлениями к шинам генераторного напряжения. Ввиду того, что часть мощности гЭС потребляется на генераторном напряжении, трансформаторы блоков с ответвлениями должны были иметь при этой схеме мощность по 45 мвта, т. е. меньше мощности генератора, а трансформатор блока без ответвления — 60 мвта.

По условиям водного режима реки гидроэлектростанция будет работать тремя, двумя и одним агрегатом, а зимой в маловодные годы возможны полные остановки станции на 7 ... 8 час в сутки и на выходные дни. Во время остановок агрегатов потребители, питающиеся на генераторном напряжении, должны получать энергию от энергосистем. Следовательно, трансформаторы блоков с ответвлениями должны работать также в реверсивном режиме.

Как известно, при переходе от прямой работы трансформатора к реверсивной имеют место резкие изменения напряжения на шинах 10 кв. В связи с этим, а также с тем, что основным потребителем энергии на генераторном напряжении является текстильная промышленность, предъявляющая жесткие требования к стабильности напряжения, для блоков с ответвлениями потребовались трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой. Однако завод-изготовитель не смог поставить к необходимому сроку таких трансформаторов мощностью по 45 мвта, а предложил трансформаторы мощностью 31,5 мвта. Пришлось взамен двух трансформаторов по 45 мвта установить три трансформатора

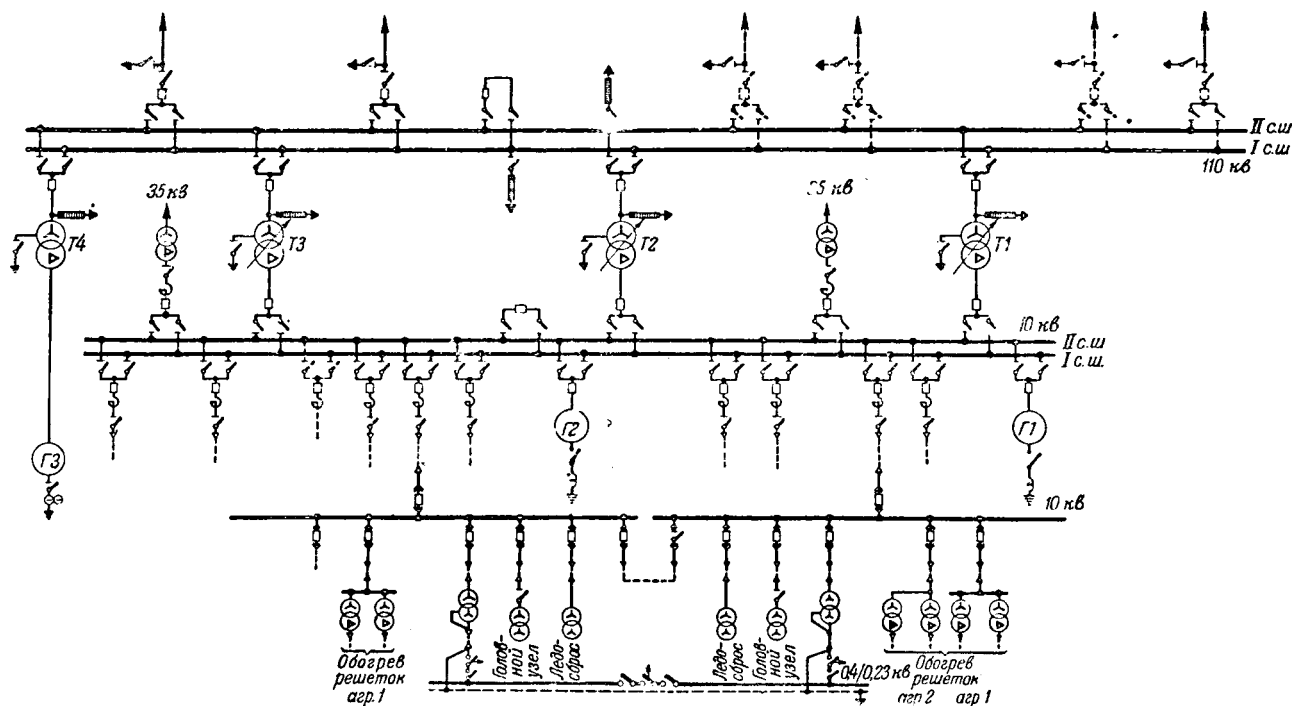


Рис. 2. Главная схема электрических соединений.

по 31,5 мгва. Поэтому была осуществлена не первоначально запроектированная схема, а схема, показанная на рис. 2.

К двойной системе шин генераторного напряжения присоединены два генератора и три повышающих трансформатора мощностью по 31,5 мгва с регулированием напряжения под нагрузкой. Третий генератор соединен в блок с трансформатором мощностью 60 мгва без регулирования напряжения под нагрузкой. К шинам генераторного напряжения присоединены также восемь линий для питания потребителей местной нагрузки и две линии для питания шин 10 кВ собственных нужд станции.

Для всех присоединений генераторного напряжения, кроме линий, приняты выключатели типа ВМГ-229. Для линий взяты выключатели типа ВМГ-133, в связи с чем в цепи линий включены реакторы.

На напряжении 110 кВ применена схема с двойной системой шин и междушинным выключателем. Кроме трех трансформаторов, к шинам 110 кВ будут присоединены шесть линий электропередачи: две линии свяжут станцию с Ленинградской, две с Эстонской энергосистемами и две с будущими электростанциями и потребителями. Для всех присоединений 110 кВ приняты воздушные выключатели типа ВВН-110.

На напряжении 35 кВ принята схема с одиночной, секционированной выключателем системой шин. К каждой секции присоединено по одному трансформатору мощностью 7,5 мгва и по три линии электропередачи.

Схема питания шин 35 кВ от шин генераторного напряжения посредством отдельных трансформаторов выбрана потому, что она более экономична по сравнению со схемой питания указанных шин от третьей обмотки трехобмоточных трансформаторов. Третья обмотка 35 кВ должна

была бы иметь мощность, равную 20 мгва, и, следовательно, имела бы место бесполезная затрата меди.

Схема электрических соединений собственных нужд. Электродвигатели вспомогательных механизмов, освещение, приборы отопления и устройства обогрева решеток турбин питаются при напряжении 380/220 в от трансформаторов 10/0,4/0,23 кВ, установленных в нескольких питающих пунктах. Эти трансформаторы, в свою очередь, получают энергию от шин распределительного устройства собственных нужд 10 кВ.

Распределительное устройство собственных нужд 10 кВ, комплектное с выключателями ВМГ-133, изготовлено Запорожским трансформаторным заводом, имеет одну систему шин, секционированную выключателем.

На станции установлены две аккумуляторные батареи типа СК-10 с числом элементов, равным 114. Напряжение сети постоянного тока 220 в. Работа аккумуляторных батарей осуществляется по циклу дозового подзаряда без элементных коммутаторов. В качестве подзарядных устройств применены генераторы постоянного тока. Для заряда батареи после аварийных или тренировочных разрядов установлен один зарядный агрегат.

Релейная защита, автоматика, телемеханика и управление станцией. Релейная защита выполнена в соответствии с «Правилами устройства электротехнических установок» и директивными указаниями Технического управления Министерства электростанций. При этом была использована новейшая аппаратура отечественного производства. В частности, на линиях 110 кВ применена дифференциально-фазная высокочастотная защита ДФЗ-2, а на линиях 10 кВ, питающих основного потребителя местного района, имеющего свою тэц, продольная дифференциальная защита РДЛ.

Защита от замыканий на землю генераторов,

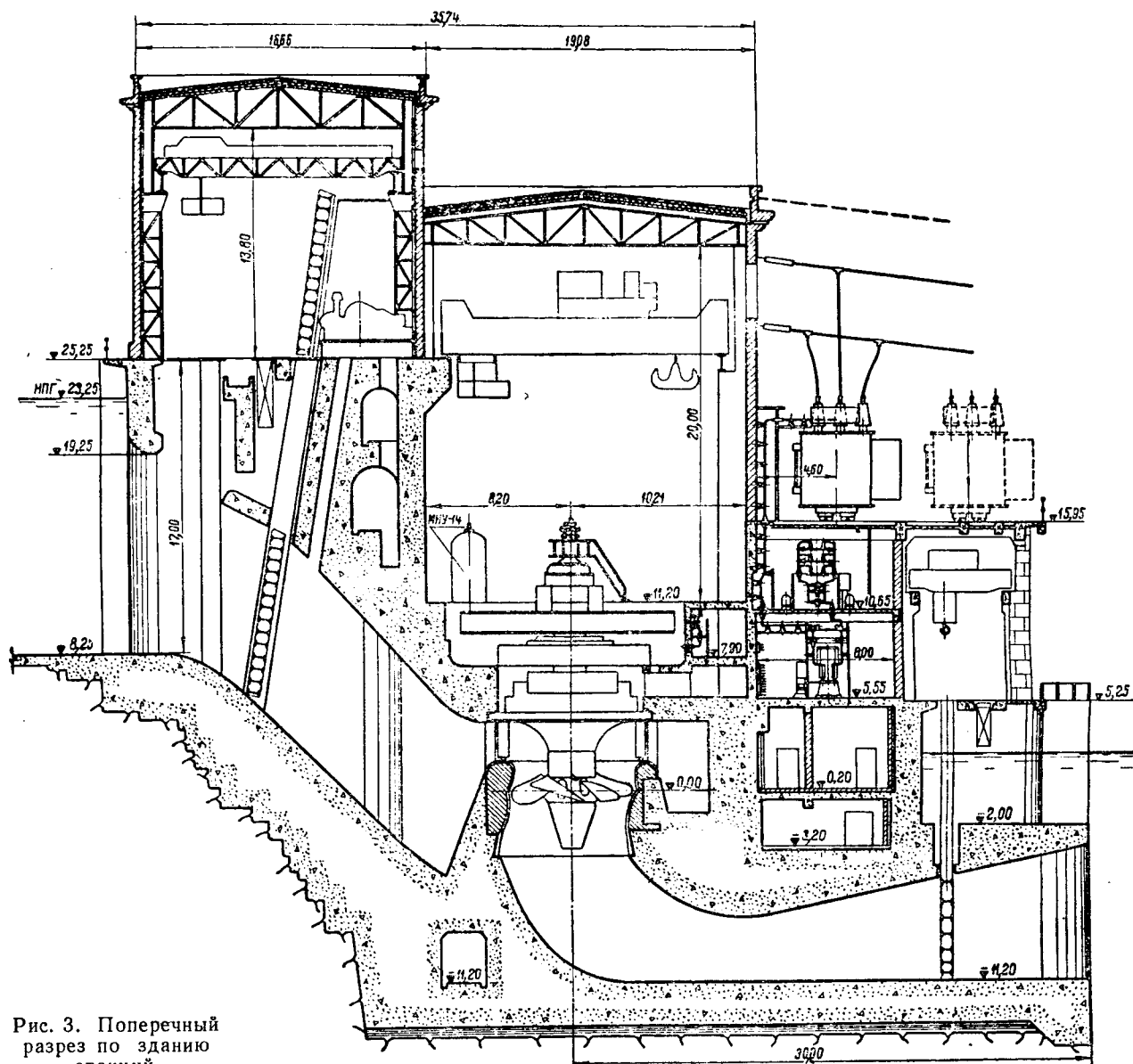


Рис. 3. Поперечный
разрез по зданию
станций.

работающих на шины, осуществлена на естественном емкостном токе сети. Такая защита на генераторах со значительным емкостным током (4,2 а) и при большом емкостном токе сети 10 кВ (свыше 15 а) выполнена впервые. Для отстройки защиты от емкостного тока самих генераторов использованы дугогасящие катушки, настроенные на емкостный ток генераторов и установленные в нейтральных точках. Емкостный ток сети 10 кВ этими катушками не компенсируется ввиду резко переменного режима работы генераторов в течение суток.

На шинах 110 и 10 кВ применена дифференциальная защита, селективно отключающая поврежденную систему шин.

Гидроагрегаты будут полностью автоматизированы, включая и регулирование к. п. д. турбин по напору. Регулирование напряжения осуществляется посредством изготовленного заводом «Электросила» устройства компаундирования с двухсистемными электромагнитными корректорами напряжения. Включение генераторов в сеть

осуществляется методом автоматической самосинхронизации. На случай включения посредством выключателей 110 кВ повышающих трансформаторов и линий предусмотрена точная ручная синхронизация. При включении линейными выключателями для синхронизации используется напряжение, полученное путем емкостного отбора от конденсаторов связи.

В настоящее время для Нарвской гЭС разрабатывается устройство автоматического регулирования частоты. При этом используются новейшие исследования Энергетического института Академии наук СССР.

В соответствии с водным режимом и особенностями гидротехнических сооружений Нарвская гЭС будет участвовать в автоматическом регулировании частоты объединенной энергосистемы, покрывая верхнюю часть графика нагрузки Эстонской системы и отдавая постоянную мощность в Ленинград. В связи с этим на гидроэлектростанции намечено установить камертонный регулятор частоты с блоком статизма по обменной

Главное распределительное устройство 10 кв размещено в двух этажах корпуса распределительных устройств. В верхнем этаже размещены сборные шины и разъединители, а в нижнем — масляные выключатели и реакторы. Распределительное устройство 10 кв — однорядное. Число ячеек равно 19.

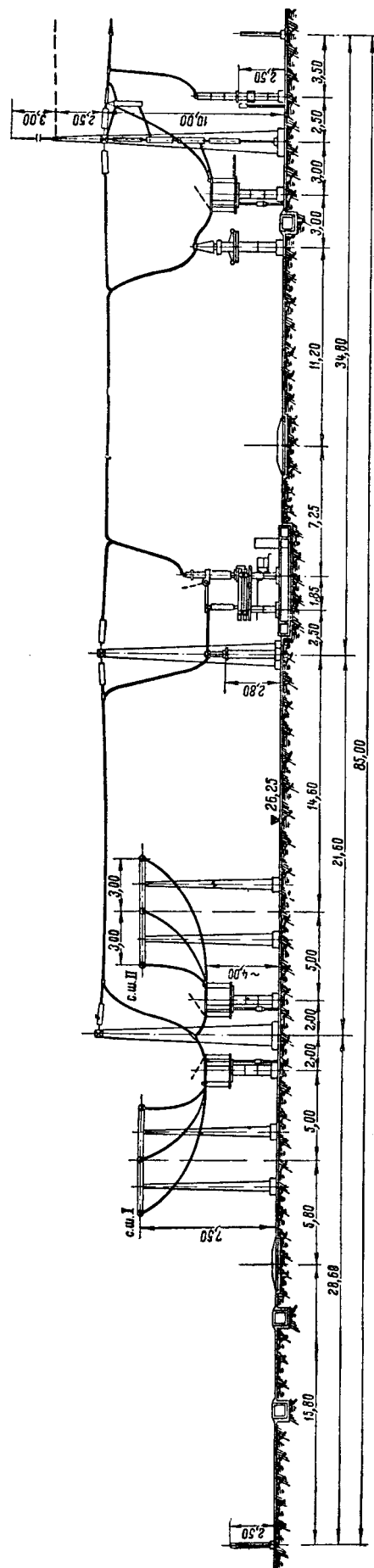


Рис. 4. Открытое распределительное устройство 110 кВ.

Перекрытие корпуса распределительного устройства 10 кВ образует площадку, на которой установлены четыре главных трансформатора и два трансформатора собственных нужд станционного питающего пункта. Вдоль трансформаторной площадки проложен рельсовый путь, по которому трансформаторы могут доставляться на монтажную площадку для ремонта. Пол монтажной площадки расположен выше пола машинного зала, но на одной отметке с трансформаторной площадкой.

Пост управления помещается в корпусе распределительных устройств, в правой его части, если смотреть со стороны верхнего бьефа. Под помещением поста управления находится помещение для разводки кабелей. На этой же отметке, но под монтажной площадкой, размещены оборудование и приборы телеуправления и устройств связи. Ниже помещения для разводки кабелей помещаются аккумуляторная батарея № 1, батарея связи, щит постоянного тока, зарядный и подзарядный агрегаты. С левой стороны к помещению поста управления непосредственно примыкает распределительное устройство собственных нужд 10 кВ, состоящее из 16 камер комплектного распределительного устройства с двухсторонним обслуживанием. Камеры установлены в два ряда.

В щитовом помещении установлены механизмы щитов турбины и аппаратура для управления ими, а также трансформаторы для обогрева решеток турбин двух агрегатов. Трансформаторы для обогрева решеток турбин третьего агрегата установлены на площадке между щитовым помещением и ледосбросом. Щитовое помещение оборудовано краном грузоподъемностью 30 т.

К правому торцу здания гэс, если смотреть с верхнего бьефа, пристроено упоминавшееся выше перегрузочное помещение. Мостовой кран грузоподъемностью 75 т, предназначенный для подачи грузов с перегрузочной площадки на монтажную и передвигающийся поперек здания станции над перегрузочной и монтажной площадками (пути этого крана расположены выше путей кранов машинного зала), одновременно используется при ремонте трансформаторов.

Между перегрузочным и щитовым помещениями располагаются компрессорная, лифт, соединяющий все этажи, служебные помещения, а также помещения аккумуляторной батареи № 2, щита постоянного тока и подзарядного агрегата.

Насосы для тушения пожара установлены в помещении, расположенном ниже масляного

хозяйства, а насосы для откачки воды из отсасывающих труб — в потерне со стороны верхнего бьефа.

Шандорные заграждения отсасывающих труб обслуживаются мостовым краном грузоподъемностью 15 т, передвигающимся в галерее над шандорной площадкой.

Компрессорная гидроэлектростанции имеет два компрессора давлением 25 атм для маслonaпорных установок системы регулирования турбин (используются также для торможения агрегатов) и три компрессора давлением 7 атм для получения необходимого давления в шахтах турбин при работе генератора в компенсаторном режиме и других нужд гидроэлектростанции. Давление в шахте турбины при работе генератора в компенсаторном режиме необходимо для отжата воды, чтобы избежать затраты мощности на преодоление сопротивления воды при вращении рабочего колеса.

Открытые распределительные устройства 110 и 35 кВ. На Нарвской гэс принято распределительное устройство 110 кВ (рис. 4) низкого типа с шахматным расположением ячеек; оно размещается, как указывалось выше, на территории станционного узла. Ширина ячейки принята равной 8 м.

Расстояние между трансформаторами тока и выключателями в цепях линий электропередачи принято таким, что при выводе выключателя в ремонт и присоединении линии через междушинный выключатель линейные трансформаторы тока с приключенными к ним цепями релейной защиты могут быть оставлены в работе.

Компрессорная воздушных выключателей находится в здании, расположенном на территории распредустройства 110 кВ. Она имеет три агрегата давлением 41 атм и производительностью по 850 л/мин. В здании компрессорной, в особом помещении, установлены щиты релейной защиты линий.

Главные трансформаторы соединяются с распредустройством 110 кВ сталеалюминиевыми проводами, защищенными тросами. Грозазащита распредустройства 110 кВ осуществлена молниеотводами, установленными на колоннах порталов.

Рядом с распределительным устройством 110 кВ находится распределительное устройство 35 кВ также низкого типа. Трансформаторы 35/10 кВ устанавливаются на территории распределительного устройства.

[18. 6. 1956]



Быстродействующие вычислительные машины и автоматизация производственных процессов

Н. А. ЯВЛИНСКИЙ

Москва

Поставленная XX съездом КПСС задача дальнейшего повышения производительности труда должна и будет в большой мере решаться путем комплексной автоматизации технологических процессов в самых различных областях промышленного производства. Современное промышленное производство характеризуется высокими параметрами: повышаются скорости прокатки и резания металла, температура и давление в котлах, широко внедряется в металлургию ведение процессов в вакууме; повышаются требования к точности выполнения технологических операций. Применение автоматических регуляторов, управляющих отдельными агрегатами и устройствами, позволяет решить ряд изолированных задач. Однако по мере автоматизации отдельных механизмов, процессов и устройств все острее ставятся задачи полной автоматизации цехов и производств. Применение быстродействующих вычислительных машин делает решение этой весьма сложной проблемы реальным.

Устройства для ускорения вычисления применяются давно. Однако только применение электроники позволило построить быстродействующие вычислительные машины, выполняющие по заранее составленной программе простейшие математические операции: сложение, вычитание, умножение и деление. Длительность одной операции составляет от 50 до 500 мксек, в соответствии с чем такая машина может выполнить тысячи или даже десятки тысяч операций в секунду. Наряду с арифметическими действиями машина может выполнять простейшие логические операции: определять знак числа, сравнивать числа по модулю, производить выборку данных из таблиц. Машины такого типа, оперирующие с числами, представленными в цифровой форме, и работающие автоматически по заранее составленной программе, получили название цифровых машин с программным управлением.

Многие проблемы науки и задачи техники могут быть сформулированы математически, в форме дифференциальных уравнений. Только небольшое число типов этих уравнений может быть разрешимо аналитически. В решении же большинства задач приходится пользоваться методами численного интегрирования, что связано с затратой большого труда и времени. Так, решение задач ядерной физики, аэродинамики сверхзвуковых скоростей требует выполнения десятков миллионов арифметических операций. Вычислитель, вооруженный электрифицированным арифмометром, выполняет за 8 рабочих часов 1 000 операций, в соответствии с чем решение одной из указанных выше задач потребует нескольких тысяч человеко-дней. При помощи вычислительной машины эта задача решается за несколько часов. Таким образом, быстродействующие вычислительные машины открыли новые возможности для развития многих отраслей науки и техники.

Значение быстродействующих вычислительных машин не ограничивается автоматизацией процессов вычисления. Применение электронных вычислительных устройств позволяет автоматизировать процессы управления отдельными станками и агрегатами, поточными линиями, цехами и промышленными предприятиями. В настоящее время разрабатываются и строятся автоматы, выполняющие логические операции, учитывающие сложную внешнюю обстановку, «помнящие» ранее выполненные операции и процессы.

Существующие автоматы и автоматические устройства, простые и сложные, выполняющие одну операцию или управляющие выполнением группы операций, предназначены для работы в заранее известных и определенных условиях. Параметры системы регулирования остаются постоянными или изменяются в определенных пределах, а работа системы протекает в соответствии с законами теории автоматического регулирования.

Совместная работа быстродействующей вычислительной машины и системы автоматического регулирования позволяет перейти от управления по одному или нескольким параметрам к так называемому оптимальному регулированию.

Однако любая система регулирования не может обеспечить постоянное равенство выходной величины входному сигналу. Выходная величина в силу запаздывания будет больше или меньше отличаться от входной величины. Эта разность, которая называется погрешностью системы регулирования, может увеличиваться или даже стать больше допустимой, если изменится внешняя обстановка. В таких случаях система автоматического регулирования перестает выполнять свои функции.

Однако уже давно в литературе рассматривались возможности построения системы автоматического регулирования, обеспечивающей наименьшее значение для среднего квадрата ошибки. Частными решениями такой задачи является экстраполяция или упреждение входной величины и сравнение выходной, регулируемой величины с входной в данный момент времени. Такая система автоматического регулирования отличается от обычной более высокой организацией и находит свое практическое осуществление в использовании вычислительных машин, управляющих системами автоматического регулирования.

Система автоматического регулирования поддерживает, без непосредственного участия человека, равенство регулируемой величины установленному значению. При оптимальном регулировании система автоматически вычисляет, на основании имеющейся информации, возможные конечные состояния процесса и выбирает из них наиболее благоприятный. Эти функции выполняет быстродействующая вычислительная машина.

на, которая, пользуясь информацией, характеризующей текущее состояние системы и внешнюю обстановку, а также, учитывая сведения о ходе процесса в предыдущие отрезки времени, выполняет расчеты по заранее заложенной логической схеме и оценивает возможные варианты поведения системы. Эти оценки могут основываться не только на имеющейся в машине информации. Пользуясь методом экстраполяции, могут быть рассчитаны мыслимые состояния системы не только для данных внешних условий, но и для других возможных условий при протекании процесса регулирования. Весь процесс регулирования производится в соответствии с введенными в машину критериями оптимального регулирования. Такими критериями могут быть: скорость регулирования, минимальное отклонение процесса от заданных характеристик и т. д. Анализируя всю сумму полученных данных, вычислительная машина устанавливает наилучший ход процесса, изменяя, в случае необходимости, параметры самой системы регулирования.

В связи с отсутствием установившейся терминологии и новизной предмета может появиться ошибочное представление об автоматах, заменяющих человека, о «думающих» автоматах и т. д. Вычислительные машины, наряду с другими машинами, облегчающими труд человека, становятся на вооружение в арсенале современных технических средств. Так же как станки являются продолжением наших рук, а автомобиль ускоряет и облегчает передвижение человека, так и вычислительная машина облегчает и ускоряет решение арифметических и логических задач. Когда говорят: «машина выбирает» или «машина учитывает внешнюю обстановку», то имеют в виду, что в устройстве машины человеком заложены инструкции, основанные на простейших логических построениях, и только в пределах этих инструкций действует машина.

Элементы устройства. Цифровая вычислительная машина представляет быстродействующий арифмометр с автоматическим управлением, которое осуществляется введенной в устройства машины программой. Числа в машине представляются в цифровом виде электрическими импульсами или статическими состояниями элементов машины: проводящее или непроводящее состояние электронной лампы, намагниченное или нейтральное состояние ферромагнетика, заряженное состояние конденсатора или отсутствие заряда на нем.

Для представления числа в общепринятой десятичной системе мы пользуемся десятью знаками: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9. Известны другие системы счисления, например двоичная. В этой системе применяются только две значащие цифры: 0 и 1. Описанные физические элементы имеют два устойчивых состояния. Каждый такой элемент может быть использован для представления одного разряда двоичного числа. Поэтому в быстродействующих вычислительных машинах чаще применяется двоичная система счисления, а не общепринятая десятичная система. Так же как десятичные числа представляются суммой степе-

ней 10, так и двоичные числа представляются суммой степеней 2. Число 1253, например, в двоичной системе представляется следующим образом: $1 \cdot 2^{10} + 0 \cdot 2^9 + 0 \cdot 2^8 + 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 1253$, и будет записано в таком виде: 10011100101. В двоичной системе счисления используются только две цифры — 0 и 1 и, значит, разряд двоичного числа может реализоваться элементом, имеющим два физических состояния, соответствующих одно — нулю, другое — единице. В двоичной системе отсутствует таблица умножения: умножение одного числа на другое сводится к повторению множимого с соответствующим сдвигом на разряд, т. е. умножение заменяется более простой операцией — сложением.

Приближенное решение любого дифференциального уравнения может быть сведено к выполнению в определенном порядке конечного числа арифметических операций, т. е. непрерывная функция в этом случае заменяется ступенчатой, ступени которой отстоят друг от друга на расстоянии шага вычисления. Решение получается с приближением, обусловленным числом разрядов в счетчиках машины, т. е. значностью чисел, с которыми оперирует машина. Погрешности определяются аппроксимацией переменных величин дискретными значениями и ошибками от округления чисел при выполнении арифметических операций.

Быстродействующая вычислительная машина состоит из следующих основных устройств: 1) арифметического устройства или счетчиков, выполняющих арифметические операции; 2) запоминающего устройства, хранящего программу решения задачи, т. е. порядок и содержание операции, которые должна выполнять машина, числовые данные, необходимые для решения задачи, а также промежуточные результаты вычислений; 3) устройства управления, обеспечивающего автоматическое выполнение вычислений в порядке, установленном программой; 4) вводного устройства для ввода в машину исходных данных и программы решения задачи; 5) устройства вывода с печатающим механизмом, с помощью которого результаты вычисления выводятся из машины в удобном для пользования виде. Структурная схема цифровой вычислительной машины приведена на рис. 1.

Быстродействующая цифровая вычислительная машина строится из большого числа элементов, выполненных по нескольким схемам. Конструктивно такой элемент представляет собой электронный блок из одной или двух ламп. Количество различных схем, по которым выполнены блоки — элементы, невелико. В качестве элементов быстродействующих цифровых машин применяются: триггерные ячейки, вентильные или дверные схемы, собирательные или коллекторные схемы, счетчики импульсов.

Триггерная ячейка (рис. 2) с двумя электронными лампами, имеющими анодно-сеточные связи и общее устройство смещения, обладает свойством оставаться в одном из двух устойчивых состояний, пока некоторый сигнал не изменит

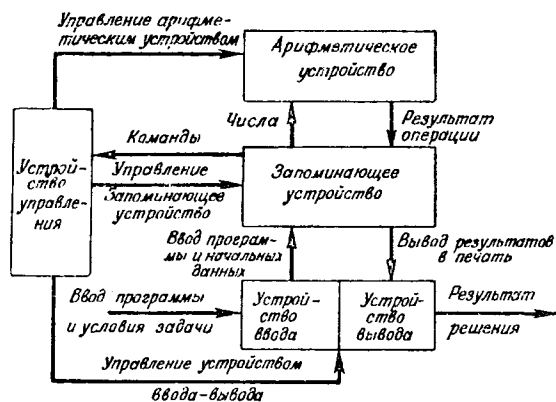


Рис. 1. Структурная схема цифровой вычислительной машины.

это состояние на другое возможное. Триггерная ячейка используется для представления одного разряда двоичного числа: одно состояние соответствует нулю, другое — единице. В одном стабильном состоянии левый триод открыт, а правый — заперт. Другому стабильному состоянию соответствует обратная картина. Переход из одного стабильного состояния в другое осуществляется подачей положительного импульса на сетку запертой лампы. Триггерные ячейки используются в различных устройствах вычислительной машины. В частности, ее можно рассматривать как элемент электронного запоминающего устройства, хотя в настоящее время запоминающие устройства большой емкости строятся на других элементах.

Вентильная схема (рис. 3) является другим важным элементом, применяемым в быстродействующих вычислительных машинах. Электронный вентиль осуществляет включение той или другой цепи при воздействии управляющего импульса. Вентильная схема осуществляется с помощью двух диодов. Вместо электронных ламп можно применить кристаллические детекторы, например германиевые, что в несколько раз уменьшает размеры такого элемента (рис. 4).

Коллекторная схема (рис. 5) выполняет функции связи нескольких входных линий с выходной линией, оставляя входные линии между собой не связанными. Каждая из входных линий передает импульсы только на выходную линию, не влияя на другие линии. Импульс в выходную линию может быть передан или из входа

номер один или из входа номер два, т. е. выполняется логическая операция «или ... или».

Запоминающее устройство является важнейшей частью цифровой вычислительной машины. Запоминающее устройство хранит входные данные, программу вычислений и промежуточные результаты столько времени, сколько это необходимо при решении задачи. К этим устройствам предъявляются требования быстродействия, т. е. получения и выдачи информации за малые промежутки времени, устойчивого хранения информации и, кроме того, необходимо, чтобы запоминающее устройство обладало надлежащей емкостью.

Простейшими запоминающими устройствами являются перфокарты, перфорированная бумажная лента и т. д. Все эти запоминающие устройства используются в цифровых вычислительных машинах. Однако машина должна быть снабжена быстродействующим запоминающим устройством. Запись информации и выборка данных из запоминающего устройства должны производиться со скоростью, соизмеримой с выполнением арифметических операций в электронных блоках машины. В цифровых вычислительных машинах в качестве быстродействующих, оперативных запоминающих устройств применяются электронно-лучевые трубки, ферритовые сердечники, ультразвуковые линии задержки, магнитные покрытия на барабанах и лентах. Чаще всего вычислительная машина снабжается внутренним запоминающим устройством небольшой емкости в тысячу чисел (иногда емкость доводят до 4 000 чисел) и более медленным внешним запоминающим устройством емкостью в десятки тысяч чисел.

Быстродействующие запоминающие устройства, использующие электронно-лучевые трубки, позволяют производить запись и выборку числа за 5 ... 10 мксек. Электронный луч, падающий на экран, благодаря явлению вторичной электронной эмиссии изменяет потенциал облучаемого пятна на экране относительно соседних участков. Такое изменение распределения потенциалов на экране может быть обнаружено в виде электрических импульсов, снимаемых с металлизированной поверхности, нанесенной на обратной стороне экрана. Так как связь емкостная, то она реагирует не на абсолютное значение потенциала точки экрана, а на изменение этого потенциала. Вследствие того, что экран выполнен из диэлектрика, распределение потенциалов, созданное

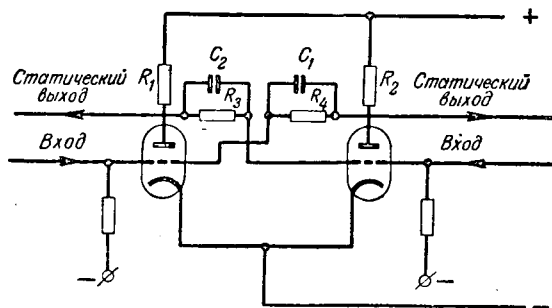


Рис. 2. Триггерная ячейка на двух триодах.

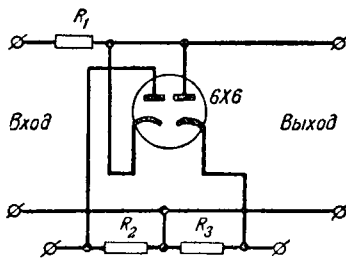


Рис. 3. Вентильная схема на двух лампах 6Х6.

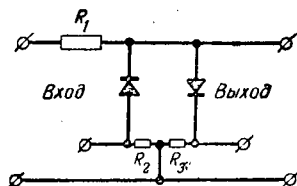


Рис. 4. Вентильная схема на кристаллических диодах.

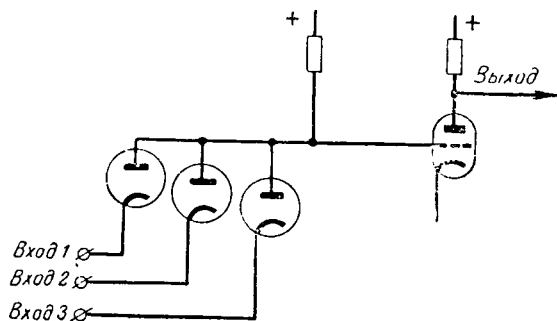
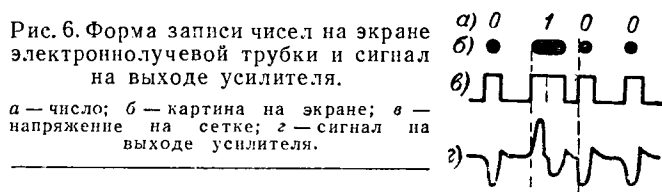


Рис. 5. Коллекторная схема с тремя входами.

Рис. 6. Форма записи чисел на экране электроннолучевой трубки и сигнал на выходе усилителя.

а — число; б — картина на экране; в — напряжение на сетке; г — сигнал на выходе усилителя.



электронным лучом, может сохраняться некоторое время и служить запоминающим устройством.

Чтобы записать определенное количество цифр, экран разбивается на отдельные участки. Это выполняется схемой развертки, управляющей движением луча по экрану и модуляцией луча во времени. Весь экран разбивается на определенное число строк, зависящее от количества уровней напряжения, подающегося на отклоняющие по вертикали пластины. Число знаков в строке определяется числом импульсов, открывающих электронный луч за время его движения по одной горизонтальной строке. Практически работающие системы дают по 32 точки в 32 строках, т. е. экран разбивается на 1 024 элемента.

В запоминающей трубке запись 0 и 1 представляется формой пятна на экране, а именно точкой и тире. Чтобы записать 1 в данном элементе экрана, модулирующий импульс затягивается, в результате пятно растягивается в тире. Если после записи пропустить луч с нормальной точечной модуляцией по записанному, то на металлической пластине в местах точек получим отрицательные импульсы, а в местах тире — положительные. На рис. 6 изображено число, записанное на экране трубки, и сигнал на выходе усилителя. Для того чтобы после считывания импульсов запись на экране осталась без изменения, электронный луч модулируется в соответствии с записью на экране.

На рис. 7 приведена структурная схема работы электроннолучевой трубки в качестве запоминающего устройства. Модулирующие импульсы подаются на сетку трубки через вентили 1 и 2. Если на металлической пластине появляется отрицательный импульс (точка на экране), то открывается вентиль 1 и на сетку поступает точечный импульс. Если на экране — тире, то на металлической пластине появится положительный импульс, который откроет вентиль 2 и пропустит на сетку трубки удлинненный импульс — тире. Сохранение полученной информации на длительное время достигается повторным прочтением записи электронным лучом.

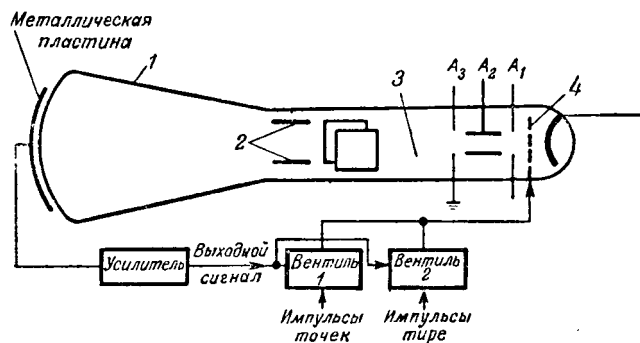


Рис. 7. Структурная схема использования электроннолучевой трубки в качестве запоминающего устройства.

1 — металлическая пластина; 2 — отклоняющие пластины по вертикали; 3 — отклоняющие пластины горизонтальной развертки; 4 — сетка.

Запоминающее устройство строится из таких устройств. Каждая электроннолучевая трубка служит для записи одного разряда, например n -го, каждого числа. В запоминающем устройстве должно быть столько трубок, сколько двоичных разрядов в числах, которыми оперирует машина.

Вычислительные машины, которые разрабатываются последние год — два, снабжаются запоминающим устройством, использующим в качестве элементов для хранения информации ферритовые сердечники. Материал, из которого спрессован кольцевой сердечник, имеет прямоугольную петлю гистерезиса (рис. 8). Такая магнитная характеристика позволяет сохранить два устойчивых состояния (А и Б) намагничивания. Каждому из этих состояний приписывается значение 0 или 1. Считывание производится импульсом постоянной полярности. По величине э. д. с., индуцируемой в считывающей обмотке, можно определить, хранит ли данное кольцо запись 0 или 1. Ферритовые сердечники, применяемые для запоминающих устройств, имеют размеры: наружный диаметр 3...4 мм, внутренний диаметр 1,5...2 мм, толщина кольца 1...1,5 мм. Запоминающее устройство емкостью в 1 024 сорокозначных двоичных числа должно иметь $1\,024 \times 40 = 40\,960$ колец. Такое запоминающее устройство может быть размещено в параллелепипеде размером $300 \times 300 \times 500$ мм.

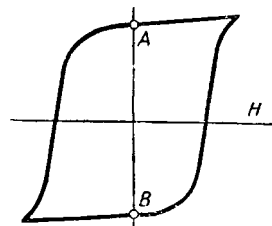


Рис. 8. Магнитная характеристика ферритовых сердечников, применяемых в запоминающих устройствах.

В качестве внешних запоминающих устройств применяют магнитные барабаны и магнитные ленты. Средством запоминания является изменение интенсивности остаточного магнетизма в малом объеме магнитного материала. Техника записи и воспроизведения магнитной записи речи и музыки широко известна. При записи и считывании двоичных цифр снижаются требования к устройствам этого типа, так как необходимо распознавать только два возможных состояния магнитного материала. При записи цифр применяются высокие скорости записи и считывания.

В частности, при использовании магнитных барабанов как быстродействующего оперативного запоминающего устройства скорости иногда достигают до 50 м/сек.

Устройство ввода служит для ввода информации в машину. В качестве устройств ввода применяют телеграфные аппараты, фотоэлектронные устройства, считывающие информацию с перфорированной ленты, и другие устройства, преобразующие статические коды (отверстия в перфоленте) в электрические импульсы. В настоящее время достигнуты высокие скорости ввода информации в машину — 100 ... 200 чисел в секунду.

Устройство вывода данных состоит из печатающего механизма, работающего под воздействием электрических импульсов. Результаты решения задачи в виде электрических импульсов, соответствующих двоичному или десятичному коду, включают соответствующие электромеханические приборы, например реле, которые и являются датчиками для печатающего механизма.

Применение. Вычислительные машины все шире и шире применяются в самых разнообразных областях человеческой деятельности: решение математических задач, переводы с одного языка на другой, управление производственными механизмами и управление сложными производственными предприятиями, управление автомобилями и самолетами и регулирование движения на дорогах, в воздухе и в море, прогнозы погоды, автоматизация средств связи и многие другие применения.

Применение вычислительных машин для целей автоматизации производства приведет к невиданному росту производительности труда. Сейчас трудно предсказать, к каким переменам в области производственной деятельности человека это приведет. В настоящее время ведутся широким фронтом разработки, которые в большей своей части носят характер исследования.

Разработки ведутся в двух направлениях. Первое направление — разработка автоматов с большим, но все же ограниченным числом закодированных сигналов. Такая система автоматического управления приводит к повышению производительности оборудования, но не меняет общего характера технологического процесса и не вызывает коренного изменения конструкции рабочих машин. Вычислительная машина используется как устройство, хранящее большой объем заранее заготовленной информации. В заранее установленное время выдаются управляющие сигналы сервомеханизмам, воздействующим на те или иные устройства станка. Логические свойства машины и ее вычислительные возможности используются только частично или вовсе не используются.

Второе направление — это использование вычислительных машин в качестве управляющих машин, осуществляющих оптимальное регулирование сложными системами. В этом случае в запоминающем устройстве машины хранится в закодированном виде информация, характеризующая технические возможности оборудования, осо-

бенности технологического процесса и общие требования к регулируемому процессу. По мере выполнения той или другой операции в машину поступает новая информация и вырабатываются команды, основанные на экстраполяционных расчетах, предопределяющих возможный ход процесса. Программа, хранящаяся в запоминающем устройстве машины, при помощи сервомеханизмов автоматически управляет технологическим оборудованием, вырабатывая в процессе выполнения элементов операции следующую команду. Эта новая команда формируется из необходимости обеспечить основное условие регулирования — минимальное отклонение от заданных условий, характеризующих оптимальное протекание процесса.

Примером использования вычислительных машин для управления металлорежущими станками является система, автоматизирующая работу сверлильно-расточного станка. Для управления этим станком требуется четыре вида информации: две координаты, определяющие положение отверстия, его глубина и диаметр. Программа автоматического управления станком была подготовлена следующим образом. На станке, управляемом оператором высокой квалификации, устанавливается устройство, которое переводит движение инструмента, включение станка, его остановку в информацию на бумажной ленте, пробивая в ней отверстия, соответствующие кодам вычислительной машины. Такая лента — программа управления — может быть размножена и использована для управления многими станками, изготовляющими ту же деталь. Такой способ подготовки программы обладает недостатком — программа содержит все движения оператора, в том числе и ненужные. Корректированная программа может быть получена из первоначальной исключением всех лишних операций. Такой метод управления дает возможность использовать обычные станки, оборудованные сервомеханизмами — электромагнитами, электродвигателями, реле.

Для изготовления деталей сложной формы — лопаток турбин и компрессоров был использован фрезерный станок, управляемый вычислительной машиной. Устройство управления позволяло перемещать фрезу по трем координатам. Профиль лопатки в каждом сечении определялся 40 точками, координаты которых вводились в машину вместе с программой. Непрерывный профиль воспроизводился режущим инструментом по данным, вырабатываемым вычислительной машиной. В системе была применена кубическая интерполяция, т. е. радиус-вектор r и угол θ вычислялись по формуле:

$$r(\theta) = r_0 \left(\frac{\Delta_{-1}^2}{2} - \frac{\Delta_{-1}^3}{6} \right) \theta + \frac{\Delta_{-1}^2}{2} \theta^2 + \frac{\Delta_{-1}^3}{6} \theta^3,$$

где

$$\Delta_0 = r_1 - r_0, \quad \Delta_{-1}^2 = \Delta_0 - \Delta_1, \quad \Delta_{-1}^3 = \Delta_0^2 - \Delta_{-1}^2,$$

r_0, r_1, \dots, r_n — введенные в машину в табулированном виде значения радиуса вектора. Такая систе-

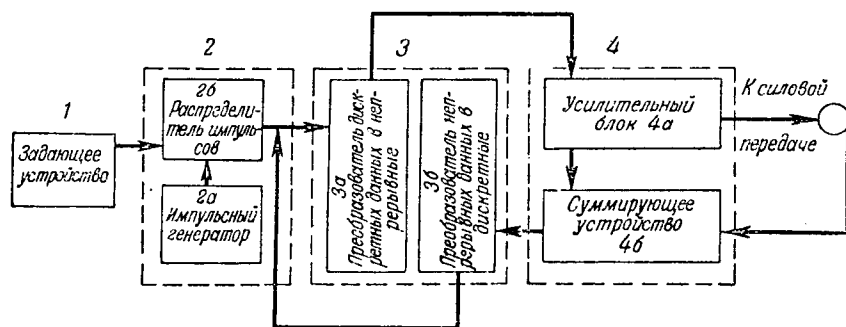


Рис. 9. Блок-схема функциональных элементов системы управления фрезерным станком.

ма обеспечивала выполнение заданного профиля с точностью 0,1%.

Программа управления станком записывается на перфоленте, магнитной ленте или магнитном барабане. Использование магнитных устройств дает возможность запоминать не только дискретные (цифровые) коды, но и непрерывно меняющиеся сигналы управления, представленные электрическими напряжениями.

В литературе указывается на возможность применения записи сигналов в импульсной форме с частотной модуляцией, а также фазомодулированных сигналов. Запись импульсов требует высокой однородности магнитного покрытия. Изъяны и неоднородности магнитного слоя при считывании дают паразитные импульсы, приводящие к ошибкам в работе системы. Сигналы, модулированные по фазе, нечувствительны к неоднородностям и дефектам магнитного покрытия. Однако такая форма записи связана с повышенным фоном, для освобождения от которого применяют специальные фильтры. Для систем с частотной модуляцией качество магнитного покрытия также не имеет значения. Преобразование входного сигнала в напряжение осуществляется обычным частотным детектором.

В Масачузетском технологическом институте в 1951 г. была разработана система управления вертикальным фрезерным станком, обрабатывавшим небольшие серии деталей авиационных двигателей. Три однотипные силовые системы синхронной связи управляли движением стола, головки и суппорта станка. Система автоматического управления состоит из устройств, выполняющих ограниченные функции. Блок-схема функциональных элементов показана на рис. 9. Задающее устройство 1 считывает программу с перфоленты и кодированные сигналы в виде электрических импульсов передает в блок 2. Этот блок состоит из импульсного генератора 2а, непрерывно с постоянной частотой выдающего сформированные импульсы в устройство 2б, которое в соответствии с преобразованными кодами задающего устройства отсекает ненужные импульсы и пропускает импульсы, соответствующие двоичному коду команд программы. Блок 3а преобразует двоичные коды в непрерывно меняющееся электрическое напряжение, поступающее в усилительный блок 4а.

Усиленные сигналы управляют силовой сельсинной передачей, передвигающей стол станка. Так же работают два других канала, управляющие передвижением головки и суппорта станка. Сигнал о выполнении команды рабочей машиной поступает в блок 4б, который сравнивает сигналы обратной связи с командными сигналами. Разность этих сигналов непрерывно поступает в блок 3б, преобразующий непрерывные сигналы в двоичные коды.

Программа, пробитая в двоичном коде на перфоленте, содержит координаты опорных точек, траектории фрезы и скорость перемещения обрабатываемой детали относительно фрезы. Скорость перемещения задается фиксированием момента времени, в которой фреза должна находиться в заданной точке, определяемой тремя значениями координат. В каждый интервал времени на входы трех каналов управления с выхода интерполирующего устройства поступают импульсы, соответствующие двоичным кодам координатных точек. Строгая синхронизация импульсов в трех каналах обеспечивает движение детали с необходимой точностью по данным программы. Сравнение входных данных с данными обратной связи происходит в импульсном счетчике. Из импульсов программы вычитаются импульсы обратной связи. До тех пор, пока разность остается положительной, команда продолжает выполняться. Когда разность становится равной нулю, команда программы выполнена и система переходит к выполнению следующей по порядку команды.

Устройство управления вертикально-фрезерным станком состоит из 250 электронных ламп и 175 реле. Рабочие органы станка управляются двигателями мощностью около 0,5 квт. Предельные габариты деталей, которые могут обрабатываться на этом стане, — $1\,500 \times 750$ мм. Максимальное отклонение размеров от заданных не превышает $\pm 0,005$ мм. По литературным данным, стоимость системы управления равна стоимости станка, а его производительность повышается в 3...4 раза.

Автоматизация процессов обработки на металлорежущих станках органичивается конструкцией станков и существующими методами текущих измерений обрабатываемой детали. Современные металлорежущие станки обеспечивают достаточную точность обработки при установленных режимах резания. Дальнейшее повышение производительности, которая может быть достигнута применением современных средств автоматизации и, в частности, применением вычислительных машин, требует повышения прочности станков, увеличения мощности, повышения виброустойчивости. Одновременно необходимо разрабатывать прямые методы измерения деталей в процессе обработки. Разработка измерений, основанных на применении фотоэлектрических устройств,

импульсных и других методов, должны обеспечить такие методы измерения текущих размеров, которые дают возможность вводить результаты измерения в управляющую систему, вырабатывающую команды, корректирующие технологический процесс в ходе его выполнения.

Успехи в разработке вычислительных машин позволили перейти к решению проблем полной автоматизации заводов, цехов, электростанций и энергосистем. Внимание исследователей и инженеров в первую очередь привлекают производства с непрерывным процессом. К ним, в первую очередь, относятся нефтеперегонные заводы, химические производства, электростанции. Эти предприятия находятся на более высоком уровне автоматизации и, кроме этого, отличаются непрерывным потоком поступающего сырья, полуфабрикатов, готовой продукции. Отдельные агрегаты и процессы автоматически управляются регуляторами. Задача полной автоматизации таких производств заключается в разработке системы, координирующей работу отдельных регуляторов и изменяющей ход процесса в зависимости от качества поступающего сырья и качества конечного продукта. Одним из условий, необходимых для решения задачи полной автоматизации, является непрерывный контроль за ходом процесса. Для этого, в частности, применяются масс-спектрометры, производящие большое число анализов в единицу времени. Разработано устройство, состоящее из масс-спектрометра и преобразователя непрерывных данных в цифровую форму и устройство, подготовляющее данные для ввода их в вычислительную машину. Известны и другие приборы, используемые для непрерывного анализа потоков сырья, полуфабрикатов и готовой продукции, как, например, инфракрасный спектрометр, гамма-счетчики, определяющие концентрацию и состав проходящих потоков по количеству радиоактивных изотопов, заранее введенных в систему.

Непрерывный поток информации о ходе процесса в отдельных секциях перерабатывается в вычислительной машине в команды. Регуляторы, управляющие отдельными агрегатами, под воздействием этих команд изменяют в нужном направлении скорость подачи сырья, его концентрацию, длительность протекания реакции, температуру и т. д. Вычислительная машина вырабатывает команды в соответствии с имеющимися в ее запоминающем устройстве критериями оптимального регулирования. Программа, введенная в машину, содержит данные для относительной оценки результатов выполнения отдельных команд, и заранее заготовленные подпрограммы, вырабатывающие в процессе работы новые команды, учитывающие изменения процесса производства.

Мощные гидроэлектрические станции управляются автоматически в соответствии с заранее установленным режимом. Изменение режима нагрузки или изменение водного режима требует вмешательства оператора, находящегося на цен-

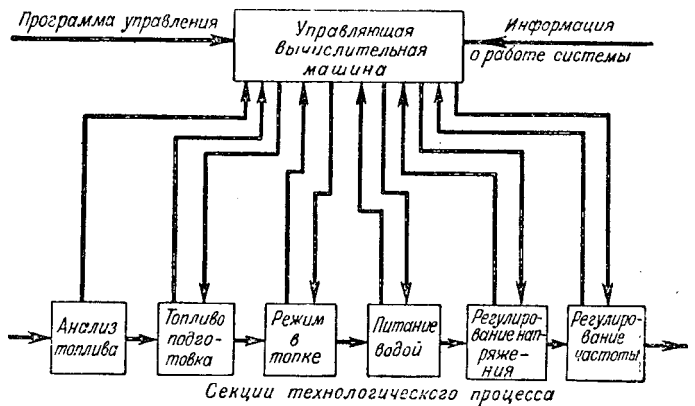


Рис. 10. Функциональная блок-схема автоматического управления непрерывным процессом.

тральном диспетчерском пункте. На тепловых электростанциях давно применяется автоматическое управление отдельными агрегатами, что дает значительный эффект. Автоматическое поддержание определенного режима в топках осуществляется регулированием относительного содержания угольной пыли и воздуха в топливе, регулированием дутья; подача воды в котлы в зависимости от нагрузки регулируется воздействием на питательные системы; постоянство частоты и напряжения поддерживают регуляторы напряжения и частоты, воздействуя на регуляторы турбины и возбуждение генераторов в зависимости от изменения нагрузки. Все эти регуляторы работают независимо друг от друга. Функции оператора сводятся к наблюдению по приборам за работой агрегатов и регуляторов. В тех случаях, когда по каким-либо причинам нарушается нормальный режим работы, оператор, в соответствии с имеющимися у него инструкциями и опытом, устанавливает новый режим. Функции оператора может выполнять вычислительная машина. Ее участие в регулировании процесса определяется теми правилами и инструкциями, которые в кодированной форме заложены в программу. В пределах этих инструкций машина будет выполнять работу управления быстрее, чем оператор, и если ее устройства работают достаточно надежно, то и безошибочно. В тех случаях, когда сложившаяся ситуация не предусмотрена инструкциями, машина подает сигнал и прекращает работу. На рис. 10 представлена структурная схема, которая может быть применена для управления рядом регуляторов. Больше того, если инструкция-программа, введенная в машину, содержит данные о важности тех или иных потребителей, тарифах и штрафах, то машина будет решать задачу регулирования и даже отключения нагрузки при перегрузках и аварийных режимах. Такая система была опробована в США и дала весьма обнадеживающие результаты.

Применение вычислительных машин для полной автоматизации производственных процессов требует во многих случаях коренной перестройки технологии. Фирма GEC в течение ряда лет работала над задачей полной автоматизации работ по монтажу радиоустройств. По имеющимся дан-

Быстродействующая электронная вычислительная машина М-2¹

Член-корр. АН СССР Н. С. БРУК

Энергетический институт им. Кржижановского АН СССР

Последнее десятилетие характеризуется интенсивным развитием в области автоматических цифровых вычислительных машин.

Первая цифровая электронная вычислительная машина, построенная во время войны, предназначалась для решения военных задач — преимущественно баллистических. Полученные тогда результаты и опыт, а также выявленные возможности широкого применения этих машин в мирных целях открыли автоматическим быстродействующим вычислительным машинам доступ в ряд областей, далеко отстоящих от круга задач чисто вычислительного характера в их обычном представлении.

В научных и технических приложениях роль вычислительных машин значительно возросла благодаря ряду усовершенствований как в самой конструкции машин, так и в способах их применения. В связи с появлением современной вычислительной машины завоевывает признание тенденция использовать при конструировании и сооружении новых объектов расчетные методы вместо применявшейся прежде почти исключительно методики экспериментальных «последовательных приближений».

Значительная экономия времени и средств, достигаемая в результате применения новых методов, стала реальной благодаря использованию автоматических вычислительных машин. Число инженеров, математиков и физиков, которые пользуются услугами этих машин, быстро растет, и трудно предвидеть, наступит ли здесь «насыщение».

В настоящее время в мире используются несколько тысяч электронных машин различной конструкции.

В Советском Союзе давно оценили значение вычислительных машин для развития науки и техники. Разработкой этих машин и применением их в различных областях занят ряд научных и

промышленных организаций. В Энергетическом институте Академии наук СССР (ЭНИИ) — пионере в деле развития вычислительной техники в СССР — работы по созданию цифровых машин были начаты в 1947 г. По ряду внешних причин эти работы не получили должного развития до середины 1950 г. Весной 1952 г. в лаборатории электрических систем ЭНИИ была закончена наладка первой в Советском Союзе малогабаритной электронной автоматической цифровой вычислительной машины М-1. Опираясь на полученный опыт, в 1952 г. лаборатория приступила к разработке второй конструкции машины (М-2). Изготовление и монтаж машины М-2 были закончены к декабрю 1952 г. В конце 1954 г. схема М-2 подверглась модернизации, после чего машина была снова введена в эксплуатацию.

Машина М-2 имеет немногим более 1 600 электронных ламп и выполняет до 3 000 арифметических действий в секунду с десятизначными числами. Сравнительно небольшое число электронных ламп и малые размеры машины — результат применения новых схем и полупроводниковых элементов. Достаточно сказать, что первая электронная вычислительная машина, построенная в США в 1943 г., имела 18 000 электронных ламп.

У нас в настоящее время существуют машины, имеющие 6 000 ... 8 000 ламп и быстродействие до 7 000 операций в секунду.

Скорость выполнения арифметических действий есть важный показатель машины. Но дело, разумеется, не только в быстрой вычислительности. Скорость «во что бы то ни стало» не может служить единственной целью при создании вычислительных машин. Стоимость, размеры машины, количество обслуживающего персонала и надежность в значительной мере определяются числом структурных ячеек машины — числом электронных ламп. Если быстродействие при прочих равных условиях достигнуто за счет увеличения числа электронных ламп, то такое решение не является прогрессивным. Например, вместо одной

¹ Доклад на годовом общем собрании Отделения технических наук Академии наук СССР 1 февраля 1956 г.

ным, в 1955 г. запущено экспериментальное производство радиоблоков. Это производство коренным образом отличается от привычных радио-монтажных цехов. Монтаж производится на плоских изоляционных панелях. Монтажные провода заменены печатными линиями из проводящей краски, вместо ламп применяются кристаллические приборы, малогабаритные емкости и сопротивления «пришиваются» к основной монтажной панели. Сложные схемы, где невозможно выполнить монтаж без пересечения соединительных линий, выполняется в нескольких плоскостях. Таким образом, перестроив коренным образом производство, удалось полностью автоматизировать технологию, которая повсеместно неразрывно связывалась с применением ручного труда.

Большие и сложные задачи стоят не только перед технологами. Конструкторы вычислительных машин должны решить ряд задач и в первую очередь задачу существенного повышения надежности работы. Во всяком случае ясно, что применение вычислительных машин в промышленности приведет к созданию новых высокопроизводительных фабрик и заводов, выпускающих потоки продукции. Сегодня трудно переоценить значение этого нового направления автоматизации.

Литература

1. Mechanical Engineering, т. 76, № 6, 1954.
2. Machinery, т. 60, № 7, 1954.
3. Computers and Automatics, т. 3, № 3, 1954.

[14. 5. 1956]



из известных больших машин можно было бы при тех же затратах соорудить 5 машин М-2, которые вместе дали бы значительно более высокую производительность.

Обычно при решении какой-либо задачи рассматриваются различные варианты. Если таких вариантов много и необходимо получить ответ быстро, то можно выполнить вычисления при одновременной работе нескольких машин.

Время от времени вычислительная машина подвергается ревизии или ремонту. При наличии одной машины это влечет полную остановку работы, а при нескольких — лишь незначительное снижение производительности вычислительного центра.

Автоматические вычислительные машины нужны также в таких конструкторских бюро, исследовательских и учебных институтах, потребности которых могут быть удовлетворены и одной машиной, даже не обладающей рекордным быстродействием.

Наконец, исключительные возможности открываются при работе ансамбля машин над одной задачей. Эти соображения и были положены нами в основу разработки универсальной машины М-2. Машина позволила решить важные и сложные задачи из разных областей науки и техники. На этой машине решалась, например, задача определения устойчивости гидротехнических сооружений. Для анализа каждого из рассматривавшихся вариантов требовалось около 9 час работы машины. При этом нельзя было допустить ни одной ошибки или «сбоя». В процессе решения каждого варианта задачи машина выполняла более 50 млн операций. На машине решалась задача, связанная с созданием подпятников для гидротурбин. Можно отметить еще вычисление обширных таблиц присоединенных полиномов Лежандра (печатается в издательстве АН СССР), задачи из области реактивной техники и ядерной физики, металлургии, радиотехники и др.

Общее описание машины. Как и все автоматические вычислительные машины, машина М-2 воспроизводит действие человека, пользующегося арифмометром и инструкциями, в которых предусмотрены все операции. Задача, подлежащая решению на машине, должна быть приведена к определенной последовательности арифметических и логических действий, т. е. должен быть разработан алгоритм решения ее арифметическими методами. Этот алгоритм, раздетализованный в виде некоторой последовательности инструкций, по которым машина выполняет весь процесс вычисления, начиная от исходных данных и кончая фиксацией результатов, называется программой.

В общих чертах устройство машины М-2 может быть описано при помощи блок-схемы (рис. 1).

В машине имеется арифметическое устройство, в котором автоматически выполняются действия над вводимыми в него числами; имеется «запоминающее устройство», хранящее в своих пронумерованных

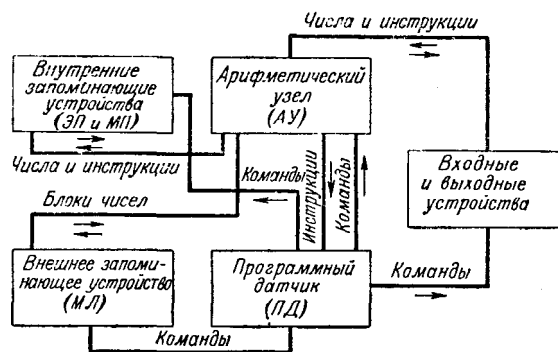


Рис. 1. Блок-схема электронной вычислительной машины М-2.

ячейках числа, над которыми необходимо выполнять арифметические (или логические) действия, а также результаты предыдущих этапов вычисления, если они потребуются в дальнейшем. Номер ячейки составляет ее «адрес». В М-2 имеется внутреннее (оперативное) запоминающее устройство на электроннолучевых трубках емкостью 512 ячеек и другое такой же емкости, но выполненное в виде магнитного барабана. Кроме того, имеется внешнее запоминающее устройство в виде магнитной ленты. Устройство машины предусматривает возможность использования четырех лент. Сейчас используется одна, емкостью около 50 000 чисел.

При такой «эшелонированной» памяти можно заполнять по мере надобности внутреннее запоминающее устройство новой информацией, что крайне важно при решении задач, требующих большого количества исходных данных.

В запоминающем устройстве хранятся инструкции, в соответствии с которыми выполняются вычисления. Это стало в настоящее время общепринятым в универсальных машинах, хотя в первых машинах это было не так. Инструкция по внешнему виду ничем от числа не отличается.

Нормально инструкции извлекаются из последовательных ячеек хранилища и передаются в программный датчик (блок управления), где они расшифровываются и превращаются в электрические сигналы — «команды», воздействующие на различные органы машины. Иногда, если это требуется по ходу вычислений, инструкции направляются, как и числа, в арифметическое устройство, где над ними могут выполняться операции, в результате которых происходит преобразование инструкций, т. е. изменение их смысла. Преобразование инструкций в самой машине — важное усовершенствование вычислительных машин, которое придало им универсальность и обеспечило их высокую производительность.

Исходные данные — числа и инструкции (программа) — готовятся заранее и наносятся в виде кода на бумажную ленту путем пробивки на ней отверстий (рис. 2), как при телеграфировании. Ввод исходных данных осуществляется посредством имеющегося в блоке «входные и выходные устройства» фототрансмиттера, который пропускает бумажную ленту со ско-

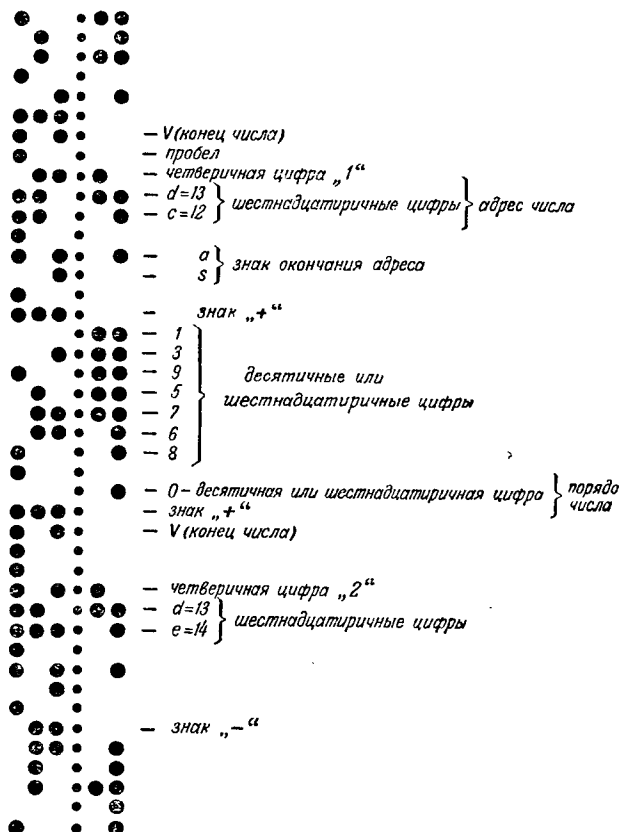


Рис. 2.

ростью 1 м/сек (рис. 3). Имеется также и обычный электромеханический телеграфный трансмиттер. Исходные данные можно вводить и с магнитной ленты, а мелкие исправления — вносить от руки при помощи клавишного устройства на пульте управления.

Обычно готовятся две ленты: одна — числовая, другая — программная. Чис-

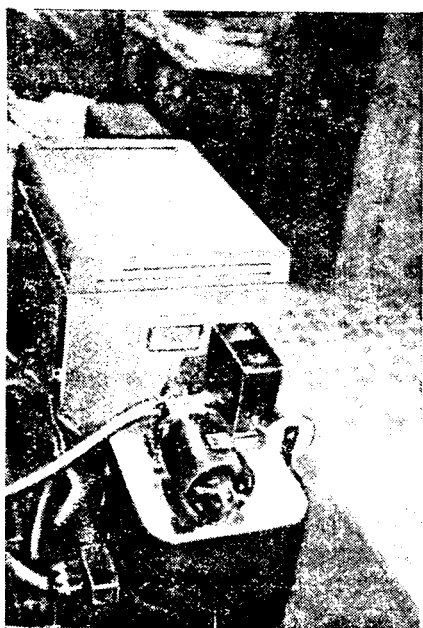


Рис. 3. Фототрансмиттер для ввода данных в машину М-2.

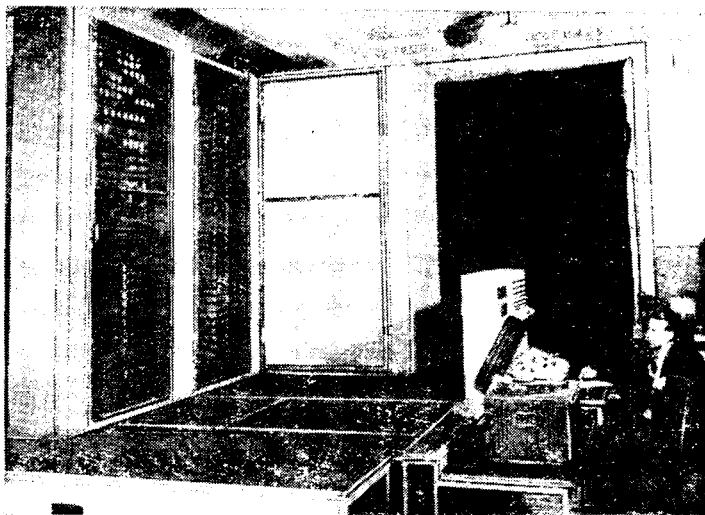


Рис. 4. Общий вид электронной вычислительной машины М-2.

ловая лента содержит числовые данные для нескольких конкретных задач, программная содержит инструкции для всех задач данного типа. Поэтому программа, будучи составлена один раз, может в дальнейшем многократно использоваться.

В процессе эксплуатации машины накапливается большое число программ, из которых составляет своего рода «библиотека». Если программы из этой библиотеки записать на магнитной ленте, то, пользуясь каталогом, в котором собраны опознавательные коды программ, их можно извлекать при помощи машины. Составляя программу новой задачи, в которой используются уже имеющиеся в библиотеке программы, достаточно составить организующую (собирающую) программу, в которую войдут в определенной последовательности лишь опознавательные коды готовых программ. Читая магнитную ленту («библиотеку»), машина соберет на другой

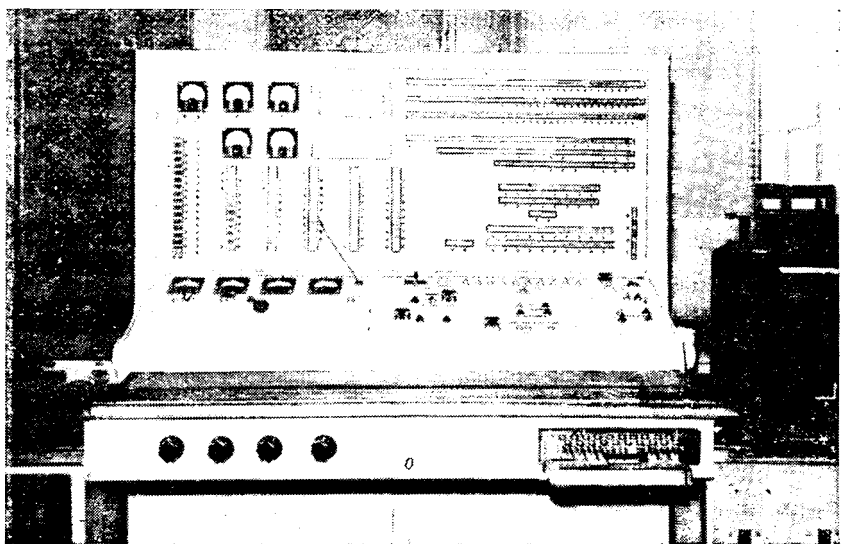


Рис. 5. Пульт управления машины М-2.

ленте программу для данной задачи. Таким образом автоматизируется и составление программ. Автоматизация может быть доведена до такого уровня, когда понятная машине символика будет мало отличаться от математической. Результаты вычисления выводятся на магнитную ленту или печатаются непосредственно.

Общий вид машины М-2 и пульта управления показаны на рис. 4 и 5.

Представление чисел и инструкций. В машине М-2 используется двоичная система представления чисел для всех операций внутри машины. Задание и результаты вычислений — в общепринятой десятичной системе. Переход от одной системы к другой выполняется самой машиной автоматически. Количество двоичных разрядов числа равно 34, из которых один служит для алгебраического знака.

В отличие от других машин, в машине М-2 используется двойное представление чисел. Машина выполняет действия над числами с плавающей запятой в диапазоне от четырех десятиллиардных до 2,5 миллиарда и над числами с фиксированной запятой от одной десятиллиардной до единицы.

Числа с плавающей запятой представляются в виде:

$$\alpha = 2^m \cdot A, \quad 1 > |A| \geq \frac{1}{2},$$

где A — мантисса числа, а m — его порядок ($31 \geq m > -31$).

Мантисса занимает 28 двоичных разрядов, из которых один — разряд ее алгебраического знака, а другой — разряд целых, содержащий всегда ноль.

Таким образом,

$$A = \pm \left(\frac{1}{2} + \sum_{k=2}^{26} a_k 2^{-k} \right); \quad a_k = 0; 1.$$

Ноль изображается как $2^{-32} \cdot 0$. Фактически в машине используется условный порядок:

$$a = m + 32 \quad (63 \geq a \geq 1).$$

Это сделано для того, чтобы порядки всех чисел были одного знака.

Таким образом,

$$\alpha = 2^{a-32} A.$$

Числа, мантисса которых $1 > |A| \geq \frac{1}{2}$, называются нормализованными и только в таком виде хранятся в запоминающем устройстве.

Использование разрядов при операциях с фиксированной запятой

Номер разряда	1	2	3	...	29	30	31	32	33	34												
Назначение	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	...	2^{-29}	2^{-30}	2^{-31}	2^{-32}	2^{-33}	\pm												
$A = \pm \sum_{k=1}^{33} a_k \cdot 2^{-k}; a_k = 0; 1.$																						
Использование разрядов при операциях с плавающей запятой																						
$\alpha = 2^{a-32} \cdot A,$																						
$\alpha = 2^{a-32} \pm \left(\frac{1}{2} + \sum_{k=2}^{36} a_k \cdot 2^{-k} \right); a_k = 0; 1.$																						
Номер разряда	1	2	...	5	6	7	8	...	32	33	34											
Назначение	2^6	2^4	...	2^1	2^0	2^0	2^{-1}	...	2^{-26}	2^{-26}	\pm											
	Порядок a					Мантисса A																
3-адресная инструкция																						
Номер разряда	1	2	3	...	9	10	11	12	13	...	19	20	21	22	23	...	29	30	31	32	33	34
Назначение 3-й адрес					2-й адрес					1-й адрес					Код операции							

Рис. 6.

Числа с фиксированной запятой представляются в виде

$$A = \pm \sum_{k=1}^{33} a_k \cdot 2^{-k}; \quad a_k = 0; 1.$$

Наибольшее число равно $1 - 2^{-33}$, а наименьшее — 2^{-33} . Использование имеющихся 34 двоичных разрядов в обеих системах представления чисел показано на рис. 6.

Входные устройства машины М-2 позволяют вводить как числа в двоичной, так и в десятичной (бинарно-кодированной) форме. В последнем случае каждому десятичному разряду отводится четыре двоичных.

Вывод также возможен в обоих представлениях. При этом бинарно-кодированные числа переводятся в десятичное представление печатающим устройством — телетайпом. Перевод из бинарно-кодированной формы в двоичную чисел с фиксированной запятой производится путем умножения сначала четверки младших двоичных разрядов на $\frac{16}{10}$, прибавления к результату следующей четверки разрядов и умножения результата снова на $16/10$ и т. д. Вместо умножения на $16/10$ нужно, разумеется, делить на $10/16$, так как числа с фиксированной запятой меньше единицы. Преобразование чисел с плавающей запятой сводится к преобразованию мантиссы и порядка точно.

Операция	3-й адрес	2-й адрес	1-й адрес	Код операции	Примечание
Арифметические операции					
Сложение с фиксированной запятой	a	b	c	31ф и 23	$(b + c) \rightarrow a$
Сложение с плавающей запятой				31п	$(b + c) \rightarrow a$
Вычитание с фиксированной запятой				31ф и 22	$(b - c) \rightarrow a$
Вычитание с плавающей запятой				30п	$(b - c) \rightarrow a$
Умножение с фиксированной запятой				21ф	$(b \cdot c) \rightarrow a$
Умножение с двойной точностью с фиксированной запятой $b \cdot c = m + n \cdot 2^{-20}$				2фд	m — старшие разряды произведения $\rightarrow (a + 1)$ n — младшие $\rightarrow a$
Умножение с плавающей запятой				21п	$(b \cdot c) \rightarrow a$
Деление с фиксированной запятой				20ф	$(b : c) \rightarrow a$
Деление с сохранением остатка с фиксированной запятой				20фд	частное $\rightarrow a$ остаток $\rightarrow (a + 1)$
Деление с плавающей запятой				20п	$(b : c) \rightarrow a$

Рис. 7а.

Машина М-2 использует трехадресную систему программирования. Назначение 34 двоичных разрядов инструкции показано на рис. 6. 1-й и 2-й адреса инструкции указывают обычно номера ячеек внутреннего запоминающего

устройства, из которых извлекаются числа, а 3-й адрес — номер ячейки для результата действия. Инструкции кодируются в четверичной системе. Адрес — пятиразрядным четверичным числом, а операция — двухразрядным.

Программирование на машине М-2 сводится к составлению последовательности инструкций при помощи кода операций (рис. 7а и б). Всего в настоящее время в машине имеется 20 операций. Имеются четыре арифметических действия для чисел с фиксированной и плавающей запятой, умножение с выводом младших разрядов (двойная точность), деление с выводом остатка. Имеются логические операции — умножение, сравнения, операции, связанные с управлением устройствами ввода и вывода, и другие. Особо следует отметить операцию «переключение». Она позволила расширить число «встроенных» операций машины. При четырех двоичных разрядах, отведенных для кода операций, можно было иметь их только 16. После выполнения операции «переключение», в зависимости от того, что указано во втором адресе инструкции, следует переход с «плавающих» операций на «фиксированные», переход на действия с двойной точностью.

Несколько замечаний об инструкциях, управляющих устройствами ввода и вывода.

На месте первого адреса указывается номер устройства ввода. Используются два младших разряда, чему соответствует возможность выбора одного из четырех устройств. Если это перфолента, то ввод происходит по второму адресу инструкции в том случае, когда не указан адрес на самой перфоленте, в противном случае — по адресу на перфоленте. Если ввод происходит с магнитной ленты, то она запускается в прямом

Операция	3-й адрес	2-й адрес	1-й адрес	Код операции	Примечание
Логические и служебные операции					
Сравнение по модулю	Адрес следующей инструкции $ b < c $	b	c	13	$ b \geq c $
Сравнение алгебраическое	Адрес следующей инструкции, если $b < c$			12	$b \geq c$
Логическое умножение	a			33	$b \wedge c \rightarrow a$
Подбор знака				32	$b \text{ sign } c \rightarrow a$
Перенос	Адрес следующей инструкции	Куда	Откуда	10	
Ввод			Номер вводного устройства	02	
Вывод		Откуда	Номер выводного устройства	03	
Перемотка ленты		—	Вид перемотки, вперед или назад	01	
Переключение		Тип переключения	Адрес следующей команды	00	
Стоп				11	

Рис. 7б.

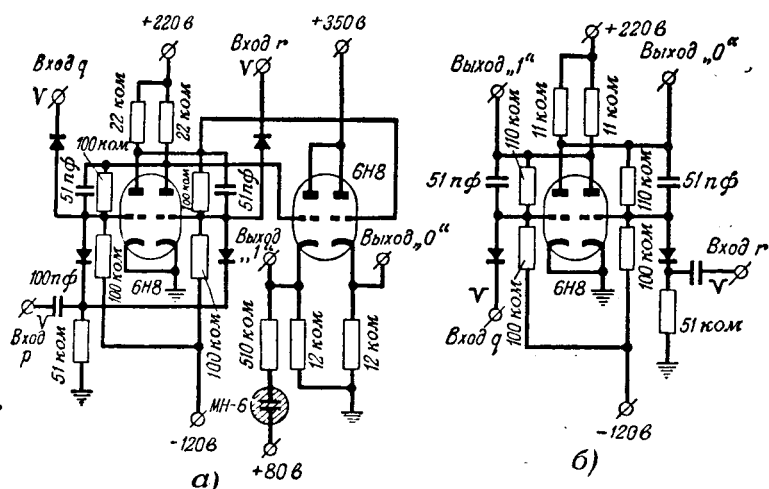


Рис. 8. Два типа триггеров, используемых в машине М-2.

направлении, и 16 чисел записываются по 16 адресам внутреннего запоминающего устройства, начиная со второго адреса инструкции. После этого лента останавливается. Можно ввести сразу и 512 чисел или любое количество, меньшее 512, но так, чтобы заполнялись последние адреса электростатического запоминающего устройства. Аналогично протекает и операция вывода на магнитную ленту. Операция перемотки магнитной ленты применяется при поиске на ленте. Перемотка вперед или назад идет на один блок в 16 чисел. Если нужно больше блоков, операция повторяется.

Извлечение корня, логарифмирование, вычисление тригонометрических и других функций, интерполирование и т. д. выполняются при помощи заранее заготовленных подпрограмм, которым на время передается управление вычислительным процессом. После окончания вспомогательных вычислений управление снова передается основной программе.

Элементы схем. Машина М-2 составлена из большого числа элементов, часть которых имеет совершенно одинаковое устройство. Они выполнены в виде взаимозаменяемых блоков, в большей части — трехламповых.

В машине используются триггеры и различные логические схемы, составленные из полупроводниковых диодов и сопротивлений. Применяются триггеры двух типов (рис. 8). Триггеры с катодными повторителями используются главным образом в регистрах арифметического устройства. Они малочувствительны к понижению эмиссии. Триггеры без катодных повторителей имеют более высокую рабочую частоту и используются в блоке регенерации электронной памяти и в регистре «переноса» арифметического узла. Запуск триггеров — по сеткам через диоды.

Логические схемы или дешифраторы, как их принято называть у нас, служат для по-

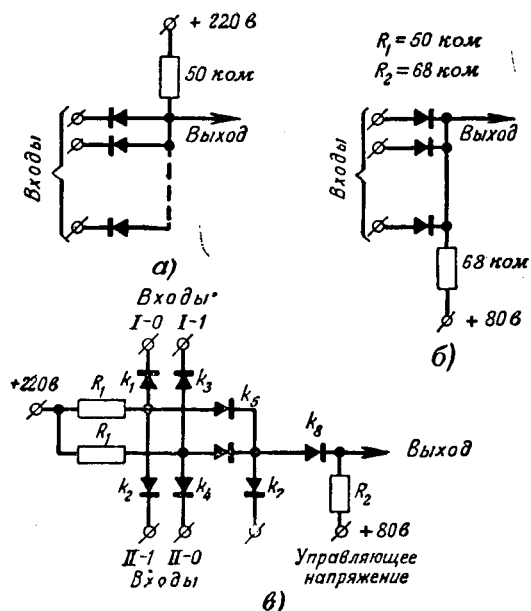


Рис. 9. Диодные логические схемы, используемые в машине М-2.

а — дешифратор «и»; б — смеситель «или»; в — дешифратор несоответствия.

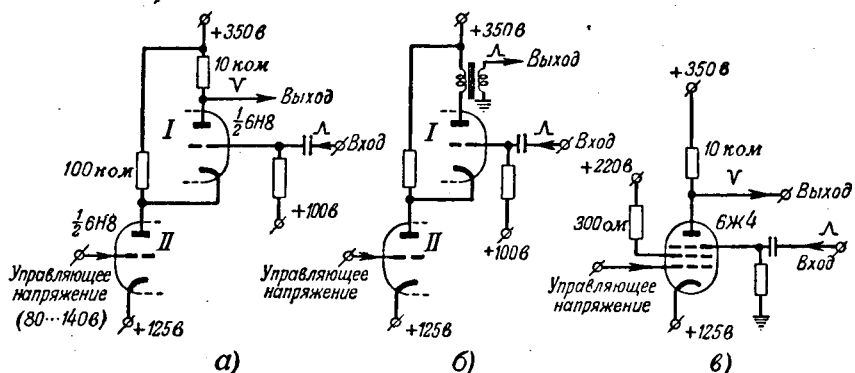


Рис. 10. Клапаны, применяемые в машине М-2.

лучения управляющего напряжения при выполнении определенных условий. В машине применяются диодные дешифраторы нескольких типов (рис. 9). Кроме дешифраторов, применяются еще «клапаны». Так же как и дешифраторы, они реализуют логическую операцию «и». В отличие от дешифраторов на один из выходов клапана подается короткий импульс (1 ... 2 мксек). Поэтому клапаны служат главным образом для формирования импульсов.

На рис. 10 и 11 показаны различные схемы клапанов, а также комбинированные клапанные схемы, используемые в машине. Большинство клапанов выполнено на двойных триодах 6Н8. На сетку «нижней» лампы подается управляющее напряжение (обычно выход диодных дешифраторов), а на сетку «верхней» лампы — положительный импульс. Выход — с сопротивления или трансформатора. Применяются в ограниченном количестве и пентодные клапаны.

Все элементы машины конструктивно оформлены в виде субблоков с разъемами штепсельного типа (рис. 12).

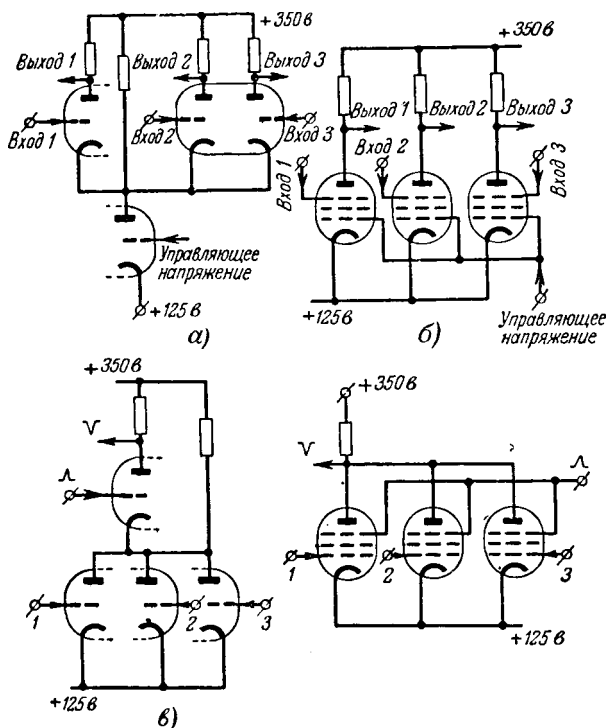


Рис. 11. Комбинированные клапанные схемы.

а — схема с тремя верхними триодами; б — аналогичная схема на пентодах; в — схема с тремя нижними триодами или пентодами (рядом справа)

Арифметическое устройство. Арифметическое устройство машины состоит из трех основных регистров *A*, *B*, *C* и одного вспомогательного регистра *E*. Регистр представляет собой группу соответствующим образом соединенных триггеров, предназначенных для хранения чисел, над которыми производятся арифметические действия. Число триггеров равно числу двоичных разрядов — 33. В основных регистрах имеется еще разряд знака.

Назначение регистров при выполнении действия следующее: при выполнении сложения слагаемые устанавливаются в *B* и *C*, а сумма образуется в *B*. Вспомогательный регистр *E* служит для запоминания единиц двоичного переноса из младших разрядов в старшие. При выполнении умножения множитель хранится в *A*. При делении в *A* образуется частное. Произведение образуется в *B*, как сумма частных произведений. Делимое принимается в *B*, а делитель — в *C*.

В соответствии с этим регистры *A* и *B* имеют устройство для сдвига чисел вправо и влево, регистр *C* — только для сдвига вправо. Кроме того, в регистрах *B* и *C* предусмотрена возможность образования дополнения числа, т. е. замена единиц нулями и, наоборот, с добавлением единицы в младшем разряде.

Так как арифметическое устройство выполняет действия над числами с плавающей и фиксированной запятой, то первые 6 старших разрядов регистров *A*, *B* и *C* используются для порядков чисел, а остальные (7 ... 33) — для мантиссы. Все разряды регистров за исключением 1, 33 и 6, 7; 31; 32 одинаковы. При вычислении с фиксирован-

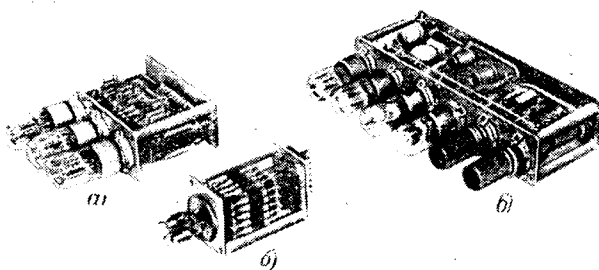


Рис. 12. Стандартные субблоки машины М-2.

а — триггер, клапан, катодный повторитель; б — усилитель канала чтения магнитного запоминающего устройства; в — дешифратор.

ной запятой используются полностью все 33 разряда.

Блок-схема среднего разряда мантиссы регистров *A*, *B*, *C* и *E* показана на рис. 13. Регистр *A* служит для приема чисел из внутреннего и внешних запоминающих устройств, а также для выдачи результатов. При связи с внутренним запоминающим устройством числа передаются параллельно, т. е. по всем разрядам одновременно, при связи с внешним запоминающим устройством — последовательно.

Рассмотрим, например, как осуществляется сдвиг влево (регистр *A*). От дешифратора несоответствия Δ_n через смеситель *C* (схема «или») подается управляющее напряжение на нижнюю сетку клапана *K* в том случае, когда цифры в разряде *N* и смежном младшем ($N+1$) не одинаковы и когда на вход Δ_n подан прямоугольный широкий импульс «сдвиг влево» от управляющей шины. Если указанные условия выполнены, то импульс тактирующего генератора, поданный на сетку верхней лампы, вызовет появление выходного импульса клапана, который и перебросит триггер *T*. Точно так же осуществляется сдвиг вправо. В этом случае используется другой дешифратор Δ_n , подключенный к *N* и $N-1$ -му разрядам. При помощи других дешифраторов («и») осуществляется также передача из *A* в *B* и *C*, а также из *B* в *A*.

Один из выходов дешифраторов, при помощи которых выполняются операции передачи из регистра в регистр, присоединен к общей для данного регистра шине, на которую подается управляющий сигнал из главного программного датчика (180 в).

Рассмотрим теперь, как выполняется суммирование — элементарная и основная операция для всех арифметических действий.

Суммирование производится в два шага. При первом шаге образуются единицы двоичного переноса, которые запоминаются в *E*. При втором шаге производится поразрядное суммирование трех цифр (двух цифр слагаемых и единицы двоичного переноса). Это позволяет обнаружить, получается ли сумма двух чисел больше или меньше единицы еще до замены слагаемого в *B* суммой. Для этой цели команды и сигналы «выдача суммы» подаются на дешифратор Δ_n в ре-

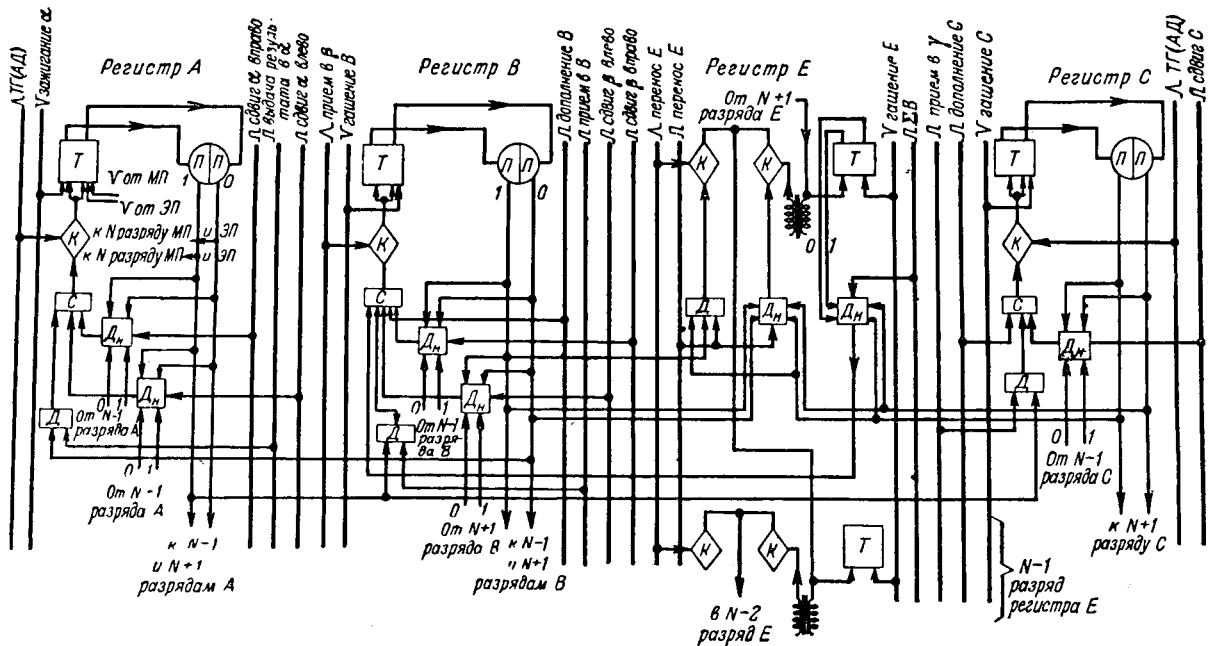


Рис. 13. Блок-схема N -го разряда мантиссы ($N = 8, 9, 10, \dots, 30$).

гистр *Е*. Передача единицы двоичного переноса (пробег) осуществляется при помощи клапанной схемы с трансформаторной связью и занимает всего около 3,5 мксек.

При сложении (вычитании) чисел с плавающей запятой самой операции сложения предшествует уравнивание порядков слагаемых и соответственно сдвиг одной из мантисс. Результат затем приводится к нормальной форме. Процесс сложения протекает только в разрядах мантиссы.

Умножение получается путем последовательного суммирования множимого (если в данном

разряде нет множителя единицы) с суммой частных произведений (в B), сдвигаемых вправо при каждом шаге. Младшие разряды произведения оказываются в регистре A и используются, когда требуется результат с двойной точностью. При делении процесс протекает в обратном порядке. Остаток деления образуется в B и может быть выдан при выполнении операции двойной точности — «деление с выдачей остатка».

Внешний вид арифметического устройства показан на рис. 14. Нумерация разрядов снизу вверх (от старших к младшим). Слева направо — регистры: *C*, *E*, *B*, *A*. В верхней части шкафа — катодные повторители, питающие шины управления арифметического узла.

Электростатическое запоминающее устройство. Отличительной особенностью машины М-2 является также ее «запоминающее устройство». Оно выполнено из обыкновенных электроннолучевых трубок, применяемых в осциллоскопах. Эти трубки (13Л037) изготавливаются в массовом производстве, отличаются устойчивыми характеристиками, долговечностью и невысокой стоимостью. В машине имеются некоторые трубки, находящиеся в работе с 1952 г. Запоминание осуществляется в виде зарядов, расположенных на экране трубки в форме точек и черточек, соответственно двум цифрам — «ноль» и «единица». Длительность запоминания сама по себе мала и составляет десятые секунды. Однако за это время электронный луч успевает несколько раз оббежать экран и регенерировать запись. Благодаря этому числа и инструкции, будучи однократно записаны, могут храниться неограниченно долго, пока не будут заменены новыми.

Из точек и черточек составлен растр в $16 \times 32 = 512$ элементов. 16 строк не заполняют всю поверхность экрана. Имеется еще неисполь-

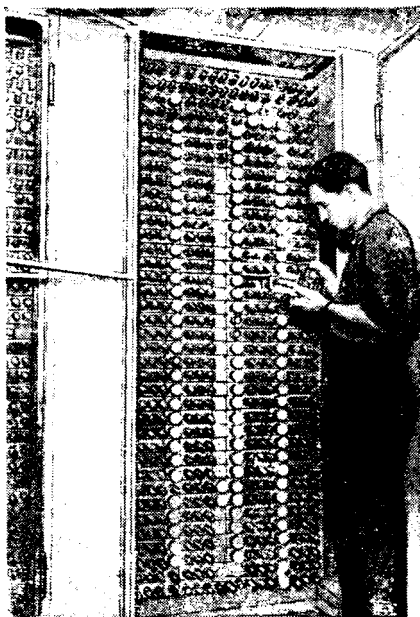


Рис. 14. Внешний вид шкафа арифметического устройства (АУ).

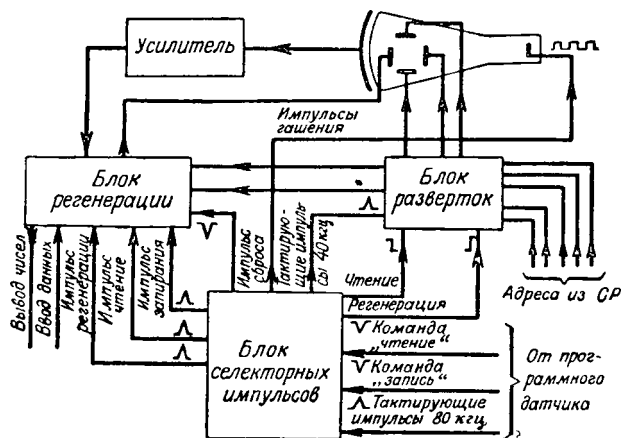


Рис. 15. Блок-схема электростатического запоминающего устройства.

зованная возможность увеличения емкости до $1,5 \times 512 = 768$ элементов.

Запоминающее устройство — параллельное. Выборка данных и ввод новых происходят одновременно во всех 34 трубках — разрядах. Выбор одного из элементов раstra одновременно во всех трубках для «записи» или «чтения» задается отклоняющим напряжением, которое формируется из адреса в инструкции. Адрес — девять двоичных разрядов, из которых 4 дают номер строки раstra, а 5 разрядов — для определения положения элемента в строке. Отклоняющие напряжения формируются в общем блоке разверток путем суммирования напряжений, относящихся как $16:8:4:2:1$ — для «столбца» и $8:4:2:1$ — для «строки» с весом «0» или «1».

«Точка» записывается сфокусированным лучом. Для получения черточки на одну вертикальную отклоняющую пластину подается кроме основного напряжения, соответствующего номеру строки, небольшое напряжение высокой частоты (около 2 мГц). «Чтение» производится всегда модулированным лучом (черточкой). Если в данном месте экрана была черточка (единица), то сигнал, который будет обнаружен на «сигнальной пластине», наложенной снаружи на экран, будет незначителен. Если же была записана «точка» (ноль), то на сигнальной пластине появится сигнал. Это явление можно использовать для регенерации, произведя снова запись сфокусированным лучом.

Блок-схема электростатического запоминающего устройства показана на рис. 15. Оно состоит из 34 одинаковых ячеек. В каждую ячейку входят усилитель и блок регенерации. Три возможных режима — регенерации, записи или чтения — задаются блоком селекторных импульсов. Запоминающее устройство нормально находится в режиме регенерации. При этом отклоняющие напряжения формируются по положению счетчика, который задает последовательно адреса элементов раstra.

Через один такт, после получения от программного датчика команды «чтение» или «запись», блок селекторных импульсов переводит в нужный режим блок разверток и блоки регене-

рации. После выполнения команды блок селекторных импульсов переводится снова в режим регенерации и выдает в программный датчик сигнал окончания операции (записи или чтения). Одно обращение к памяти занимает два такта. Независимо от режима работы, при переходе с одного элемента раstra на другой все трубки гасятся общим импульсом гашения (80 в), подаваемым одновременно на катоды всех трубок.

Общий вид шкафа электростатического запоминающего устройства показан на рис. 16. В шкафу располагаются 36 ячеек, из которых используются только 34 и одна контрольная. Установки яркости и фокусировки выведены наружу.

Отдельная ячейка показана на рис. 17. Она представляет собой легкий каркас с двойным экраном из пермаллоя, в который вставляется трубка. Сигнальная пластина выполнена из тонкой латунной сетки, приклеенной к трубке. Усилитель и блок регенерации расположены со стороны цоколя трубки. Все ячейки взаимозаменяемы. Всего требуется по 9 ламп на одну ячейку. Опыт длительной эксплуатации электростатического за-

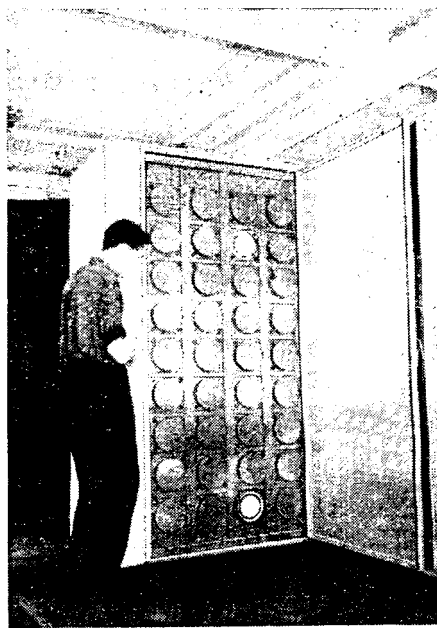


Рис. 16. Общий вид шкафа электростатического запоминающего устройства.

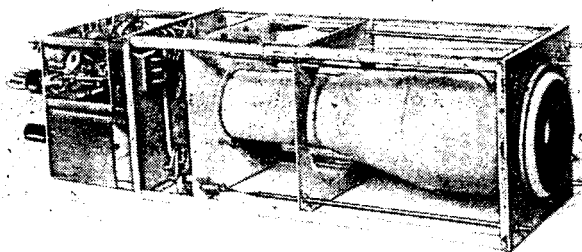


Рис. 17. Отдельная ячейка (разряд) электростатического запоминающего устройства.

Ф е р р и т ы

Кандидат техн. наук В. И. ЕВСЕЕВ

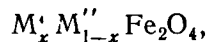
После войны появился новый вид промышленных магнитных материалов — ферриты. Ферриты необычайно быстро получили широкое применение в радиотехнике, электротехнике и других смежных с ними областях.

Ферриты замечательны тем, что, в отличие от всех существовавших ранее магнитных материалов, они не являются металлами, а принадлежат к группе керамических материалов и их удельное сопротивление на несколько порядков выше удельного сопротивления железа и других магнитных материалов. Благодаря этому свойству для большинства их разновидностей не наблюдается явление магнитного скин-эффекта на всех применяемых в технике частотах.

Ферромагнитные свойства ферритов были открыты еще в 1878 г. [Л. 1], в 1909 г. Хильперт получил патент на способ их изготовления [Л. 2]. Однако тогда ферриты имели магнитную проницаемость порядка нескольких десятков единиц и поэтому не могли конкурировать даже с кремнистым железом. Особые свойства ферритов в слабых полях в то время еще не были обнаружены, да и техника связи и, особенно, техника высоких частот были на очень низком уровне. Вызывает удивление, что даже после того, как проводная связь и радиотехника получили широкое развитие и появились порошковые сердечники, ферриты еще долго не использовались. Лишь после войны, когда были найдены типы ферритов с очень высокими значениями проницаемости, они получили широкое распространение. С этого периода новый магнитный материал непрерывно совершенствуется, заменяя в ряде случаев хорошо известные магнитные материалы и открывая для себя совершенно новые области применения, недоступные старым материалам. На основе ферритов конструируются принципиально новые приборы, приспособления, детали. Сейчас промышленность США выпускает до 500 т ферритов в месяц [Л. 1], в других странах выпуск ферритов также велик.

Структура ферритов. Ферриты представляют собой соединения двухвалентных металлов с окисью железа. Простейший феррит имеет формулу MFe_2O_3 , где M — какой-либо двухвалентный металл, а Fe — трехвалентное железо. Для того чтобы показать валентность металлов в составе ферритов, их формулу изображают в виде: $M^{2+}Fe_2^{3+}O_4$.

Простые соединения могут образовать более сложные твердые растворы, так называемые смешанные ферриты, в состав которых, кроме железа, входят два и более двухвалентных металла. В случае, например, двойных ферритов формула их будет иметь вид:



где M'_x и M''_{1-x} — два рода двухвалентных металлов, а x может иметь значения от 0 до 1. В состав ферритов могут входить следующие двухвалентные металлы: Ni , Mn , Zn , Cu , Cd , Co , Pb , Mg . К этой же группе принадлежит двухвалентный ион железа, и тогда мы получаем магнетит $FeOFe_2O_3$, который, следовательно, также является ферритом. Как исключение, феррит может быть образован и из одновалентного лития ($Li_{1/2} Fe_{3/2} O_4$).

В технике наибольшее распространение получили разного рода смешанные ферриты. Наиболее ценными магнитными свойствами обладают ферриты с содержанием цинка, как, например, никель-цинковые ($NiZnFe_2O_4$), марганце-цинковые ($MnZnFe_2O_4$) и литий-цинковые ($LiZnFe_2O_4$).

Технология. Ферриты являются типичными представителями керамики, со всеми присущими этому виду материала особенностями. Они отличаются большой твердостью, в то же время очень хрупки, имеют раковистый излом, поддаются обработке только разного рода абразивами. Изготовление их основано на керамических процессах,

поминающего устройства показал его высокую надежность. Достаточно производить один раз в сутки контроль электронной памяти и регулировку отдельных ячеек.

В рамках статьи необходимо ограничиться этим кратким и неполным описанием машины.

Машина М-2 работает безостановочно. Профилактическая ревизия производится обычно один раз в неделю. Остальное время, если не считать ежесуточной затраты нескольких часов на контрольные задачи для проверки исправности машины, она выполняет полезную работу. Ее обслуживают один-два человека.

На основе имеющегося опыта и новых исследований проводится работа по усовершенствованию машин в целях повышения надежности и быстродействия. Вполне реальна скорость более 50 000 операций в секунду.

Целью дальнейших исследований являются новые применения цифровых машин и элементов в промышленности в качестве основных средств для автоматизации производства и управления и, прежде всего, для автоматизации создаваемого объединения электрических систем Европейской части СССР.

Работа по созданию электронных цифровых машин выполнена коллективом научных работников и инженеров лаборатории электрических систем Энергетического института АН СССР в составе: Т. М. Александриди, В. В. Бельнского, Н. А. Дороховой, А. Б. Залкинда, М. А. Карцева, В. Д. Князева, Ю. А. Лавренюка, Л. С. Легезо, Н. Я. Матюхина, Г. И. Танетова, А. И. Шурова при участии механиков и монтажников лаборатории.



которые происходят при температурах, значительно более низких, чем температура их плавления или распада. Вполне справедливо ферриты называются черной или магнитной керамикой.

По методу приготовления массы, из которой прессуются заготовки, подготовляемые для окончательного обжига, различают несколько способов изготовления ферритов. Наиболее простой и наиболее распространенный способ сводится к смешиванию окислов металлов в соответствующих пропорциях, обжиге их при температуре 800 ... 1100°С и последующем помоле слегка спекшейся массы. Полученные таким образом порошки смешиваются с каким-либо связующим веществом, например парафином или водным раствором поливинилового спирта, затем прессуются под давлением до 2 т/см² в прессформах заданного размера и формы. Спрессованные заготовки спекают несколько часов при температурах приблизительно на 200°С выше температуры предварительного обжига смеси окислов (1100 ... 1400°С). Во время обжига происходит усадка спрессованных заготовок до 20%.

Основные магнитные свойства. Природа ферромагнетизма ферритов несколько иная, чем обычных металлических ферромагнетиков. Согласно современным представлениям, ферромагнитные материалы состоят из очень малых различным образом ориентированных областей самопроизвольной намагниченности — доменов. Линейный размер домена в среднем составляет около 0,1 мкм. У металлов в каждом домене магнитные моменты его ионов имеют одинаковую ориентацию, параллельную некоторым направлениям, связанным со строением решетки кристалла. Домены ферритов имеют две группы ионов с прямо противоположными, антипараллельными магнитными моментами; разность между магнитными моментами этих двух групп определяет результирующий магнитный момент всего домена и, следовательно, величину намагниченности всего материала в целом. В случае если суммы магнитных моментов двух противоположных направлений будут равны, то такой феррит не будет ферромагнетиком (например, цинковый и кадмиевый ферриты).

По общим магнитным свойствам и поведению в постоянных магнитных полях ферриты вообще мало отличаются от металлических фер-

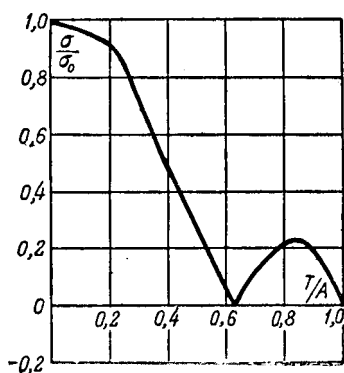


Рис. 1. Относительная намагниченность насыщения σ/σ_0 в зависимости от относительной температуры T/A для феррита, содержащего хром и литий (σ_0 — намагниченность насыщения при абсолютном нуле, σ — намагниченность насыщения при заданной температуре; T — температура по шкале Кельвина; A — точка Кюри).

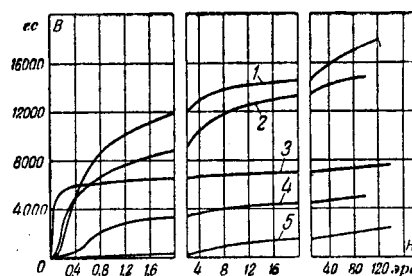


Рис. 2. Сравнительные кривые индукции двух марок ферритов и некоторых листовых материалов.

1 — трансформаторная сталь марки ВП-2; 2 — 45% пермаллой; 3 — молибденовый пермаллой; 4 — феррит Φ_2-400 ; 5 — феррит Φ_1-100 .

ромагнетиков. Однако в связи с несколько особой природой их ферромагнетизма в некоторых случаях магнитные свойства ферритов имеют свои особенности. Так, зависимость намагниченности насыщения от температуры некоторых составов ферритов имеет весьма своеобразный характер. Встречаются ферриты, имеющие две точки Кюри. Пример такой аномальной зависимости показан на рис. 1 [Л. 3]. Однако большинство выпускаемых промышленностью ферритов имеет почти такой же температурный ход своей намагниченности насыщения, какой свойственен обычным металлическим ферромагнетикам.

Намагниченность насыщения у ферритов небольшая, в четыре-пять раз меньшая, чем для обычных магнитных материалов, как это видно из рис. 2. На рис. 3 приведены кривые индукции некоторых составов ферритов, а на рис. 4 показаны кривые их магнитной проницаемости. Из этих рисунков видно, в какой степени ферриты разнятся между собой в магнитном отношении. Отдельные применяемые в технике марки ферритов отличаются между собой по проницаемости более чем в сто раз.

Различию первоначальных кривых намагничивания соответствуют разнообразные петли гистерезиса. Наряду с узкой петлей и очень малой коэрцитивной силой встречаются ферриты с коэр-

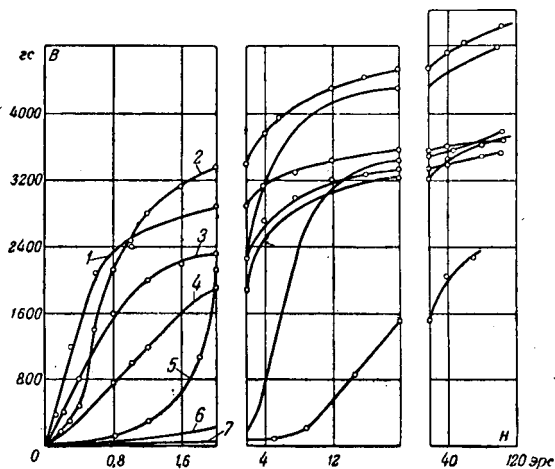


Рис. 3. Индукция разных марок ферритов отечественной разработки.

1 — феррит Φ_1-2000 ; 2 — Φ_2-400 ; 3 — Φ_1-1000 ; 4 — Φ_1-400 ; 5 — Φ_1-100 ; 6 — Φ_1-40 ; 7 — Φ_1-25 .

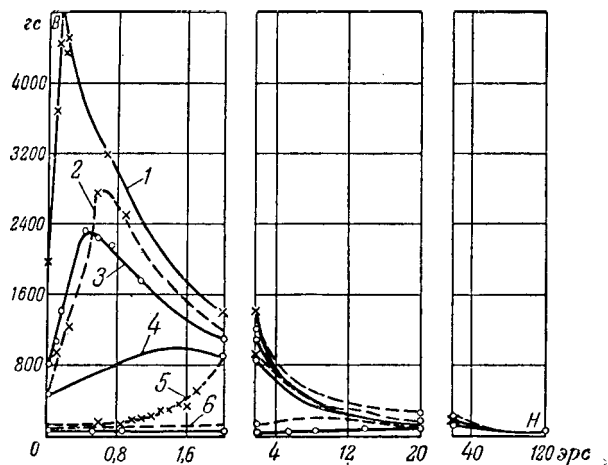


Рис. 4. Кривые проницаемости разных марок ферритов (рис. 3).

цитивной силой до нескольких десятков эрстед.¹ Точно так же по «прямоугольности» петли, т. е. по отношению остаточной индукции B_r к индукции насыщения B_s , ферриты представляют большое разнообразие. В большой группе ферритов $B_r/B_s = 0,5$, наряду с этим встречаются ферриты промышленного выпуска с отношением $B_r/B_s \geq 0,95$.

Точка Кюри у ферритов также может иметь самые разнообразные значения. Промышленностью изготавливаются ферриты с точкой Кюри, начиная от $+60^\circ\text{C}$ и кончая несколько более чем $+400^\circ\text{C}$. На значение точки Кюри большое влияние оказывает окись цинка. Чем больше в состав феррита входит ZnO , тем ниже точка Кюри. Ферриты с высокой проницаемостью содержат много цинка, поэтому их точка Кюри обычно не превышает $100 \dots 150^\circ\text{C}$.

Константа магнитострикции λ_s , выражающая относительное удлинение образца при его намагничивании до насыщения, у ферритов того же порядка, что и у металлических ферромагнетиков. Здесь также, как правило, материалы с большей проницаемостью имеют небольшие значения магнитострикции. Так, у высокопроницаемых ферритов NiZn и MnZn λ_s составляет около минус $3 \dots 5 \cdot 10^{-6}$, а у низкопроницаемого никель-цинкового феррита λ_s достигает минус $22 \cdot 10^{-6}$.

Магнитострикция большинства ферритов отрицательная, исключение, в частности, составляет магнетит ($\lambda_s = +41 \cdot 10^{-6}$). Самое высокое значение магнитострикции ($\lambda_s = -220 \cdot 10^{-6}$) наблюдается у кобальтового феррита [Л.4, 5].

Удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость и некоторые механические и тепловые свойства. Как уже отмечалось, ферриты — полупроводники. Проводимость ферритов растет с повышением температуры, и эта зависимость от температуры с небольшими отклонениями подчиняется экспоненциальному закону.

¹ Недавно появившийся феррооксид с коэрцитивной силой 2000 эрс, строго говоря, не относится к классу ферритов.

Удельное сопротивление изготавливаемых промышленностью ферритов составляет от 50 до $10^{10} \text{ ом}\cdot\text{см}$. Некоторые ферриты могут иметь удельное сопротивление еще более низкое — до $10^{-2} \text{ ом}\cdot\text{см}$ (например, чистый магнетит при комнатной температуре). У некоторых разновидностей ферритов на низких частотах диэлектрическая проницаемость ϵ достигает более $100\,000$. Однако при переходе на высокие частоты ϵ быстро падает.

Интересно отметить, что высокими значениями ϵ обладают лишь ферриты с высокой проницаемостью. Ферриты с малыми μ имеют также небольшое значение ϵ . На очень высоких частотах, более 1000 мггц , у всех ферритов $\epsilon = 10 \dots 15$.

Будучи керамическим материалом, ферриты очень тверды, тем не менее они хорошо обрабатываются абразивами. При помощи абразивов оказывается возможным без больших трудностей даже делать резьбу на окончательно отожженных заготовках, что нередко применяется в промышленности. Ферриты также хорошо шлифуются. Можно легко довести поверхность сердечника до зеркального блеска и осуществить зазор в месте стыка двух сердечников менее, чем в $0,0025 \text{ мм}$, что является весьма существенным при создании сложных магнитных цепей.

Необходимо отметить еще одну важную особенность ферритов: в противоположность металлическим материалам свойства ферритов стойки ко всякого рода механическим воздействиям. Например, такая структурно чувствительная характеристика, как магнитная проницаемость, практически не меняет своего значения после сильного сжатия ферритов и после того, как их подвергали весьма сильным ударам, приводящим вплоть до механических разрушений. Эта особенность в некоторых случаях делает ферриты незаменимыми.

По своим тепловым свойствам ферриты сходны с обычной керамикой. Ниже даны основные механические и тепловые свойства никель-цинковых ферритов, однако следует иметь в виду, что другие типы ферритов могут иметь значительно отличающиеся характеристики.

Некоторые механические и тепловые свойства никель-цинковых ферритов.	
Твердость по шкале Мооса	6,0
Модуль Юнга, кг/см^2	$1,5 \cdot 10^6$
Прочность на разрыв, кг/см^2	180
Удельная теплоемкость, $\frac{\text{кал}}{\text{г}^\circ\text{C}}$	0,17
Теплопроводность, $\frac{\text{кал}}{\text{см}\cdot\text{сек}^\circ\text{C}}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент линейного расширения, $\frac{1}{^\circ\text{C}}$	10^{-5}

Некоторые виды ферритов очень пористые. Удельный вес их колеблется от $3,7$ до $4,8 \text{ г/см}^3$.

Магнитные свойства в переменных полях. Ввиду низкой индукции насыщения (рис. 2) ферриты невыгодно применять в сильных полях. Поэтому преимущественная область применения

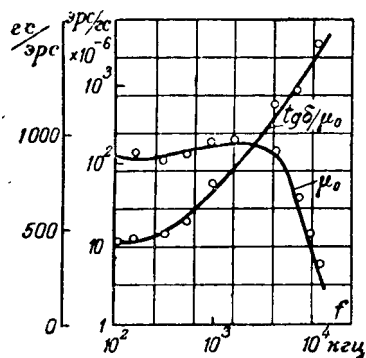


Рис. 5. Типичные для ферритов частотные кривые μ_0 и $\operatorname{tg} \delta/\mu_0$ в области частот до критической 1 мГц и после критической.

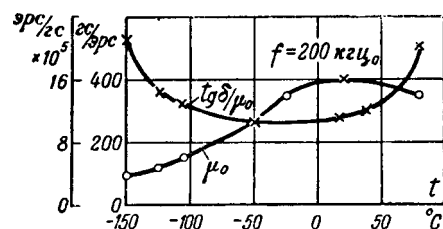
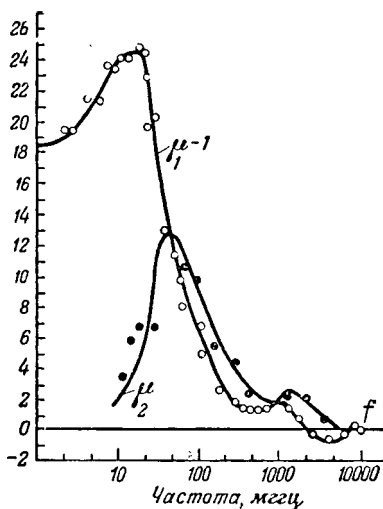


Рис. 7. Типичный для ферритов температурный ход μ_0 и $\operatorname{tg} \delta/\mu_0$.

Рис. 6. Естественный ферромагнитный резонанс магниевого феррита. (По оси ординат отложены значения μ_1 — 1 и μ_2 , которые соответствуют составляющим комплексной проницаемости.)

ферритов это автоматика и техника связи. Высокое электросопротивление делает его материалом преимущественно высокочастотным.

Основными характеристиками материалов, применяемых в слабых полях на переменном токе, являются обычно начальная проницаемость μ_0 и тангенс угла магнитных потерь $\operatorname{tg} \delta$. Однако ввиду большого разброса проницаемости ферритов их потери характеризуют² не $\operatorname{tg} \delta$, а величиной $\operatorname{tg} \delta/\mu_0$.

Несмотря на высокое удельное сопротивление и отсутствие магнитного скин-эффекта, у ферритов при определенной частоте замечается резкий спад магнитной проницаемости, которая затем монотонно падает, достигая при нескольких сотнях мегагерц значений, близких к единице. Несколько ранее точки резкого спада μ_0 (примерно ниже на один порядок частоты) наблюдается крутой рост потерь. На рис. 5 для никель-цинкового феррита приведены типичные зависимости μ_0 и $\operatorname{tg} \delta/\mu_0$ от частоты. Заслуживает внимания также тот факт, что перед началом спада проницаемости замечается небольшой ее подъем.

Частота, при которой происходит резкое увеличение потерь, является предельной, при которой еще в обычном диапазоне радиочастот³ могут применяться ферриты. Эта частота обычно называется граничной или критической $f_{кр}$. В известной мере она зависит от формы образца феррита. В сердечниках открытой формы $f_{кр}$ может быть на порядок выше, чем в сердечниках замкнутой формы, вообще, чем больше размагничивающий фактор сердечника, тем выше будет его граничная частота.

Явление резкого подъема потерь и спада проницаемости при определенной частоте многими авторами объясняется возникновением так назы-

ваемого ферромагнитного резонанса, сущность которого заключается в том, что элементарные носители магнетизма — спины электронов, находясь в постоянном поле, внутреннем, создаваемом самими ионами в отдельном домене, или внешнем, создаваемом посторонним источником тока, могут «прецессировать» вокруг направления постоянного поля.⁴ При совпадении частот внешнего переменного поля и прецессионного вращения возникает резонанс. В момент резонанса проницаемость материала не только сильно падает, но в отдельных случаях может стать меньше единицы. На рис. 6 показан случай естественного ферромагнитного резонанса магниевого феррита [Л. 6]. Однако естественный ферромагнитный резонанс еще мало изучен, и нет непосредственных доказательств правильности изложенной выше теории. Существуют и другие теории.

Зависимость потерь ферритов от температуры весьма своеобразная. При низких температурах потери сравнительно велики; затем с повышением температуры они сначала падают, а вблизи точки Кюри снова резко возрастают. На рис. 7 показана зависимость $\operatorname{tg} \delta/\mu_0$ в области от температур, соответствующих жидкому воздуху, до значений, приближающихся к точке Кюри. Зависимости μ и $\operatorname{tg} \delta/\mu_0$ рис. 7 типичны для всех видов ферритов.

Магнитные свойства ферритов на переменном токе в слабых полях очень чувствительны к подмагничиванию постоянным током. Небольшие подмагничивающие поля могут изменить проницаемость в десятки и сотни раз. На рис. 8 приведена зависимость обратной проницаемости от подмагничивающего поля никель-цинкового феррита с начальной проницаемостью 1500 гс/эрс. При поле в 10 эрс μ падает до 10, что означает уменьшение ее в 150 раз.

Эффект подмагничивания сохраняется и в области сверхвысоких частот (СВЧ). Здесь при сильных подмагничивающих полях наблюдается ферромагнитный резонанс, о природе которого

² При пользовании величинами $\operatorname{tg} \delta$ и $\operatorname{tg} \delta/\mu_0$ молчаливо принимается, что их значения относятся лишь к очень слабым полям, не более 10...20 мэрс, и что они не зависят от поля.

³ Исключая область СВЧ, где к магнитным материалам предъявляются особые требования.

⁴ При отсутствии внешнего поля ферромагнитный резонанс называют естественным.

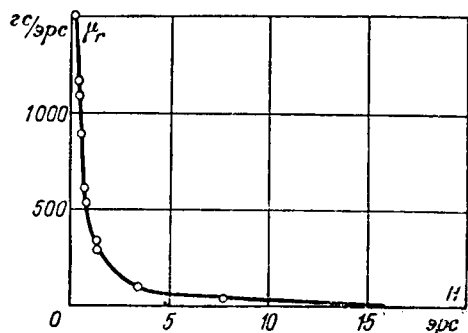


Рис. 8. Зависимость проницаемости никель-цинкового феррита с $\mu_0 = 1500$ гс/эрс от подмагничивающего поля.

было упомянуто выше. Частота, при которой наблюдается резонанс, зависит от напряженности подмагничивающего поля и состава феррита. На рис. 9 показана резонансная кривая потерь энергии монокристалла феррита никеля в зависимости от напряженности подмагничивающего поля [Л. 7], снятая при частоте 24 000 мгц.

Ферриты обладают еще одной замечательной особенностью — сильно выраженным эффектом Фарадея (вращение плоскости поляризации) при малом затухании электромагнитных волн. На рис. 10 показана зависимость угла вращения плоскости поляризации θ от подмагничивающего продольного постоянного поля. Здесь же показано наблюдаемое при этом затухание волны.

Описанные выше характеристики ферритов наблюдаются в слабых полях для значений напряженности, не превышающих нескольких десятков миллиэрстед. Изучение ферритов в сильных переменных полях встречает значительные затруднения из-за больших потерь. Образец может нагреться выше точки Кюри, и тогда магнитные измерения будут лишены смысла. Поэтому проводить исследование ферритов в переменных полях удается обычно лишь до значений индукции не более 1 000 гс. Однако и при таких значениях индукции поведение ферритов имеет уже некоторые особенности.

Кривая индукции на переменном токе высокой частоты у ферритов высокой проницаемости лежит значительно ниже кривой индукции на постоянном токе или на переменном низкой частоты. На рис. 11 показаны кривые индукции марганцевого феррита, снятые при частотах от 0,5 до 626 кгц [Л. 8]. Образец имел $\mu_0 = 860$ гс/эрс и $H_c = 0,35$ эрс. Как видно (рис. 11), при 0,5 кгц кривая индукции имеет такой же вид, что и при постоянном токе, затем с ростом частоты она становится все более и более пологой и при частоте 625 кгц практически обращается в прямую. При частоте 625 кгц проницаемость практически уже не зависит от поля и остается равной своему начальному значению. У таких ферритов при больших полях не обнаруживается наличие гармоник.

При индукциях выше 10 ... 20 гс коэффициент потерь $\text{tg} \delta / \mu$ уже перестает быть постоянным и сильно зависит от напряженности поля, поэтому

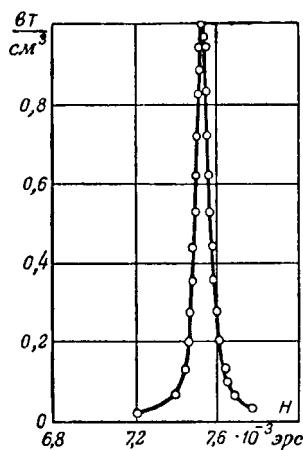


Рис. 9. Магнитные свойства ферритов на сверхвысоких частотах. Резонансная кривая монокристалла феррита никеля при длине волны 3,2 см.

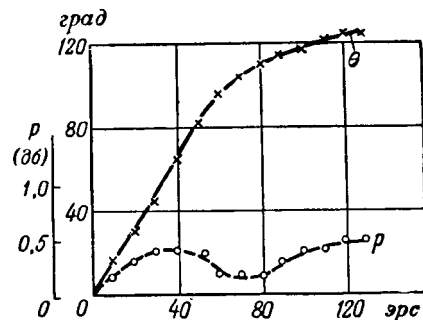


Рис. 10. Магнитные свойства ферритов на сверхвысоких частотах. Зависимости угла вращения плоскости поляризации θ и потерь p от продольного подмагничивающего поля.

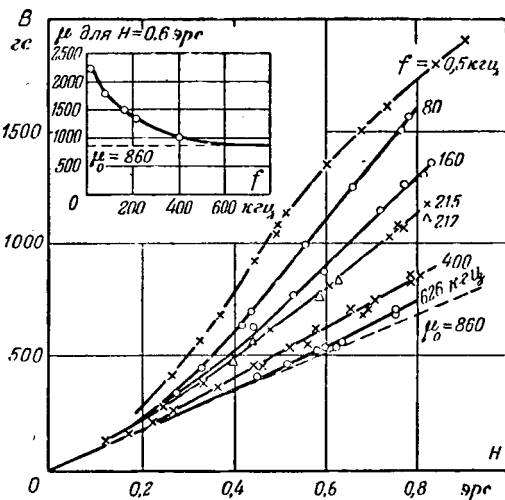


Рис. 11. Кривые индукции марганцевого феррита на разных частотах при полях до 0,9 эрс.

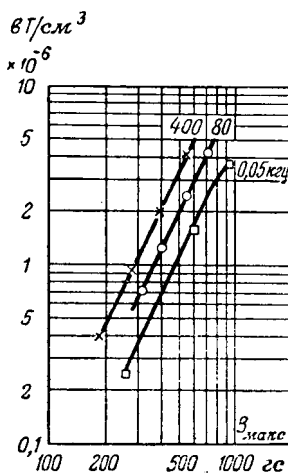


Рис. 12. Зависимость потерь от индукции при разных частотах марганцевого феррита, кривые индукции которого показаны на рис. 11.

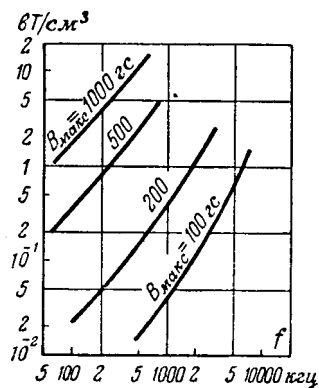


Рис. 13. Зависимость потерь от частоты при разных значениях индукции никель-цинкового высокопроницаемого феррита.

он более непригоден как критерий для характеристики потерь.

Из рис. 12 и 13 следует, что потери в ферритах в зависимости от индукции растут несколько быстрее, чем по квадратичному закону. Исследование, выполненное на образцах никель-цинковых, марганцево-цинковых и литий-цинковых ферритов, на частотах от 100 до 600 кГц и при индукциях от 200 до 1 000 гс, показало, что потери можно принять пропорциональными квадрату индукции и в первом приближении их можно выразить формулой:

$$p = \frac{0,0375 B^2 f}{\mu_0} \left[\frac{\text{вт}}{\text{см}^3} \right],$$

где f — в мГц. Таким образом, при относительно больших переменных индукциях потери в ферритах оказываются не меньше, чем потери в металлических ферромагнетиках.

Применение ферритов. Как уже было отмечено выше, областью применения ферритов являются низкие индукции. Однако во всех практически встречающихся полях их индукция выше, чем порошковых материалов (магнитодиэлектриков), а в очень слабых полях больше, чем у кремнистых сталей.

На рис. 14 для сравнения показаны в логарифмическом масштабе кривые индукции магнитных материалов: листовых, порошковых и керамических (ферритов). Графики позволяют судить об оптимальных областях использования ферритов из условия получения наибольшей индукции при заданном поле. Из рис. 14 видно, что по индукции ферриты занимают как бы промежуточное положение между листовыми материалами и порошковыми.

Кривые рис. 14 относятся к постоянному полю или к переменному очень низкой частоты. В переменных полях высокой частоты картина будет иная. В этом случае кривые индукции листовых материалов (если только не будет значительно уменьшена их толщина) из-за скин-эффекта станут намного ниже и при частоте выше 10...100 кГц они будут лежать ниже кривых индукции ферритов.

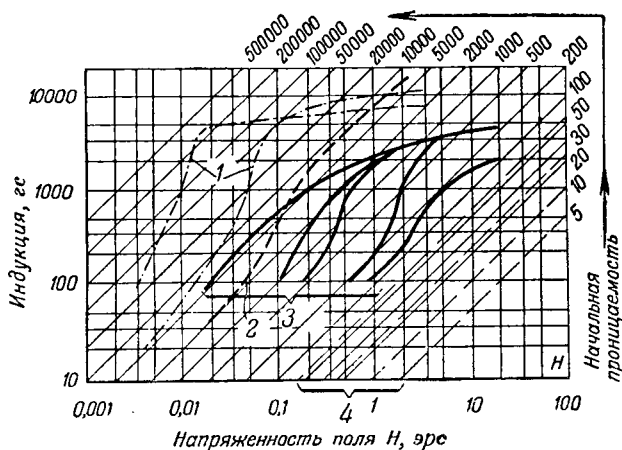


Рис. 14. Кривые индукции листовых, порошковых и керамических магнитных материалов.

1 — листовые материалы высокой проницаемости; 2 — кремнистая сталь; 3 — ферриты; 4 — металлические порошки.

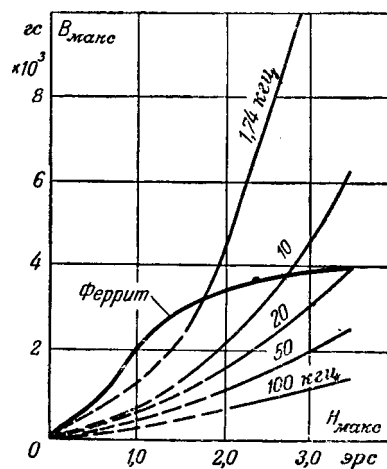


Рис. 15. Сравнение кривой индукции никель-цинкового феррита с кривыми индукции кремнистой стали 0,35 мм для разных частот.

На рис. 15, наряду с кривой индукции ферритов при частоте 100 кГц, показаны при разных частотах кривые кремнистой стали толщиной 0,35 мм. Оказывается, что на частотах выше 10 кГц в полях до 2,5 эрс индукция ферритов уже имеет более высокие значения, чем индукция в стали. Из рисунка видно также, что в слабых полях и при 10 кГц индукция в кремнистой стали меньше приблизительно в два раза по сравнению с ее значением на частоте 1,74 кГц. При высоких частотах материалы с более высоким μ обнаруживают еще более сильное снижение индукции. Так, проницаемость молибденового пермаллоя, значение которого на постоянном токе составляет 20 000 гс/эрс, падает до 300 гс/эрс при 10 000 гц.

Для ослабления влияния скин-эффекта лист прокатывают как можно более тонким. Для работ на звуковых частотах снижают толщину листа до 0,1...0,05 мм, а на радиочастотах — до 5...3 мкн. Но при очень малой толщине падает проницаемость и на постоянном токе, даже у высокопроницаемых пермаллоев она становится меньше проницаемости некоторых марок ферритов. Практика показала, что только до 100 кГц проницаемость тонколистных материалов может быть выше проницаемости ферритов.

При использовании магнитных материалов в сильных переменных полях определяющим параметром при выборе материала часто является не индукция, а потери. Сердечник может нагреться значительно выше той температуры, при которой начинает гореть или разрушаться изоляция провода, каркас или другие детали.

Как было показано ранее, в сильных переменных полях современные ферриты имеют примерно те же потери, что и обычные листовые материалы, и в этом случае применение феррита не дает особых преимуществ. Кроме того, у ферритов, для которых характерна низкая точка Кюри, температура при их эксплуатации может легко подняться выше этой точки.

Очень часто выбор ферритов определяется теми или иными специфическими его свойствами, которые присущи только ферриту. Например, фер-

риты незаменимы там, где магнитные сердечники в условиях эксплуатации могут подвергаться каким-либо сильным механическим воздействиям и где от них в то же время требуется высокая проницаемость. Конкурирующие с ферритами на высоких частотах тонколистные материалы могут применяться только в виде рулонов. Эта форма сердечников не всегда оказывается удобной. Ферриты без труда можно изготовлять любой формы. Во многих применениях, особенно в малогабаритных устройствах, оказывается экономически более выгодным использовать ферриты, чем кремнистую сталь, даже самых дешевых сортов, так как при незначительных размерах сердечника стоимость его материала будет составлять очень малую долю по сравнению с затратами на изготовление.

Вообще надо заметить, что решающую роль во многих случаях при выборе материала играет его стоимость. Ферриты несколько дешевле пермаллоев и с успехом могут заменить некоторые их разновидности. В то же время они значительно дороже кремнистых сталей и конкурировать с ними могут лишь в особых случаях.

Практика показала, что на частотах, начиная с нескольких килогерц и по всему радиодиапазону, большей частью более выгодно применять все же ферриты. На звуковых частотах они дают меньшие потери по сравнению с листовыми материалами и большую проницаемость по сравнению с порошковыми. В области частот от 50 до 200 кГц, используемой в основном для высокочастотной телефонии, добротность порошковых сердечников обычно не превышает 300. При помощи ферритов получают катушки с добротностью до 1 000, катушки с добротностью 500 ... 600 единиц уже используются. На радиочастотах, начиная с 100 кГц и до нескольких десятков мегагерц, ферриты также дают более высокие значения добротности.

В настоящее время в промышленности наибольшее распространение получили следующие четыре группы ферритов: марганцево-цинковые, никель-цинковые, литий-цинковые и ферриты, содержащие магний. Каждая из этих групп ферритов соответствует своему определенному диапазону частот, где ее использование дает лучшие результаты. Частотные диапазоны могут быть разделены между различными ферритами так, как это показано на рис. 16.

Все области применения магнитных материалов можно разделить на две группы. К первой будут относиться области, где магнитный материал используется для усиления и концентрации магнитного потока и уменьшения его рассеивания. В этом случае материал должен быть по возможности линейным: зависимость индукции от напряженности поля должна быть прямолинейной в целях исключения искажений синусоиды рабочего тока или напряжения. Во второй группе областей применения от материала требуется, наоборот, наличие резко выраженных нелинейных свойств. К материалам этого последнего вида предъявляются требования наличия каких-либо особых, специфических свойств. Так, в зависимо-

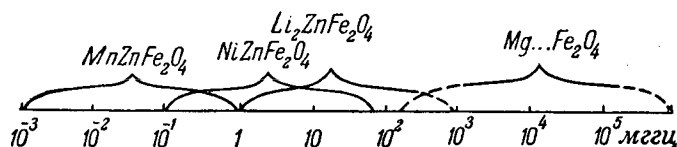


Рис. 16.

сти от области применения от материала требуют или особую форму петли гистерезиса, или высокую дифференциальную проницаемость, или сильную зависимость проницаемости от поля, или, наконец, большее отношение B_r/B_s .

Материалы, относящиеся к первой группе, применяются на технических, звуковых и радиочастотах в качестве сердечников трансформаторов, дросселей и любых катушек индуктивности. Использование магнитного сердечника в слабых полях должно давать следующие выгоды: уменьшение размеров детали, увеличение добротности, уменьшение поля рассеяния и, наконец, в некоторых случаях возможность регулирования индуктивности. Для того чтобы выполнить эти требования, сердечник, наряду с высокой проницаемостью, должен иметь малые потери. Вместе с тем материал сердечника должен обладать достаточной стабильностью по магнитной проницаемости — не должен стареть; должен иметь малый температурный коэффициент магнитной проницаемости TK_μ и быть достаточно влагостойким. За исключением температурного коэффициента, всем этим требованиям ферриты удовлетворяют лучше, чем другие материалы.

Ферриты имеют сравнительно более высокий температурный коэффициент по сравнению с другими материалами и, вообще, для них характерна значительная зависимость магнитных свойств от температуры. Однако в последнее время разработаны ферриты с достаточно малым TK_μ , близким по этому параметру к лучшим порошковым сердечникам.

В таблице приводятся магнитные характеристики ряда отечественных марок феррита.

В настоящее время ферриты широко применяются в цепях и контурах самых разнообразных устройств, приборов и аппаратуры. В проводной связи наибольшее распространение сердечники из ферритов получили в катушках разнообразных фильтров на частотах, начиная от звуковых и кончая мегагерцами, а также в пупиновских катушках. Особенно эффективным оказалось их применение в специальных кварцевых фильтрах. В телевизорах ферриты с успехом заменили листовые материалы, применяемые в качестве сердечников строчных трансформаторов и отклоняющих катушек. В широкополосных и специальных приемниках ферриты вытесняют порошковые сердечники, например в фильтрах промежуточной частоты и катушках отдельных высокочастотных контуров. Во всех этих случаях применение ферритов позволило или снизить габариты деталей, или улучшить их добротность.

Использование ферритов как материала с большой проницаемостью на высоких частотах дало возможность сконструировать принципиаль-

Основные магнитные свойства ферритов различных марок

Марка ферритов	Состав	μ_0 , гс/эрс	B_{\max} , гс	H_c , эрс	$\lg \delta$	Частота измерения $\lg \delta$, кГц	$TK \cdot 10^6$
МЦ-2000 МЦ-1000	$MnOZnFe_2O_3$	2 000 1 000	3 500 3 500	0,15 0,20	0,028 0,015	60 60	2 200 1 700
Φ_1 -2000 Φ_2 -1000 Φ_2 -1000 Φ_1 -600 Φ_1 -400	$NiOZnFe_2O_3$	2 000 1 000 1 000 600 400	3 000 2 200 2 100 3 000 2 500	0,16 0,30 0,35 0,65 1,00	0,035 0,011 0,032 0,009 0,008	100 100 100 100 100	7 000 4 000 2 500 6 000 3 000
Φ_2 -600 Φ_2 -400 Φ_3 -400 Φ_1 -100	$NiOZnFe_2O_3$ с добавками других окислов	600 400 400 100	2 900 4 200 2 700 3 800	0,58 0,6 0,79 2,0	0,032 0,038 0,027 0,004	100 100 100 500	1 000 6 000 150 4 000
Φ_2 -100 Φ -40 Φ -25 Φ -15	$Li_2OZnFe_2O_3$	100 40 25 15	2 500 1 400 1 100 620	3,0 5,6 6,0 9,0	0,011 0,004 0,0035 0,0050	500 100 5 000 20 000	2 500 1 800 1 300 900
IV-7 IV-13 3И	$Li_2OZnFe_2O_3$ с добавками других окислов	40 17 50	2 000 1 500 4 200	8,0 11,5 4,0	0,0027 0,005 0,005	1 000 1 000 5 000	2 000 1 000 2 800

Примечание: B_{\max} указано для $H = 10$ эрс за исключением марок МЦ, для которых B_{\max} получено при $H_2 = 30$ эрс, и марки IV-7, для которой индукция дана для $H = 20$ эрс.

но новые и оригинальные детали. Например, магнитные антенны, которые в ближайшее время, очевидно, будут применяться во всех широкополосных приемниках, оказалось возможным изготовить только на основе высокопроницаемых ферритов. Наличие магнитных антенн значительно улучшает качество приема, позволяя легко отстроиться от мешающих станций и других помех.

Магнитные антенны из феррита оказываются выгодным применять также в некоторых приемниках специального назначения для приема очень слабых сигналов. При помощи высокопроницаемых ферритов удалось разработать широкополосные трансформаторы с высоким коэффициентом трансформации и хорошими характеристиками для работы в области частот от 300 кГц до 15 мГц.

Нелинейные свойства ферритов были использованы на всех тех диапазонах частот, на которых работает современная аппаратура разных отраслей техники. Применение ферритов с нелинейными свойствами дало возможность изготовить высокочастотные приборы, которые ранее могли быть изготовлены только на низких частотах.

На их основе были открыты совершенно новые области использования ферритов. Появление ферритов позволило разработать магнитные вариометры для широкой области радиочастот с большим изменением индуктивности. Особенно удачной оказалась конструкция вариометра с применением подмагничивающего тока. Такие вариометры с хорошей добротностью удается изготовить для частот вплоть до 100 мГц. Вариометры подобного рода используются в схемах с частотной модуляцией. Применение ферритов для

магнитных усилителей значительно расширило диапазон частот, на котором могли работать эти приборы.

В усилителях ферриты имеют преимущества перед всеми другими материалами и в области самых низких частот. Они позволили получить устройство этого типа с очень малым уровнем мощности. Оказалось, что у ферритов скачки Баркгаузена, которые и являются причиной шумов, имеют значительно меньшую интенсивность по сравнению с шумами, наблюдаемыми для других материалов, например пермалловых. В схемах магнитных усилителей обычно применяется пара сердечников, которые должны обладать наиболее сходными свойствами. Оказалось, что и для этого требования ферриты являются значительно лучшими материалами по сравнению со всеми видами листовых материалов, для которых условие строгой «парности» трудно выполнимо.

Очень большое распространение получили ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Наиболее широко такие ферриты используются в автопилотах и различных быстродействующих вычислительных машинах. В этих машинах особенно удачным было их применение в матричных и цепочных накопителях разных типов, в схемах контроля и управления. Они успешно могут также применяться в трансформаторах счетных схем с полупроводниковыми приборами. Применение ферритов в счетных машинах взамен электронных ламп позволяет достичь высокой долговечности, низкой стоимости, достаточного быстродействия и хорошей гибкости (возможность подгонки под любой объем информации). Для вычислительных машин применяют ферритовые сердечники самых малых габаритов. Внешний диаметр некоторых тороидальных сердечников не

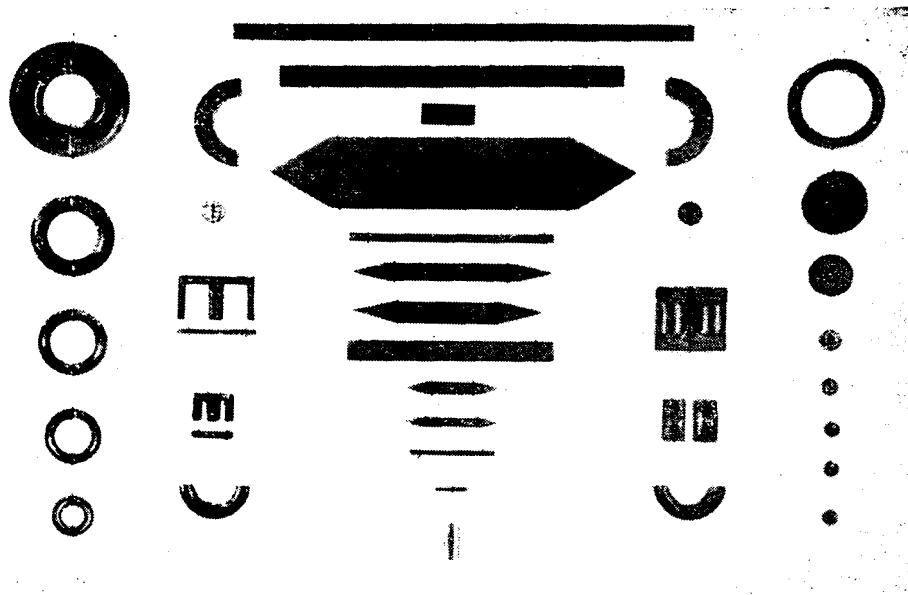


Рис. 17. Фотоснимок образцов ферритовых сердечников.

превышает трех миллиметров. В сложной машине число таких сердечников доходит до 100 000.

Ферриты с нелинейными свойствами нашли применение еще во многих других областях. Они с успехом могут применяться в импульсных трансформаторах, умножителях частоты, генераторах гармоник, линиях задержки, в индукционных высокочастотных печах (в качестве сердечников для концентрации и локализации магнитного потока) и в ряде других многочисленных случаев.

Особенно важную роль сыграли ферриты в области сверхвысоких частот (СВЧ). Здесь они нашли применение в волноводах и коаксиальных линиях в качестве управляющих элементов — переключателей, модуляторов, ослабителей. Управление осуществляется при помощи подмагничивающего поля, и здесь ценной особенностью ферритов является практически почти полная безинерционность их действия. Применение ферритов в области СВЧ подняло технику приема и передачи волн сантиметрового диапазона на новый высокий уровень.

Нечувствительность ферритов ко всякого рода механическим воздействиям, а также возможность изготовления без особого труда любых сложных форм сердечников с достаточно высокой проницаемостью позволили найти еще новые области применения этого материала. Возможность создания очень малого зазора в сердечнике и сохранение магнитных свойств при длительных механических воздействиях позволили использовать ферриты в качестве магнитных головок магнитофонов. Возможность изготовления сложных форм сердечников позволила также не без успеха применить ферриты в микродвигателях, микрогенераторах и разных измерительных приборах. Во всех этих случаях немалое значение имеет небольшой по сравнению с металлическими ферромагнетиками удельный вес ферритов

Наконец, существует еще область применения ферритов, где используются их магнитоотрицательные свойства. Магнитоотрицательные свойства позволяют применить их в механических полосовых фильтрах и ультразвуковых передатчиках и приемниках. Лучшими магнитоотрицательными свойствами в динамическом режиме обладают никель-цинковые ферриты. Они имеют достаточно высокую способность преобразования магнитной энергии в механическую и наоборот. Механическое преобразование при низких амплитудах получается, когда ферритовый сердечник намагничен до 0,7 значения индукции насыщения. Магнитоотрицательные фильтры могут быть выполнены с добротностью до 5 000 и даже выше. Недостатком ферритов является их высокий температурный коэффициент константы магнитоотрицательности.

На рис. 17 дан фотоснимок применяемых в технике ферритовых сердечников разнообразной формы. Они могут изготавливаться самых различных размеров и веса, начиная от нескольких миллиграммов и кончая десятками килограммов. В последнем случае сердечник склеивается из отдельных небольших блоков.

Заключение. Ферриты являются новым, весьма прогрессивным материалом, необычайно быстро совершенствующимся и успешно внедряемым в самые разнообразные отрасли электротехники и радиоэлектроники. Развитие этого материала находится на стадии, когда еще далеко не открыты все его возможности и не установлены теоретически и практически его оптимальные магнитные свойства, как, например, в металлических ферромагнетиках, в части максимальных значений индукции насыщения. Далеко еще не использованы все особенности ферритов как материала с нелинейными свойствами. Ряд его свойств еще недостаточно изучен. Технология изготовления недостаточно отработана, и стоимость ферритов

Современные схемы вентильного электропривода

Кандидат техн. наук **Е. Л. ЭТТИНГЕР**, кандидат техн. наук **Б. М. ГУТКИН**
и инж. **П. М. БОРОДАВЧЕНКО**
ЦКБ „Электропривод“ МЭП

Регулируемый электропривод по системе генератор-двигатель широко используется в промышленности. Применение электромашинного управления в этой системе придало ей большую гибкость и освободило от эксплуатационных недостатков, которые она имела при применении релейно-контакторной аппаратуры. В последние годы взамен преобразовательного агрегата в системе генератор-двигатель широко используются ионные преобразователи и, в частности, ртутные выпрямители. Ртутный выпрямитель более простой и дешевый преобразователь, чем электромашинный, и применение его в установках средней и большой мощности дает значительный технико-

экономический эффект. Ртутный выпрямитель является безинерционным аппаратом, благодаря чему система регулирования приобретает новое качество, которое в ряде случаев является решающим.

Широкому применению системы управляемый ртутный выпрямитель-двигатель способствовали большие успехи в области выпрямительного строения. В настоящее время освоено серийное производство управляемых одноанодных разборных ртутных вентилей большой мощности с водяным охлаждением на выпрямленное напряжение 825 в и токи 500 и 1 000 а. Разработаны конструкции отпаянных многоанодных вентилей с воздушным охлаждением на выпрямленное напряжение до 600 в и токи до 500 а и одноанодных вентилей с водяным и воздушным охлаждением на выпрямленное напряжение 825 в и токи до 250 а (в цилиндре). По литературным данным, срок службы отпаянных вентилей достиг 100 тыс. часов [Л. 1]. Разработаны новые системы управления вентилями, которые позволили создать новые схемы управляемых вентильных электроприводов.

Вентильный электропривод постоянного тока состоит из следующих основных частей (рис. 1): приводного двигателя постоянного тока *Д*; преобразовательного агрегата *ПА*; системы управления *СУ*.

Приводной двигатель в системе вентильного электропривода при питании от преобразовательного агрегата, выполненного по многофазной схеме, не отличается от приводного двигателя в схеме генератор-двигатель. Если преобразовательный агрегат выполнен по однофазной схеме, пульсации выпрямленного тока создают дополнительные потери в двигателе, что приводит к некоторому увеличению мощности двигателя.

Преобразовательным агрегатом будем называть устройство, состоящее из вен-

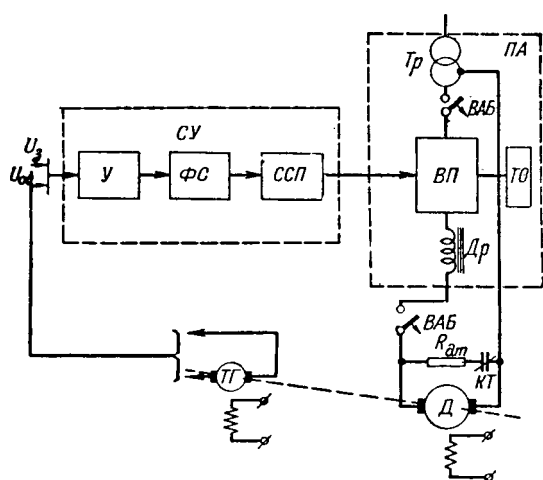


Рис. 1. Схема вентильного электропривода постоянного тока.

ПА — преобразовательный агрегат; *СУ* — система управления; *У* — усилитель; *ФС* — система фазовращения; *ССП* — система сеточного питания; *Тр* — трансформатор питания; *ВП* — вентильный преобразователь; *ВАБ* — быстродействующий автомат; *Др* — дроссель сглаживающий; *ТО* — теплообменник; *ТГ* — тахогенератор; *Д* — двигатель; *U₃* — задающее напряжение; *U_{oc}* — напряжение обратной связи.

будет значительно снижена. Имеется большая вероятность открытия новых составов с новыми замечательными свойствами.

Литература

1. F. Gorter. Некоторые свойства ферритов и их связь с химическим составом. IRE, т. 43, стр. 1945—1973, № 12, 1955.
2. G. Hilpert. Зависимость магнитных свойств ферритов и окислов железа от способа приготовления и состава. Berichte der Deutschen Gesellschaft, т. 42, стр. 2248—2261, 1909.
3. E. Gorter. Намагниченность насыщения и кристаллическая химия ферромагнитных окислов. Philips Research Reports, т. 9, стр. 295—320, № 4, 1954; стр. 321—365, № 5; стр. 403—443, № 6.

4. R. Bozorth, F. Tilden, A. Williams. Анизотропия и магнестрикция некоторых ферритов. Phys. Rev., т. 99, стр. 1788—1798, № 6, 1955.

5. H. Wijn, E. Gorter, C. Esweldt, P. Gelderman s. Условия получения прямоугольной петли гистерезиса. Philips Technical Review, т. 16, стр. 49—53, № 2, 1954.

6. G. Rodo, R. Wright, A. Emerson. Естественный ферромагнитный резонанс. Phys. Rev., т. 80, стр. 273, 1950.

7. C. Kittel. Ферромагнитный резонанс. Journ. de Phys. et Rad., т. 12, стр. 291, 1951.

8. H. Wijn. Магнитно-мягкие материалы для техники связи. Pergamon Press, London, стр. 51, 1953.

9. J. Smit a. H. Wish. Физические свойства ферритов. Advance in Electronics and Electron Physics, т. VI, стр. 70—136, 1954.



тильного преобразователя с системой зажигания и возбуждения, питающего трансформатора, сглаживающих дросселей, быстродействующих автоматов и системы охлаждения.

Разработано большое количество схем преобразовательного агрегата. Выбор той или иной схемы определяется назначением электропривода. В первую очередь необходимо различать приводы нереверсивные и реверсивные. На рис. 2,а приведена простейшая схема нереверсивного вентильного электропривода. В схеме предусмотрено динамическое торможение двигателя при помощи сопротивления $R_{д.т.}$. Схема включения вентилях зависит от мощности и режимов работы электропривода.

Для приводов малой и средней мощности часто применяются треханодные вентили и схема соединений трансформатора звезда — зигзаг. Для приводов большой мощности наиболее распространенной является схема звезда — две обратные звезды с уравнительным реактором. Широкое применение получила трехфазная мостовая схема, позволяющая обойтись без специального выпрямительного трансформатора. Если мостовая схема питается от сети большой мощности, для ограничения токов короткого замыкания применяются ограничивающие реакторы.

На рис. 2,б приведена схема нереверсивного привода, в которой благодаря коммутации якорной цепи двигателя осуществляется торможение с рекуперацией энергии.

Для электроприводов с глубоким регулированием скорости и длительно работающих на пониженных скоростях необходимо принимать специальные меры для повышения коэффициента мощности установки.

Некоторое повышение коэффициента мощности при глубоком регулировании скорости дает применение мостовых схем с независимым управлением вентилями анодной и катодной групп (рис. 2,в). Такая схема аналогична двум последовательно соединенным преобразователям. Если оба преобразователя работают в выпрямительном или в инверторном режимах, напряжения их складываются. Если один из преобразователей работает в выпрямительном, а другой в инвертор-

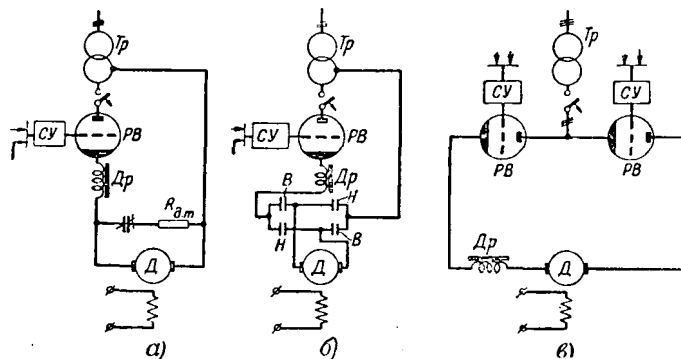


Рис. 2. Схемы вентильных электроприводов.

Тр — трансформатор питания; ПВ — ртутный выпрямитель; Др — дроссель сглаживающий; Д — двигатель; СУ — система управления.

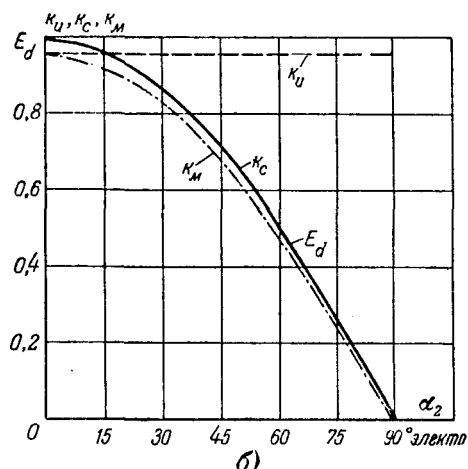
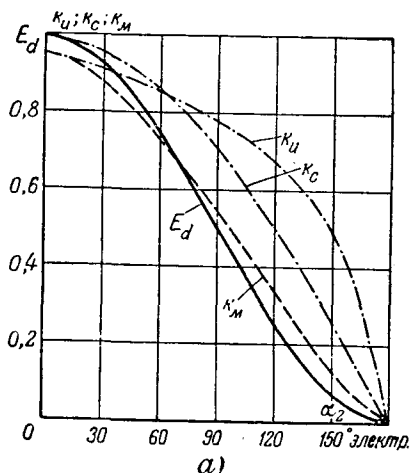


Рис. 3. Кривые зависимости выпрямленного напряжения E_d , коэффициентов мощности k_m , сдвига k_c , искажения k_u от угла регулирования α_2 .

ном режиме, напряжения вычитаются. Если анодная группа полностью открыта в выпрямительном режиме, а катодная группа работает в инверторном режиме при 80% своего максимального напряжения, суммарное напряжение на нагрузке составляет 10% максимального напряжения, равного сумме напряжений обеих групп, когда они работают в выпрямительном режиме.

Для установок большой мощности мостовая схема с независимым управлением анодной и катодной группами (разноуправляемая) может быть выполнена шестифазной.

На рис. 3,а приведены кривые зависимости выпрямленного напряжения E_d , коэффициентов мощности k_m , сдвига k_c и искажения k_u от угла регулирования α_2 катодной группы вентилей полууправляемой мостовой схемы (угол регулирования анодной группы вентилей $\alpha_1 = 0$). На рис. 3,б показаны такие же кривые для обычной симметрично управляемой мостовой схемы.

Реверсивные схемы. Для реверсирования двигателя постоянного тока необходимо изменить направление тока либо в обмотке якоря, либо в обмотке возбуждения двигателя.

В настоящей статье мы ограничимся рассмотрением схем с изменением направления тока в якоре.

Изменение направления тока в якоре может быть осуществлено двумя способами:

а) применением переключателя (рис. 2,б) с автоматическим управлением в зависимости от разности напряжения выпрямителя и э. д. с. двигателя или от тока двигателя; по этому пути пошли многие германские фирмы, осуществившие ряд крупных промышленных установок;

б) применением двух преобразовательных агрегатов (трансформатор может быть выполнен трехмоточным, теплообменник один); этот способ дороже первого, но обеспечивает плавный переход двигателя из двигательного режима в генераторный и обратно, а также минимальное время реверса двигателя, что весьма важно для многих современных приводов.

Реверсивные схемы с двумя преобразовательными агрегатами можно разделить на два класса:

а) схемы, в которых анодные напряжения обоих преобразователей находятся в фазе (рис. 4,а);

б) схемы, в которых анодные напряжения преобразователей находятся в противофазе (рис. 4,б).

Схемы первого класса получили название «перекрестных» или «восьмерочных», схемы второго класса — «встречно-параллельных» или «мостовых реверсивных».

Перекрестные и встречно-параллельные схемы могут выполняться с любым числом фаз.

Перекрестные схемы получили распространение в тот период, когда строились многоанодные вентили. По мере развития одноанодных вентилей намечается определенная тенденция к переходу на встречно-параллельные схемы, позволяющие существенно упростить установки и за счет лучшего использования выпрямительного трансформатора снизить его габаритную мощность приблизительно на 20%.

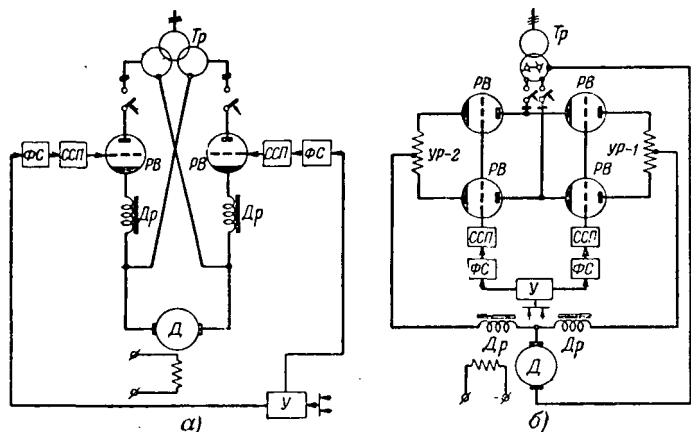


Рис. 4. Реверсивные схемы вентильных электроприводов.

Тр — трансформатор питания; РВ — ртутный выпрямитель; Др — дроссель сглаживающий; Д — двигатель; ФС — система фазовращения; ССП — система сеточного управления; У — усилитель; УР — уравнительный реактор.

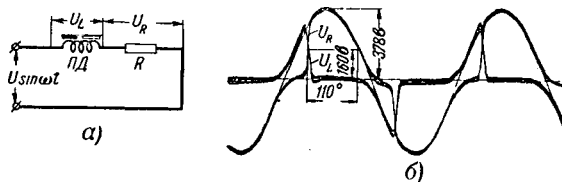


Рис. 5. Принципиальная схема включения пик-дросселя и осциллограммы напряжений на пик-дросселе U_L и активном сопротивлении U_R .

ПД — пик-дроссель; R — активное сопротивление.

Система управления. Как известно, регулирование выпрямленного напряжения вентильного преобразователя осуществляется изменением момента отпирания вентилей при помощи сеток. На сетки вентилей постоянно подается отрицательное «запирающее» напряжение, на которое в нужные моменты времени накладываются положительные «отпирющие» импульсы. Регулирование выпрямленного напряжения сводится к изменению фазы отпирющих импульсов. Это изменение фазы должно происходить под воздействием различных управляющих сигналов, поступающих от органов ручного или автоматического управления.

Системой управления вентильным преобразователем будем называть устройство, состоящее из систем сеточного питания и фазовращения и системы суммирования, формирования и усиления управляющих сигналов.

В ряде случаев суммирование управляющих сигналов может осуществляться в схеме фазовращения или даже в схеме сеточного питания, однако наиболее общим случаем является схема, приведенная на рис. 1.

Схема сеточного питания. Схема сеточного питания включает источник запирающего напряжения (трансформатор и полупроводниковый выпрямитель) и источник отпирющих импульсов, преобразовывающий синусоидальное переменное напряжение в напряжение специальной формы в виде пика с заданной амплитудой.

В качестве источника отпирющих импульсов наибольшее распространение получили схемы с электромагнитными аппаратами — пик-дросселями или пик-трансформаторами. Остановимся на принципе действия этих схем.

На рис. 5,а показана принципиальная схема включения пик-дросселя. Магнитопровод дросселя изготавливается из материала с высокой начальной проницаемостью и крутым коленом кривой намагничивания. До насыщения пик-дросселя все напряжение, приложенное к цепи, приходится на пик-дроссель; после насыщения пик-дросселя все напряжение приходится на сопротивление R. На рис. 5,б приведена осциллограмма напряжений на пик-дросселе U_L и сопротивлении U_R . Напряжение на сопротивлении имеет крутой фронт и может быть использовано для управления сетками ионного аппарата. Ширина и крутизна импульса, снимаемого с сопротивления, определяется параметрами пик-дросселя, а амплитуда импульса зависит от величины на-

пряжения. Параметры пик-дросселя связаны с шириной пика соотношением:

$$\omega Q = \frac{U_o \cdot 10^8}{B_s \omega} \cos^2 \frac{\tau}{2}, \quad (1)$$

где τ — ширина пика (по оси ωt);

B_s — индукция насыщения материала;

ω — число витков обмотки пик-дросселя;

Q — сечение магнитопровода пик-дросселя;

U_o — амплитуда приложенного напряжения;

ω — круговая частота.

Для получения максимальной крутизны пика следует применять конструкции с минимальным рассеянием. Пик-трансформаторы, так же как и пик-дроссели, изготавливаются с насыщающимися сердечниками. Разработано два типа пик-трансформаторов. Один тип по режиму работы приближается к трансформатору тока и представляет собой обычный трансформатор с первичной и вторичной обмотками, но индукция в магнитопроводе выбирается порядка 15 000 ... 17 000 гс. Последовательно с первичной обмоткой включается ненасыщенный дроссель, ограничивающий ток в цепи при насыщении пик-трансформатора. При большой индуктивности ненасыщенного дросселя ток в цепи первичной обмотки пик-трансформатора близок к синусоидальному, поэтому этот тип пик-трансформатора иногда называется пик-трансформатором с синусоидальным током.

Если пренебречь активным сопротивлением цепи, состоящей из первичной обмотки пик-трансформатора и обмотки дросселя, в любой момент времени напряжение сети распределяется между пик-трансформатором и дросселем пропорционально их индуктивностям. Мгновенное значение напряжения на пик-трансформаторе

$$U_{n\tau} = \frac{U_o}{1 + \frac{L_{\partial}}{L_{n\tau}}}, \quad (2)$$

где U_o — напряжение сети;

L_{∂} — индуктивность дросселя;

$L_{n\tau}$ — индуктивность первичной обмотки пик-трансформатора.

На рис. 6,б показана форма кривой напряжения вторичной обмотки пик-трансформатора.

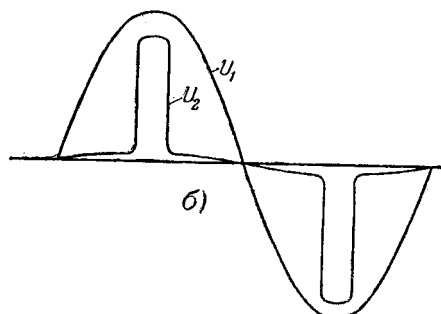
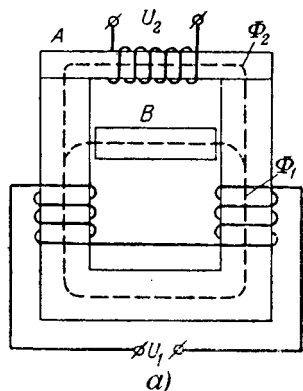


Рис. 6. Принципиальная схема пик-трансформатора и кривые напряжения приложенного к пик-трансформатору U_1 и вторичного напряжения U_2 .

А — сердечник из быстронасыщающегося магнитного материала; В — магнитный шунт; Φ_1 — поток, сцепленный с первичной обмоткой; Φ_2 — поток, сцепленный со вторичной обмоткой.

Выражение, связывающее конструктивные параметры пик-трансформатора и ширину пика, имеет вид:

$$\omega Q = \frac{U_o \cdot 10^8}{B_s \omega} \sin \frac{\tau}{2} \cdot \frac{1}{1+a}, \quad (3)$$

где $a = \frac{L_{\partial}}{L_{n\tau}}$.

При выборе величины a следует руководствоваться следующими соображениями.

Индуктивность L_{∂} должна быть значительно больше индуктивности первичной обмотки пик-трансформатора при его насыщении $L_{n\tau n}$, в противном случае на пик-трансформаторе будет значительное напряжение и между пиками. Индуктивность L_{∂} должна быть мала по сравнению с индуктивностью первичной обмотки пик-трансформатора $L_{n\tau}$ (когда он не насыщен), в противном случае получается значительное снижение амплитуды пика.

Пик-трансформаторы дают относительно узкие пики (30 ... 45 эл. град.); для получения пиков нужной ширины (90 ... 120 эл. град.) приходится соединять последовательно несколько пик-трансформаторов со сдвинутыми друг относительно друга пиками. Завод «Уралэлектраппарат» выпускает так называемые пик-генераторы, состоящие из шести пик-трансформаторов, соединенных по схеме, приведенной на рис. 7.

Благодаря последовательному соединению нескольких первичных обмоток в цепь каждой из них включена добавочная индуктивность других обмоток. Благодаря последовательному соединению 3 ... 4 вторичных обмоток получают пики шириной 90 или 120 эл. град.

Второй тип пик-трансформатора сходен с трансформатором напряжения. К первичной обмотке трансформатора приложено синусоидальное напряжение, следовательно, поток, сцепленный с этой обмоткой, должен иметь синусоидальную форму. Для того чтобы напряжение на вторичной обмотке имело пикообразную форму, магнитный поток, сцепленный с этой обмоткой, должен иметь форму трапеции. Это достигается специальной конструкцией магнитопровода с магнитным шунтом и быстронасыщающимся стержнем из пермаллоя, на котором расположена вторичная обмотка (рис. 6,а). До насыщения этого стержня основной поток, создаваемый первичной обмоткой, сцепляется со вторичной обмоткой. Когда стержень насыщается, избыточный поток

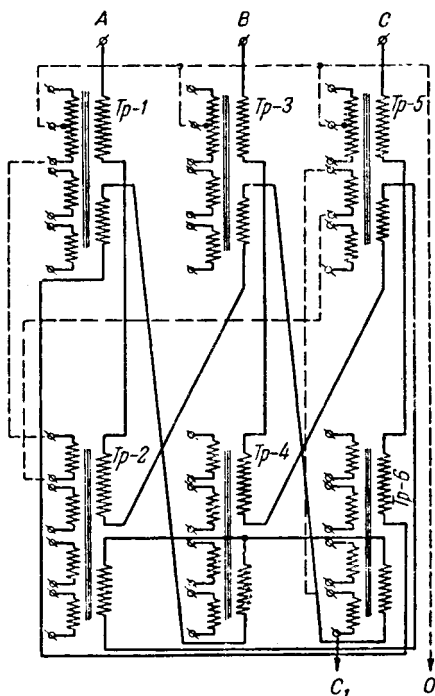


Рис. 7. Схема пик-генератора завода „Уралэлектроаппарат“ (ширина пика 120 эл. град.).
Тр-1 ... Тр-6 — пик-трансформаторы.

замыкается через магнитный шунт с небольшим воздушным зазором. Форма вторичного напряжения пик-трансформатора этого типа такая же, как у пик-трансформатора синусоидального тока (рис. 6,б). Пик-трансформаторы этого типа установлены на первых промышленных установках вентильного электропривода.

В последние годы все большее распространение получают схемы с пик-дросселями. На рис. 8 приведена схема сеточного питания с пик-дросселями для вентильного преобразователя, соединенного по шестифазной нулевой схеме. Трансфор-

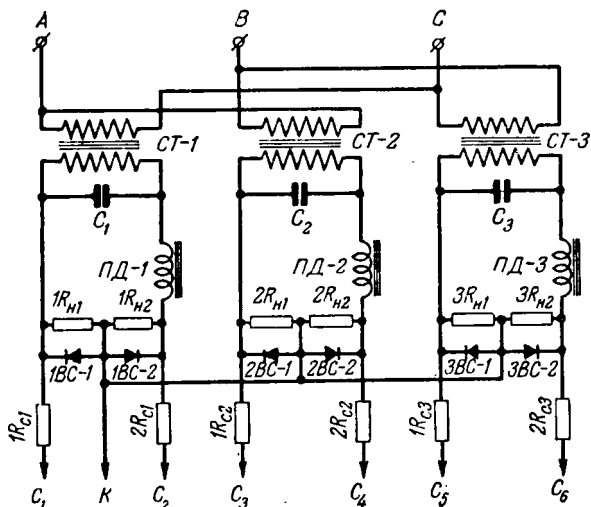


Рис. 8. Схема сеточного питания с пик-дросселями для вентильного преобразователя, соединенного по шестифазной нулевой схеме.

СТ-1 ... СТ-3 — сеточные трансформаторы; ПД-1 ... ПД-3 — пик-дроссели; 1BC-1 ... 3BC-2 — полупроводниковые выпрямители; C₁ ... C₃ — конденсаторы; 1R_{н1} ... 3R_{н2} — нагрузочные сопротивления; 1R_{с1} ... 2R_{с3} — сеточные сопротивления.

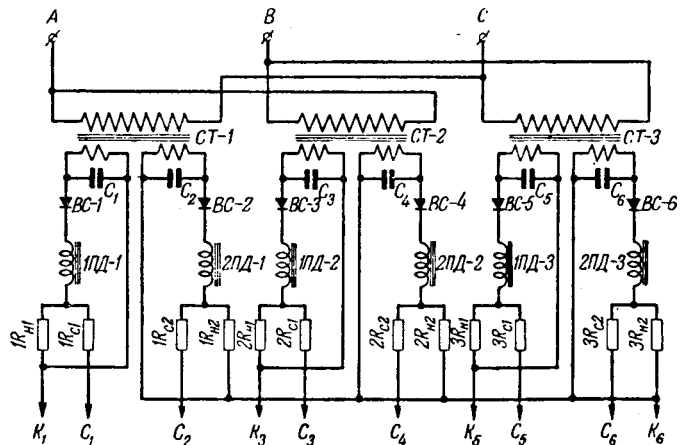


Рис. 9. Схема сеточного питания для вентильных преобразователей, соединенных по трехфазной мостовой схеме.

СТ-1 ... СТ-3 — сеточные трансформаторы; BC-1 ... BC-6 — вентили среза; ПД-1 ... ПД-3 — пик-дроссели; C₁ ... C₃ — конденсаторы; 1R_{н1} ... 3R_{н2} — нагрузочные сопротивления; 1R_{с1} ... 2R_{с2} — сеточные сопротивления.

маторы СТ-1 ... СТ-3 изолируют сеточные цепи от фазорегулятора.

На рис. 9 приведена схема сеточного питания для вентильных преобразователей, соединенных по трехфазной мостовой схеме. В отличие от предыдущей схемы сеточные трансформаторы выполнены трехобмоточными, каждый для питания двух пик-дросселей. Полупроводниковые вентили BC-1 ... BC-6 обеспечивают снятие ненужных отрицательных пиков и уменьшение потребляемой мощности.

Схема фазовращения. В течение длительного времени для сдвига фазы сеточного напряжения применялись индукционные фазорегуляторы, которые при необходимости дистанционного управления и автоматизации снабжались сервоприводом. Применение индукционного фазорегулятора, управляемого сервомотором, не позволяет использовать наиболее ценное свойство вентильного преобразователя — его безынерционность, поэтому в последние годы в автоматизированных электроприводах индукционные фазорегуляторы используются лишь как установочные, а сдвиг фазы осуществляется при помощи различных статических аппаратов. Разработанные системы обеспечивают большую скорость изменения напряжения преобразователя. По литературным данным [Л. 2], если принять номинальное напряжение преобразователя за 100%, то для электромашинного преобразователя (в системе генератор — двигатель) скорость нарастания напряжения составляет 100 ... 300% в секунду, а для вентильного преобразователя достигает 10 000% в секунду.

Наиболее просто сдвиг фазы осуществляется в схеме с пик-трансформаторами. При подмагничивании пик-трансформаторов постоянным током фаза сеточного напряжения изменяется. С точки зрения быстродействия этот способ можно считать практически безынерционным. Мощность управления невелика, однако диапазон изменения фазы у пик-трансформаторов обоих описанных типов не превышает $\pm(40 \dots 60 \text{ эл. град.})$. Уже при

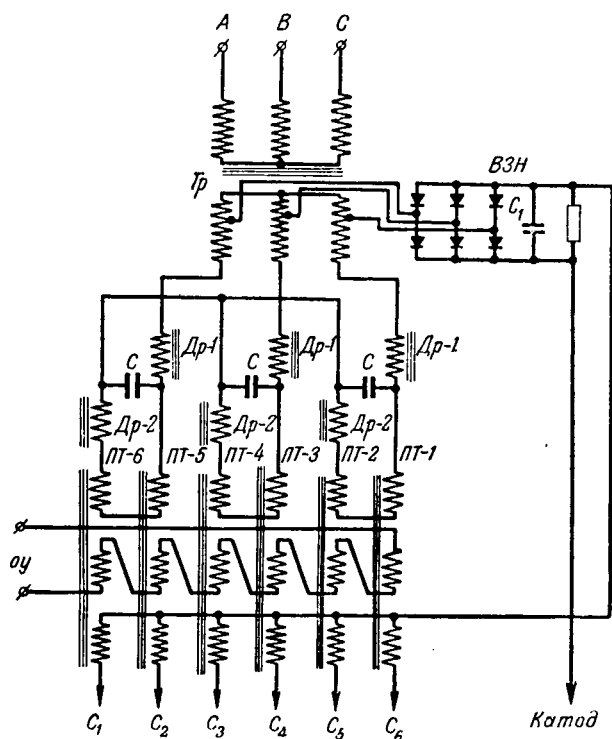


Рис. 10. Схема сеточного питания с пик-трансформаторами, питающимися током треугольной формы.

Тр — трансформатор питания, ВЗН — выпрямитель запирающего напряжения; ПТ-1 ... ПТ-6 — пик-трансформаторы; оу — обмотка подмагничивания пик-трансформаторов; Др-1, Др-2 — дроссели; С — конденсаторы.

сдвиге на 60 эл. град. амплитуда пика и крутизна резко падают. Для расширения диапазона сдвига пика применяются специальные схемы, в которых первичная обмотка пик-трансформатора питается током треугольной формы. Это позволяет расширить диапазон сдвига фазы до $\pm(70 \dots 75 \text{ эл. град.})$ без значительного изменения крутизны. Этот диапазон сдвига полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к схеме вентильного электропривода. Основными недостатками такой системы является малая ширина пика (30 ... 40 эл. град.) и сравнительно небольшая крутизна. На рис. 10 приведена схема, в которой при помощи фильтра, состоящего из дросселей Др-1, Др-2 и конденсатора С, синусоидальный ток преобразуется в ток треугольной формы для питания первичных обмоток пик-трансформаторов ПТ.

В схемах с пик-дросселями для сдвига отпирающих пиков также можно применить подмагничивание пик-дросселей, однако в этих схемах диапазон изменения сдвига получается меньше, чем в схемах с пик-трансформаторами (порядка 20 ... 25 эл. град.).

Широкое применение нашли четырехполосники, состоящие из активного и реактивного сопротивлений. Четырехполосники, содержащие в качестве реактивного плеча дроссель насыщения, получили название статических фазорегуляторов.

На рис. 11 приведена схема статического фазорегулятора, теория которого изложена в работе А. А. Булгакова [Л. 3]. Как следует из схемы, фазорегулятор представляет собой мост, в котором два плеча образованы вторичными обмотками

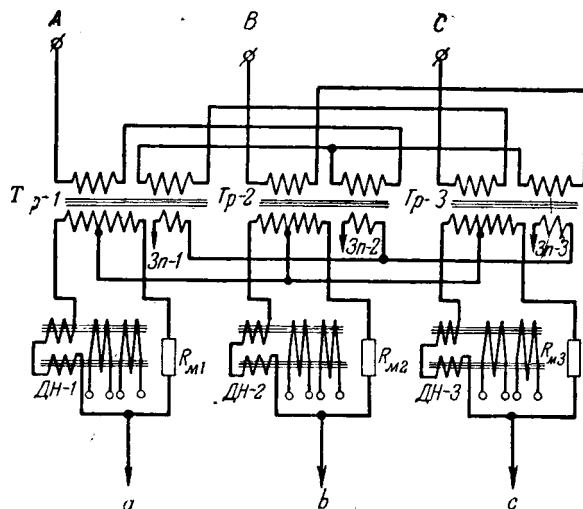


Рис. 11. Схема статического фазорегулятора.

Тр-1 ... Тр-3 — трансформаторы питания, ДН-1 ... ДН-3 — дроссели насыщения, 3П-1 ... 3П-3 — обмотки для питания выпрямителей смещения.

трансформатора питания; одно плечо представляет собой активное сопротивление, а другое — реактивное. В качестве реактивного плеча, как уже указывалось выше, используется дроссель с подмагничиванием, что позволяет наиболее просто решить вопросы дистанционного управления. Для того чтобы напряжение на сетках не менялось по величине при изменении фазы, напряжения на полуобмотках должны удовлетворять соотношению:

$$\frac{U_2}{U_1} = 1 + \frac{R_m}{r_{дк}}, \quad (4)$$

где R_m — сопротивление активного плеча моста;

$r_{дк}$ — сопротивление нагрузки, шунтированной емкостью, для компенсации реактивной составляющей тока;

U_1 — напряжение на полуобмотке трансформатора, подключенной к реактивному плечу;

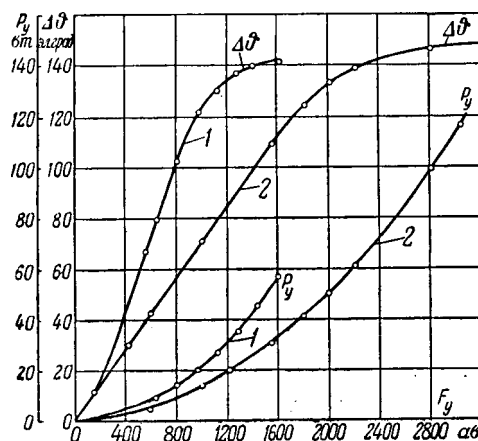


Рис. 12. Характеристики статических фазорегуляторов.

1 — статический фазорегулятор типа ФС-1 завода «Уралэлектротраппарат»; 2 — статический фазорегулятор, разработанного ЦКБ «Электропривод».
 P_y — мощность управления; $\Delta\varphi$ — угол сдвига фаз; F_y — н. с. обмотки управления.

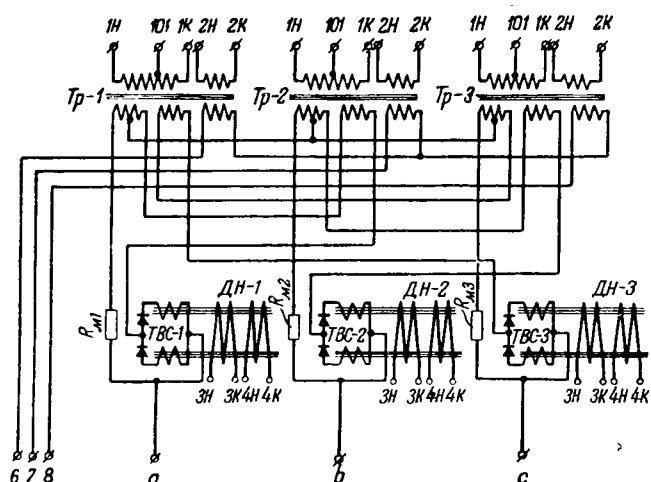


Рис. 13. Схема статического фазорегулятора с расширенным диапазоном сдвига фазы и малой мощностью управления.

Тр-1 ... Тр-3 — трансформаторы питания; ДН-1 ... ДН-3 — дроссели насыщения; ТВС-1 ... ТВС-3 — полупроводниковые вентили.

U_2 — напряжение на полуобмотке трансформатора, подключенной к активному плечу.

Если обозначить кратность изменения тока в реактивном плече через k_i , а кратность изменения индукции l в дросселе насыщения через k_B , то диапазон изменения сдвига фазы может быть определен из выражения:

$$\Delta\theta = 2 \left[\operatorname{arctg} k_i - \operatorname{arctg} \frac{1}{k_B} \right]. \quad (5)$$

На рис. 12 приведены характеристики статических фазорегуляторов описанного типа, выпускаемых заводом «Уралэлектроаппарат» (тип ФС-1) и разработанного ЦКБ «Электропривод». Фазорегулятор типа ФС-1 обеспечивает сдвиг фазы на 140 эл. град.; при этом мощность управления равна 45 вт. Завод «Уралэлектроаппарат» указывает, что при мощности управления 250 вт напряжение на выходе вентильного преобразователя устанавливается за 0,06 сек (скорость нарастания напряжения составляет приблизительно 1600% в секунду). Фазорегулятор, разработанный ЦКБ «Электропривод», обеспечивает угол сдвига 140 ... 150 эл. град. Мощность управления его при сдвиге на 140 эл. град. равна 60 вт. Быстродействие фазорегулятора примерно равно быстродействию фазорегулятора типа ФС-1.

На рис. 13 приведена схема статического фазорегулятора с расширенным диапазоном сдвига фазы и малой мощностью управления, разработанная ЦКБ «Электропривод». В приведенной схеме напряжение, к которому подключается

¹ Коэффициент k_B характеризует кратность изменения напряжения на дросселе.

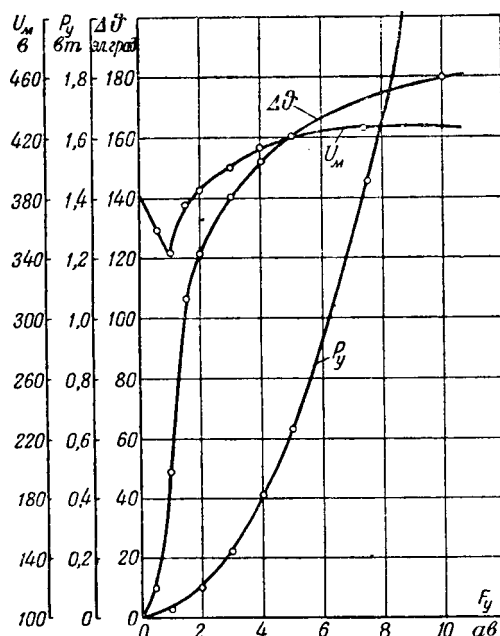


Рис. 14. Характеристики фазорегулятора с расширенным диапазоном сдвига фазы и малой мощности при напряжении сети $U_c = 380$ в и токе в обмотке смещения $I_{cm} = 30$ ма.

U_m — амплитуда сетевого напряжения; P_y — мощность управления; $\Delta\theta$ — угол сдвига фазы; F_y — н. с. обмотки управления.

реактивное плечо, состоит из двух компонент, сдвинутых на 120 эл. град., что расширяет диапазон сдвига фазы. Применение в качестве реактивного плеча дросселя с самовозбуждением примерно в 300 раз снижает мощность управления, что позволяет управлять фазорегулятором от электронных ламп или полупроводниковых триодов.

Характеристика фазорегулятора такого типа приведена на рис. 14. Из приведенной характеристики следует, что величина (амплитуда) напряжения на сетке при изменении сдвига фазы изменяется примерно на $\pm 15\%$, что вполне допустимо.

Быстродействие фазорегулятора с малой мощностью управления, характеризующееся временем полного установления напряжения на выходе вентильного преобразователя, равно 0,06 ... 0,07 сек при мощности управления 2 ... 2,5 вт.

Схемы суммирования, формирования и усиления управляющих сигналов являются, как указывалось выше, частью системы управления; они будут рассмотрены в отдельной работе.

Литература

1. G. Reinhardt. Современное развитие выпрямителей. Technische Mitteilungen, № 7—8, 1954.
2. Friedrich Hölters. Применение выпрямителей в электроприводе. AEGM, № 5/6, 1951.
3. А. А. Булгаков. Электронные устройства автоматического управления. Госэнергоиздат, 1951.

[11. 5. 1956]



Настройка статических систем авторегулирования

Кандидат техн. наук В. Г. ЧУИЧ

Уральский политехнический институт им. Кирова

Статическая система автоматического регулирования в общем виде может быть представлена схемой, изображенной на рис. 1. Схема состоит из прямой цепи системы с передаточным коэффициентом μ , охваченной цепью обратной связи с коэффициентом ν .

Схеме рис. 1 могут соответствовать различные реальные системы, например системы автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока или скорости вращения двигателя с электромашинными усилителями, электронный усилитель с отрицательной обратной связью и др.

Качество системы регулирования оценивается по ее способности воспроизводить с требуемой точностью входной сигнал в виде соответствующей выходной величины.

В установившемся режиме основными показателями, характеризующими систему регулирования, являются ошибка и передаточный коэффициент замкнутой системы.

Как известно, отрицательная обратная связь в $1 + \mu\nu$ раз уменьшает, а положительная обратная связь в $\frac{1}{1 - \mu\nu}$ раз увеличивает передаточный коэффициент и ошибку по сравнению с разомкнутой системой. При этом в случае положительной обратной связи необходимым условием устойчивой работы системы является $\mu\nu < 1$.

Передаточный коэффициент и ошибка замкнутой системы определяются выражениями:

$$D = \frac{\mu}{1 \pm K}; \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{1 \pm K}, \quad (2)$$

где $K = \mu\nu$ — передаточный коэффициент разомкнутой системы;

$\delta = \frac{\Delta\mu}{\mu_0}$ — относительное изменение коэффициента μ (ошибка разомкнутой системы);

μ_0 — расчетное значение коэффициента μ .

В выражениях (1) и (2) верхний знак относится к отрицательной обратной связи, а нижний — к положительной.

Выходная величина системы может отклоняться от своего заданного значения (или от предписанного закона ее изменения) под влиянием различных возмущающих воздействий, таких, как: изменение нагрузки, изменение скорости вращения якоря и сопротивления обмоток машин, нелинейность характеристик (насыщение, гистерезис), непостоянство питающего напряжения и т. п.

В выражения (1) и (2) входит действительное значение коэффициента K , которое обычно не соответствует расчетному значению $K_0 = \mu_0\nu_0$, так как почти все возмущающие воздействия приводят к тем или иным изменениям коэффициентов μ и ν , а следовательно, и K .

В связи с этим целесообразно рассматривать ошибки системы регулирования как результат изменения ее передаточного коэффициента D , зависящего, в свою очередь, от изменения коэффициентов μ и ν .

Для схемы рис. 1 справедливо выражение

$$U_{вых} = DU_{вх}.$$

Если входной сигнал $U_{вх}$ является точным, то относительная ошибка системы, определяемая формулой (2), численно равна относительному изменению передаточного коэффициента

$$\varepsilon = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{D_0 - D}{D_0}. \quad (3)$$

Расчетное значение передаточного коэффициента замкнутой системы (при отсутствии возмущающих воздействий)

$$D_0 = \frac{\mu_0}{1 \pm \mu_0\nu_0}, \quad (4)$$

где ν_0 — расчетное значение коэффициента обратной связи.

Пусть под влиянием возмущающих воздействий коэффициенты μ_0 и ν_0 изменились, причем $\mu = \mu_0 - \Delta\mu$ и $\nu = \nu_0 - \Delta\nu$. При этом передаточный коэффициент замкнутой системы

$$D = \frac{\mu}{1 \pm \mu\nu}. \quad (5)$$

Подставив (4) и (5) в (3) и произведя преобразования (приложение I), получим:

$$\varepsilon = \frac{\delta \mp (1 - \delta)\lambda K_0}{1 \pm (1 - \delta)(1 - \lambda)K_0}, \quad (6)$$

где $\lambda = \frac{\Delta\nu}{\nu_0}$ — относительное изменение коэффициента обратной связи.

Если возмущающим воздействиям подвергается только прямая цепь системы, то, положив в (6) $\lambda = 0$, получим:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{1 \pm (1 - \delta)K_0}. \quad (7)$$

Если изменяется только коэффициент обратной связи, то из (6) при $\delta = 0$:

$$\varepsilon = \frac{\lambda K_0}{1 \pm (1 - \lambda)K_0}. \quad (8)$$

В формулах (6) ... (8) верхний знак относится к отрицательной обратной связи, а нижний — к положительной.

В [Л. 1 и 2] получены формулы, позволяющие определить ошибку статической системы регулирования, обусловленную некоторыми возмущающими воздействиями в электрических машинах постоянного тока. Однако эти формулы охватывают лишь несколько частных случаев

* В зависимости от характера возмущающего воздействия $\Delta\mu$ и $\Delta\nu$ могут быть как положительными, так и отрицательными величинами.

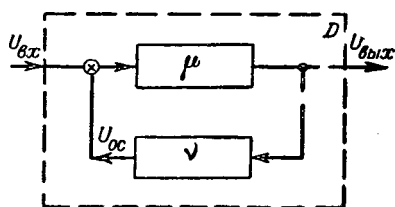


Рис. 1. Структурная схема статической системы автоматического регулирования.

$U_{вх}$ — входной сигнал; $U_{ос}$ — сигнал обратной связи;
 $U_{вых}$ — выходная (регулируемая) величина.

(изменение скорости вращения якоря генератора, сопротивления обмоток и др.). Кроме того, при одновременном влиянии нескольких возмущающих воздействий указанные формулы становятся громоздкими.

Ввиду этого представляется более удобным пользоваться при расчете установившихся ошибок формулами (6) ... (8), справедливыми для всех систем, которые могут быть представлены схемой рис. 1. Численные значения δ и λ в каждом конкретном случае могут быть сравнительно просто определены расчетным путем на основании известных зависимостей или из опытных данных (по кривым намагничивания, характеристикам усилителей и т. п.).

В тех случаях, когда одно или несколько звеньев, входящих в прямую цепь системы, охвачены местными обратными связями, ошибка системы находится аналогичным образом последовательным применением формул (6) ... (8) к внутренним замкнутым контурам системы и заменой последних эквивалентными звеньями в соответствии с известными в теории автоматического регулирования способами преобразования структурных схем.

Из рассмотрения формулы (7) следует, что при одинаковом по величине отклонении передаточного коэффициента прямой цепи системы от его расчетного значения величина ошибки системы будет зависеть от знака этого отклонения. В случае отрицательной обратной связи при $\delta > 0$, что соответствует уменьшению μ , величина $|\varepsilon|$ будет больше, чем при $\delta < 0$, соответствующем увеличению μ . Это объясняется тем, что при увеличении μ возрастают регулирующие свойства замкнутой системы вследствие увеличения передаточного коэффициента разомкнутой системы K .

В случае положительной обратной связи, наоборот, $|\varepsilon|$ будет больше при $\delta > 0$, чем при $\delta < 0$. В связи с этим представляет интерес вопрос о наивыгоднейшей настройке системы в смысле снижения ее максимальной ошибки.

Графики зависимости $D = f(\mu)$ при $\nu = \text{const}$ изображены на рис. 2.

Как видно из графиков, при установке в системе расчетного значения $\mu = \mu_0$ (что при отсутствии возмущающего воздействия дало бы расчетное значение $D = D_0$) максимальные отклонения передаточного коэффициента замкнутой системы $\Delta D'_+$ и $\Delta D'_-$, соответствующие уменьшению и увеличению μ , не равны между собой (на рисун-

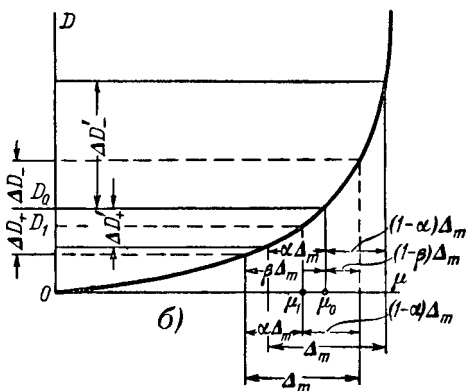
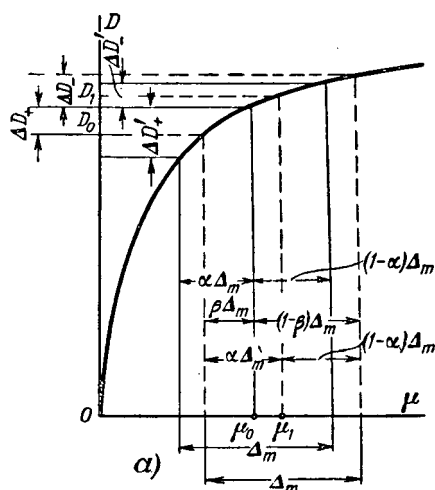


Рис. 2. Зависимость $D = f(\mu)$ при отрицательной (а) и положительной (б) обратных связях.

D_1 — передаточный коэффициент замкнутой системы, соответствующий наивыгоднейшей настройке системы.

ках взято $\alpha = 0,5^{**}$, т. е. предполагается $|\delta_+| = |\delta_-|$, где δ_+ и δ_- — максимальные относительные изменения коэффициента μ соответственно в сторону его уменьшения и увеличения).

Если же установить коэффициент $\mu = \mu_1$, соответствующий наивыгоднейшей настройке системы, разделив Δ_m в отношении $\frac{\beta}{1-\beta}$ так, чтобы $|\Delta D'_+| = |\Delta D'_-|$, то максимальное отклонение передаточного коэффициента D от расчетного значения D_0 , а следовательно и максимальная ошибка системы будут наименьшими.

Требуемое значение коэффициента μ_1 определяется из рис. 2.

$$\mu_1 = \mu_0 + (\alpha - \beta) \Delta_m, \quad (9)$$

причем в зависимости от соотношения величин α и β величина μ_1 может быть больше или меньше μ_0 .

Таким образом, задача сводится к определению величины β , которую можно найти из условия

** α — множитель, показывающий, в каком отношении делится полный диапазон Δ_m (или в относительных единицах $\delta_m = \frac{\Delta_m}{\mu_0}$) изменений коэффициента μ .

равенства абсолютных значений относительной ошибки системы при уменьшении и увеличении μ .

Разделив δ_m в отношении $\frac{\beta}{1-\beta}$, будем иметь:

$$\delta_+ = \beta \delta_m \text{ и } \delta_- = -(1-\beta) \delta_m,$$

причем $0 < \epsilon < 1$.

Подставив δ_+ и δ_- в (7), получим:

$$\epsilon_+ = \frac{\beta \delta_m}{1 \pm (1-\beta \delta_m) K_o}; \quad (10)$$

$$\epsilon_- = \frac{-(1-\beta) \delta_m}{1 \pm [1 + (1-\beta) \delta_m] K_o}, \quad (11)$$

где ϵ_+ и ϵ_- — положительная и отрицательная ошибки замкнутой системы.

Условие равенства абсолютных значений положительной и отрицательной ошибок может быть записано в следующем виде:

$$\epsilon_+ = -\epsilon_- \quad (12)$$

Подставив (10) и (11) в (12), получим уравнение:

$$\pm 2\delta_m K_o \beta^2 - 2(1 \pm K_o \pm \delta_m K_o) \beta + 1 \pm K_o = 0,$$

из которого найдем требуемое значение β :

$$\beta = \frac{1}{2\delta_m K_o} [\delta_m K_o \pm (1 \pm K_o) \mp \sqrt{(\delta_m K_o)^2 + (1 \pm K_o)^2}]. \quad (13)$$

В последнем выражении верхний знак (в том числе перед корнем) относится к отрицательной обратной связи, а нижний — к положительной обратной связи (приложение II).

Определив β , можно по формуле (9) найти значение $\mu = \mu_1$, соответствующее наивыгоднейшей настройке системы.

В тех случаях, когда речь идет о том, какое значение μ следует взять за расчетное при известных пределах его изменения с тем, чтобы возможная ошибка была наименьшей (например, при расчете масштаба входного сигнала), из (9) определяется μ_o при данной величине μ_1 , в качестве которой берется одно из значений μ внутри диапазона Δ_m .

Пример. Рассмотрим систему регулирования напряжения генератора постоянного тока с электромашинным усилителем (рис. 3). Структурная схема системы приведена на рис. 4.

Система регулирования подвергается следующим возмущающим воздействиям:

- а) скорости вращения якорей усилителя и генератора изменяются на $\pm 10\%$ номинальной;
- б) сопротивление обмотки возбуждения генератора вследствие нагрева увеличивается на 2 ом;
- в) сопротивление нагрузки может уменьшаться на 0,16 ом и увеличиваться на 0,05 ом.

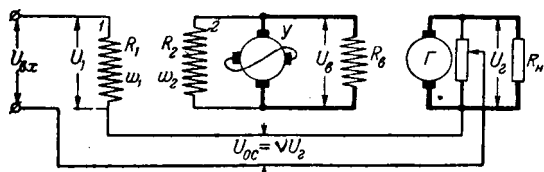


Рис. 3. Система автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока.

У — электромашинный усилитель; Г — генератор.

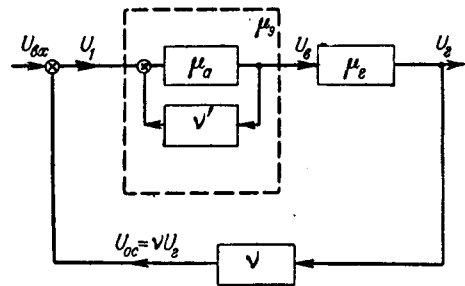


Рис. 4. Структурная схема системы автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока (рис. 3).

Передаточный коэффициент усилителя

$$\mu_a = \frac{U_a}{U_1} = -\frac{m_a}{R_1 \left(1 + \frac{R_a}{R_s}\right)}; \quad (14)$$

передаточный коэффициент генератора

$$\mu_z = \frac{U_z}{U_a} = \frac{m_z}{R_s \left(1 + \frac{R_z}{R_n}\right)}; \quad (15)$$

коэффициент местной отрицательной обратной связи

$$v' = \frac{R_1 \omega_2}{R_2 \omega_1}, \quad (16)$$

где R_1 и ω_1 — сопротивление и число витков обмотки 1 усилителя;

R_2 и ω_2 — сопротивление и число витков обмотки 2 усилителя;

R_a и R_z — сопротивления якорей усилителя и генератора;

R_s — сопротивление обмотки возбуждения генератора;

R_n — сопротивление нагрузки;

m_a и m_z — коэффициенты, определяемые по кривым намагничивания усилителя и генератора.

Заменим на схеме рис. 4 усилитель, охваченный местной отрицательной обратной связью, эквивалентным звеном с передаточным коэффициентом μ_a . На основании (1)

$$\mu_a = \frac{\mu_a}{1 + \mu_a v'}. \quad (17)$$

Примем следующие численные значения величин:

$$R_1 = 500 \text{ ом}; \omega_1 = 200; R_2 = 2000 \text{ ом}; \omega_2 = 160;$$

$$R_a = 2,4 \text{ ом}; R_z = 0,008 \text{ ом}; R_s = 8 \text{ ом}; R_n = 0,2 \text{ ом};$$

$$m_a = 13000 \text{ в/а}; m_z = 25 \text{ в/а}; \text{коэффициент главной}$$

отрицательной обратной связи системы $v = 0,75$.

Воспользовавшись (14)... (17), получим:

$$\mu_a = 20; \mu_z = 3; v' = 0,2; \mu_a = 4.$$

Передаточный коэффициент прямой цепи системы

$$\mu_o = \mu_a \mu_z = 12;$$

передаточный коэффициент разомкнутой системы

$$K_o = \mu_o v = 9.$$

Определим максимальное относительное изменение μ в сторону его уменьшения.

Учитывая, что коэффициент m_a пропорционален квадрату, а m_z — первой степени скорости вращения якоря, получим:

$$\mu'_a = \frac{0,9^2 \cdot 13000}{500 \left(1 + \frac{2,4}{10}\right)} = 16,98;$$

$$\mu'_z = \frac{0,9 \cdot 25}{10 \left(1 + \frac{0,008}{0,04}\right)} = 1,875.$$

Измененное значение μ_2 равно:

$$\mu_2' = \frac{16,98}{1+16,98 \cdot 0,2} = 3,86$$

и соответствующее значение μ :

$$\mu' = \mu_2' \mu_2 = 3,86 \cdot 1,875 = 7,25.$$

Максимальное относительное изменение μ в сторону его уменьшения:

$$\delta_+ = \frac{\mu_0 - \mu'}{\mu_0} = \frac{12 - 7,25}{12} = 0,396.$$

Максимальное относительное изменение μ в сторону его увеличения определяется аналогичным путем:

$$\mu_a'' = \frac{1,12 \cdot 13\,000}{500 \left(1 + \frac{2,4}{8}\right)} = 24,2;$$

$$\mu_z'' = \frac{1,1 \cdot 25}{8 \left(1 + \frac{0,008}{0,25}\right)} = 3,33;$$

$$\mu_3'' = \frac{24,2}{1 + 24,2 \cdot 0,2} = 4,14;$$

$$\mu'' = \mu_3'' \mu_2'' = 4,14 \cdot 3,33 = 13,8;$$

$$\delta_- = \frac{\mu_0 - \mu''}{\mu_0} = \frac{12 - 13,8}{12} = -0,15.$$

Максимальный предел изменения μ

$$\Delta_m = \mu'' - \mu' = 13,8 - 7,25 = 6,55,$$

или в относительных единицах:

$$\delta_m = \frac{\Delta_m}{\mu_0} = \delta_+ - \delta_- = 0,396 - (-0,15) = 0,546;$$

$$\alpha = \frac{\delta_+}{\delta_m} = \frac{0,396}{0,546} = 0,725.$$

Определим ошибки замкнутой системы по формуле (7):

$$\epsilon_+ = \frac{0,396}{1 + (1 - 0,396) \cdot 9} = 0,0616;$$

$$\epsilon_- = \frac{-0,15}{1 + [1 - (-0,15)] \cdot 9} = -0,0132.$$

Следовательно, максимальная ошибка составляет 6,16%. Для определения наиболее выгодного значения μ найдем β из (13):

$$\beta = \frac{1}{2 \cdot 0,546 \cdot 9} [0,546 \cdot 9 + 1 + 9 - \sqrt{(0,546 \cdot 9)^2 + (1 + 9)^2}] = 0,384.$$

По формуле (9) находим:

$$\mu_1 = 12 + (0,725 - 0,384) \cdot 6,55 = 14,23.$$

Практически осуществить требуемую настройку системы можно, например, изменением масштаба входного напряжения, перенастройкой регулятора скорости вращения приводного двигателя и т. д.

Ошибки системы после перенастройки определяются по формулам (10) и (11):

$$\epsilon_+ = \frac{0,384 \cdot 0,546}{1 + (1 - 0,384 \cdot 0,546) \cdot 9} = 0,0259;$$

$$\epsilon_- = \frac{-(1 - 0,384) \cdot 0,546}{1 + [1 + (1 - 0,384) \cdot 0,546] \cdot 9} = -0,0259.$$

Таким образом, максимальная ошибка в результате перенастройки системы уменьшилась с 6,16 до 2,59%.

Приложение I. Вывод формулы (6). Запишем (5) в следующем виде:

$$D = \frac{\mu_0 - \Delta\mu}{1 \pm (\mu_0 - \Delta\mu)(\nu_0 - \Delta\nu)}. \quad (I,1)$$

Подставив (4) и (I,1) в (3), получим:

$$\epsilon = \frac{(\Delta\mu \pm \Delta\mu \Delta\nu \mu_0 \mp \Delta\nu \mu_0^2)(1 \pm \mu_0 \nu_0)}{\mu_0(1 \pm \mu_0 \nu_0)[1 \pm (\mu_0 - \Delta\mu)(\nu_0 - \Delta\nu)]} = \frac{\frac{\Delta\mu}{\mu_0} \pm \frac{\Delta\mu}{\mu_0} \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \mu_0 \nu_0 \mp \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \mu_0 \nu_0}{1 \pm \left(1 - \frac{\Delta\mu}{\mu_0}\right) \left(1 - \frac{\Delta\nu}{\nu_0}\right) \mu_0 \nu_0} = \frac{\delta \mp (1 - \delta)\lambda K_0}{1 \pm (1 - \delta)(1 - \lambda)K_0}.$$

Приложение II. Определение знака перед корнем в формуле (13). Обозначим: $\delta_m K_0 = a$, $1 + K_0 = b$, $1 - K_0 = c$.

1. При наличии отрицательной обратной связи из (13) имеем:

$$\beta = \frac{1}{2} + \frac{b}{2a} - \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2a}.$$

Для выполнения условия $\beta < 1$ должно быть:

$$\frac{b}{2a} - \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2a} < \frac{1}{2}.$$

Последнее условие всегда выполняется, так как $b - a < \sqrt{a^2 + b^2}$ или $(b - a)^2 < a^2 + b^2$, откуда следует $2ab > 0$.

Так как a и b , существенно положительные величины, то неравенство справедливо.

Если же взять перед корнем плюс, то

$$\beta = \frac{1}{2} + \frac{b}{2a} + \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2a}.$$

В данном случае $\frac{b}{2a} + \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2a} > \frac{1}{2}$, так как

$\sqrt{a^2 + b^2} > a - b$ или $a^2 + b^2 > (a - b)^2$, откуда следует $2ab > 0$.

Следовательно, $\beta > 1$, что противоречит условию.

2. При наличии положительной обратной связи

$$\beta = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{a^2 + c^2}}{2a} - \frac{c}{2a}.$$

Можно показать, что $\frac{\sqrt{a^2 + c^2}}{2a} - \frac{c}{2a} < \frac{1}{2}$. Действи-

тельно, $\sqrt{a^2 + c^2} < a + c$ или $a^2 + c^2 < (a + c)^2$, откуда следует неравенство $2ac > 0$, которое всегда выполняется, так как a и c — существенно положительные числа. Следовательно $\beta < 1$.

Если же перед корнем взять минус, то

$$\beta = \frac{1}{2} - \left(\frac{\sqrt{a^2 + c^2}}{2a} + \frac{c}{2a} \right).$$

В этом случае

$$\frac{\sqrt{a^2 + c^2}}{2a} + \frac{c}{2a} > \frac{1}{2}.$$

Последнее выражение соответствует уже рассмотренному случаю минуса перед корнем при отрицательной обратной связи, если заменить c на b . Следовательно, $\beta < 0$, что противоречит условию.

Таким образом, в случае отрицательной обратной связи в формуле (13) перед корнем должен быть знак минус, а в случае положительной обратной связи — плюс.

Литература

1. Е. Л. Эттингер. Метод относительных единиц в применении к расчету точности регулирования статических систем в установившемся режиме. Электричество, № 11, 1950.

2. С. Ф. Березниковский. Быстродействие и точность регулирования машин постоянного тока при помощи электромашинных усилителей с поперечным полем. ВЭП, № 10, 1950.

[17.8. 1955]

Электрические схемы замещения электрогидроприводов

Доктор техн. наук, проф. М. Г. ЧИЛИКИН
Московский энергетический институт им. Молотова
Кандидат техн. наук А. М. КОРЫТИН
Одесский политехнический институт

Введение. Дальнейшее развитие теории силового электрогидропривода [Л. 1 ... 4] требует рассмотрения современных методов регулирования и стабилизации скорости в подобных системах, а также разработку их электрических схем замещения. Схемы замещения позволяют заменить гидравлическую часть эквивалентной ей электрической, благодаря чему в значительной мере упрощается анализ всей системы привода. Так, например, электрогидроприводы с регулированием скорости гидродвигателя при помощи последовательно присоединенного дросселя имеют механические характеристики, подобные характеристикам двигателя параллельного возбуждения при шунтировании якоря. В таких схемах (рис. 1, а) скорость перемещения поршня определяется дросселем, который имеет характеристику

$$Q_{др} = c \Delta p^\alpha = c (p_1 - p_2)^\alpha, \quad (1)$$

где $Q_{др}$ — расход рабочей жидкости через дроссель, равный расходу жидкости через гидродвигатель;
 c — коэффициент, зависящий от открытия дросселя и других факторов;
 α — характеристика дросселя (обычно $\alpha = 0,5 \dots 1,0$);
 $\Delta p = p_1 - p_2$ — перепад давления в дросселе;
 $p_1 = p_0 - p_{др} - \Delta p_{тн}$; $p_2 = \Delta p_{тс}$; $\Delta p_{тн}$ и $\Delta p_{тс}$ — потери давления в напорной и сливной трассах.

Если потери давления в трассах отнести к давлению настройки клапана p_0 , то в относительных единицах уравнение механической характеристики электрогидропривода [Л. 1] примет вид:

$$v_{др} = u_f \frac{(\varphi_0 - \varphi_{др})^\alpha}{\varphi_0^\alpha} - \varphi_{др} s_{др}, \quad (2)$$

где $v_{др}$ — скорость гидродвигателя;
 u_f — степень раскрытия щели дросселя;
 $\varphi_{др}$ — усилие, обусловленное нагрузкой гидродвигателя;
 φ_0 — усилие, соответствующее давлению настройки переливного клапана;
 $s_{др}$ — номинальное скольжение гидродвигателя.

Если дроссель имеет характеристику $\alpha = 1$, то (2) может быть записано в иной форме:

$$v_{др} = u_f - \varphi_{др} \left(s_{др} + \frac{u_f}{\varphi_0} \right). \quad (2a)$$

Сравнивая это выражение с уравнением механической характеристики электродвигателя параллельного возбуждения при шунтировании якоря (в относительных единицах)

$$v = \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_n} - u \left(r_{др} + \frac{r_{ш} r_n}{r_{ш} + r_n} \right), \quad (3)$$

можно установить, что u_f соответствует $\frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_n}$, а $\frac{1}{\varphi_0}$ соответствует r_n . Подобная схема замещения (рис. 1, б) действительна в случае аналогий: давление соответствует току, расход жидкости — напряжению. Справедливость таких аналогий показана в [Л. 1 и 2].

Простейшим способом поддержания постоянства скорости гидроприводов является изменение степени закрытия щели дросселя при изменении нагрузки. Так, при увеличении нагрузки необходимо больше открыть дроссель, чтобы сохранить расход рабочей жидкости через него примерно постоянным. В этом случае скорость также будет поддерживаться на определенном уровне.

Стабилизация скорости возможна в сторону уменьшения нагрузки и ограничивается механической характеристикой при $u_f = 1$, как это показано на рис. 1, в.

Зависимость между степенью раскрытия щели дросселя и нагрузкой гидродвигателя при заданной скорости v_i имеет вид:

$$u_f = \frac{v_i + \varphi_{др} s_{др}}{1 - \frac{\varphi_{др}}{\varphi_0}}. \quad (4)$$

Максимальное (предельное) усилие, обусловленное нагрузкой, при котором будет сохранена скорость v_i , определится из (4) после подстановки $u_f = 1$:

$$\varphi_{др.пр} = \frac{\varphi_0 (1 - v_i)}{1 + \varphi_0 s_{др}}. \quad (5)$$

Дальнейшее увеличение нагрузки приведет к снижению скорости по механической характеристике, соответствующей $u_f = 1$. Электрическая

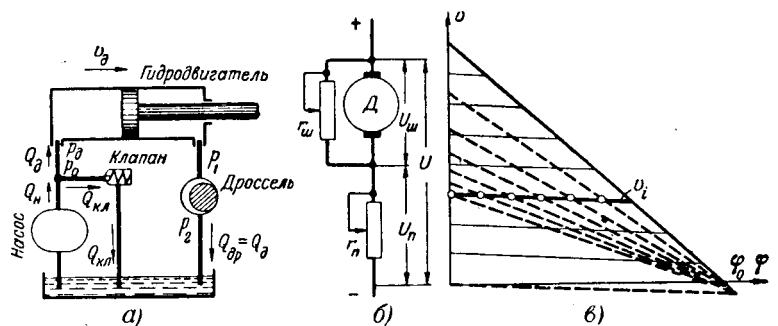


Рис. 1.

а — электрогидропривод с дроссельным регулированием скорости;
б — электрическая схема замещения; в — семейство механических характеристик при переменном закрытии щели дросселя в зависимости от нагрузки гидродвигателя.

схема замещения сохраняется прежней (рис. 1, б). При этом $r_{ш}$ должно изменяться в зависимости от величины нагрузки по следующему закону:

$$r_{ш} = \frac{r_n (\nu_i + \mu r_{\partial})}{1 + \nu_i - \mu (r_n + r_{\partial})}. \quad (6)$$

Это выражение получено из (3) при $\nu = \nu_i = \text{const}$.

Изменение $r_{ш}$ с изменением нагрузки приводит к поддержанию постоянства напряжения на якоре двигателя, что соответствует поддержанию постоянства расхода рабочей жидкости через гидродвигатель.

Ограниченные пределы стабилизации скорости, а также сложность осуществления связи между давлением и величиной щели дросселя не позволили практически применить регулирование по этому методу. Обычно стабилизацию скорости осуществляют путем поддержания постоянства перепада давления на дросселе. Для этой цели применяют редукционные клапаны. Введение в схему электрогидропривода редукционного клапана позволяет изменить качества привода: повысить жесткость механических характеристик и несколько улучшить энергетические показатели привода.

Принципиально возможны две схемы включения редукционного клапана. В первой из них он работает совместно с переливным клапаном, а во второй он выполняет также функции переливного клапана.

Электрическая схема замещения электрогидропривода с редукционным клапаном, действующим совместно с переливным. На рис. 2, а изображена одна из схем включения редукционного клапана; на рис. 2, б приведено схематическое изображение принципа действия стабилизатора. В этой схеме постоянство расхода рабочей жидкости через дроссель и, следовательно, неизменность скорости гидродвигателя обеспечиваются путем поддержания постоянного давления до дросселя: при

$$p_2 = \Delta p_{т.с} = R_{т.с} Q_{\partial p}^2 = \text{const}$$

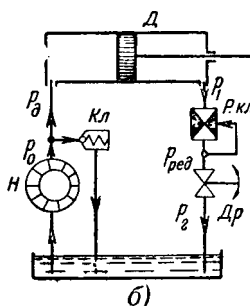
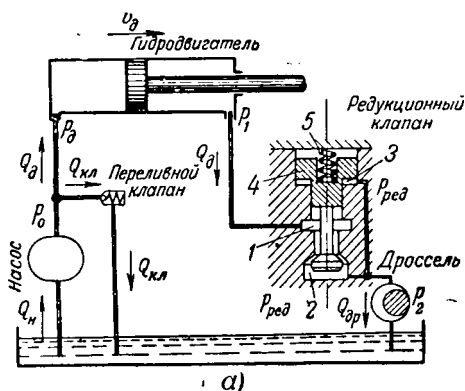


Рис. 2. Схема электрогидропривода со стабилизатором скорости (редукционным клапаном) до дросселя.

а — конструктивное устройство редукционного клапана; б — условное обозначение элементов схемы.

перепад давления в дросселе

$$\Delta p = p_{ред} - p_2 = \text{const}.$$

В полость 1 клапана из гидродвигателя поступает рабочая жидкость под давлением $p_1 = p_0 - p_{\partial}$, где p_0 и p_{∂} — давления, определяемые соответственно настройкой переливного клапана и нагрузкой гидродвигателя.¹ Если нагрузка равна заданной, то клапан 4 вследствие равенства усилий, действующих на него, находится в определенном положении. Для давления $p_{\partial 1}$ уравнение равновесия имеет следующий вид:

$$f_{np.1} - s_1 p_{ред} - s_2 p_0 + s_2 p_{\partial 1} = 0, \quad (7)$$

где $f_{np.1}$ — усилие пружины 5;

s_1 — активная поверхность клапана в полостях 2 и 3;

s_2 — активная поверхность клапана в полости 1.

При изменении нагрузки гидродвигателя давление в полости 1 изменяется и равновесие клапана нарушается:

$$f_{np.1} - s_1 p_{ред} - s_2 p_0 + s_2 p_{\partial 2} = \pm f_{рез}. \quad (7a)$$

Знак результирующего усилия определяется изменением $p_{\partial 2}$ относительно $p_{\partial 1}$. Клапан займет новое положение, когда усилие пружины под действием сжатия или растяжения примет значение $f_{np.2}$, т. е. когда наступает новое равновесие системы:

$$f_{np.2} - s_1 p_{ред} - s_2 p_0 + s_2 p_{\partial 2} = 0. \quad (7б)$$

Если $p_{\partial 2} > p_{\partial 1}$, что соответствует уменьшению давления p_1 в полости 1, то усилие $f_{рез}$ направлено в сторону действия усилия пружины. При этом клапан опускается вниз, щель его увеличивается, а потери давления в клапане уменьшаются настолько, что редуцированное давление остается постоянным:

$$p_{ред} = p_1 - \Delta p_{кл} = p_0 - p_{\partial} - \Delta p_{кл} = \text{const}. \quad (8)$$

Так как $p_0 = \text{const}$, то для поддержания постоянства $p_{ред}$ изменение давления нагрузки должно компенсироваться соответствующим изменением потерь давления в клапане. Последние определяются расходом рабочей жидкости через щель клапана и его сопротивлением протеканию жидкости:

$$\Delta p_{кл} = R_{кл} Q_{\partial p}^2. \quad (9)$$

При стабилизации скорости расход через дроссель сохраняется постоянным, следовательно, сопротивление клапана должно подчиняться зависимости:

$$R_{кл} = \frac{p_0 - p_{ред} - p_{\partial}}{Q_{\partial p}^2}. \quad (10)$$

Так как переливной клапан имеет вполне определенное минимальное значение сопротивления $R_{кл. мин}$, то ста-

¹ Потери давления в напорной трассе относятся к p_0 .

билизация скорости возможна до некоторой предельной величины давления

$$p_{д. пред} = p_0 - p_{ред} - R_{кл. мин} Q_{др}^2. \quad (11)$$

С уменьшением скорости расход рабочей жидкости через дроссель будет уменьшаться, поэтому на высоких скоростях предельное значение давления будет меньше, чем на низких.

Семейство механических характеристик такой системы электрогидропривода приведено на рис. 3, а.

Если электрическую схему замещения сохранить такой, как это показано на рис. 1, б, то величины сопротивлений $r_{ш}$ и r_n должны быть переменными и изменяться по следующим законам:

$$\left. \begin{aligned} r_{ш} &= \frac{\Delta v}{1 - v_i} \cdot \frac{1}{\mu}; \\ r_n &= \frac{\Delta v}{v_i} \cdot \frac{1}{\mu}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где v_i — скорость идеального холостого хода;

Δv — допустимый перепад скорости.

Токи, протекающие через сопротивления $r_{ш}$ и r_n ,

$$\left. \begin{aligned} i_{ш} &= \left[\frac{v_i}{\Delta v} (1 + \Delta v - v_i) - 1 \right] \mu; \\ i_n &= \frac{v_i}{\Delta v} (1 + \Delta v - v_i) \mu. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Падение напряжения на шунтирующем сопротивлении сохраняется неизменным и равно

$$\Delta U_{ш} = v_i - \Delta v. \quad (14)$$

В схеме замещения (рис. 1, б) принцип стабилизации основан на изменении $\mu_{к.з}$, что не соответствует действительным процессам, происходящим в схеме электрогидропривода. Кроме того, практическое осуществление электрической схемы замещения с переменными сопротивлениями, изменяющимися по сложным законам, встречает большие трудности.

К построению электрической схемы замещения электрогидропривода со стабилизацией скорости следует подойти как с позиций аналогий механических характеристик, так и энергетического соответствия схем.

В схеме электрогидропривода на рис. 2, а генератор гидравлической энергии (насос) работает с постоянной производительностью Q_n при неизменном давлении p_0 . Мощность гидродвигателя определяется расходом рабочей жидкости Q_d и давлением p_d .

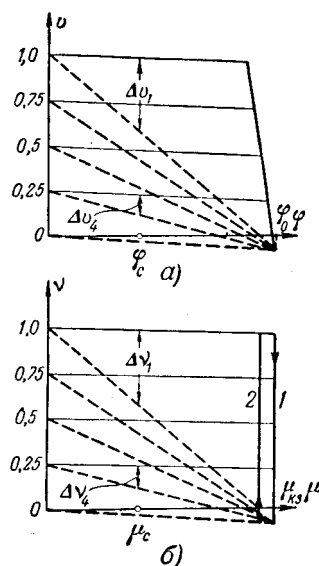
Коэффициент полезного действия такого электрогидропривода [Л. 3]

$$\eta_z = \frac{Q_d p_d}{Q_n p_0} = \frac{v_d \varphi_d}{v_o \varphi_o}, \quad (15)$$

где v_d и v_o — скорости гидродвигателя при расходах рабочей жидкости Q_d и Q_n ;

φ_d и φ_o — усилия, развиваемые гидродвигателем при давлениях p_d и p_o .

Рис. 3. Механические характеристики электрогидропривода со стабилизатором (а) и электрической схемы замещения (б)



Близкой по энергетическим показателям является схема электродвигателя параллельного возбуждения при шунтировании якоря, питаемого от независимого генератора, э. д. с. которого сохраняется неизменной. Коэффициент полезного действия электропривода

$$\eta_z = \frac{E_d I_a}{E_z I_n}. \quad (16)$$

Если э. д. с. E_z принять за основную величину, то в относительных единицах

$$I_a \equiv \mu; \quad E_d \equiv v_d = \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r'_n} - \mu \left(r_{я.д} + \frac{r_{ш} r'_n}{r_{ш} + r'_n} \right);$$

$$I_n \equiv \frac{1 + \mu r_{ш}}{r_{ш} + r'_n} = \mu_n; \quad r'_n = r_n + r_{я.з}.$$

С учетом этих выражений (16) можно записать в следующем виде:

$$\eta_z = \frac{\{ r_{ш} - \mu [r_{я.д} (r_{ш} + r'_n) + r_{ш} r'_n] \} \mu}{1 + \mu r_{ш}}. \quad (16a)$$

Так как при стабилизации скорости падение напряжения компенсируется, то

$$\eta_z \approx \frac{r_{ш} \mu}{1 + \mu r_{ш}} \approx \frac{v_d \mu}{v_o \mu_n}. \quad (16b)$$

В электрической схеме замещения ток $I_n (\mu_n)$ изменяется с изменением нагрузки двигателя, однако на низких скоростях это изменение сказывается незначительно. Поэтому по энергетическим показателям схема на рис. 1, б оказывается близкой к рассматриваемой.

Если сравнить механические характеристики электрогидропривода со стабилизацией и без нее (рис. 3, а), то оказывается, что в первых компенсируется перепад скорости Δv_i , причем компенсация этого перепада скорости должна уменьшаться по мере снижения скорости идеального холостого хода. В электрической схеме замещения такую компенсацию можно осуществить путем введения в цепь якоря двигателя вольтодобавочного генератора, если возбуждение последнего осуществлять током, пропорциональным току нагрузки двигателя.

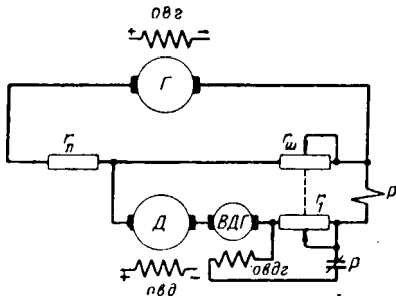


Рис. 4. Электрическая схема замещения электрогидропривода со стабилизацией скорости (при наличии переливного клапана).

На рис. 4 приведена электрическая схема замещения рассматриваемого электрогидропривода. В ней степень компенсации падения напряжения изменяется путем изменения величины сопротивления r_1 , с которого напряжение подается на обмотку возбуждения вольтодобавочного генератора. Перестройка величины r_1 осуществляется одновременно с изменением r_2 . Ограничение предела стабилизации достигается при помощи реле P , ток срабатывания которого соответствует $r_{к.з.}$. Семейство механических характеристик электрической схемы замещения приведено на рис. 3,б. Предельное значение момента будет иметь две ветви: одну при увеличении нагрузки и вторую при уменьшении нагрузки. Наличие этих ветвей вызвано тем, что реле имеет коэффициент возврата меньше единицы. В остальном механические характеристики схемы замещения полностью соответствуют механическим характеристикам электрогидропривода.

Второй вариант электрогидропривода, в котором редукционный клапан работает одновременно с переливным, изображен на рис. 5. В этом электрогидроприводе давление за дросселем p_2 изменяется с изменением давления до дросселя p_1 .

При заданном давлении $p_1 = p_o - p_{\partial 1}$ редукционный клапан занимает определенное положение, при котором $p_1 - p_2 = \Delta p_{\partial p}$, причем перепад давления на дросселе должен сохраняться неизменным.

Уравнение равновесия клапана 3:

$$f_{np1} + s_1 p_2 - s_2 p_o + s_2 p_{\partial 1} = 0, \quad (17)$$

где f_{np1} — усилие пружины;

s_1 и s_2 — соответственно активные площади клапана со стороны полости 1 и полости 2.

Если учесть, что $p_2 = p_1 - \Delta p_{\partial p} = p_o - p_{\partial 1} - \Delta p_{\partial p}$, то (17) примет следующий вид:

$$f_{np1} - s_1 \Delta p_{\partial p} - (s_2 - s_1) p_o + (s_2 - s_1) p_{\partial 1} = 0. \quad (17a)$$

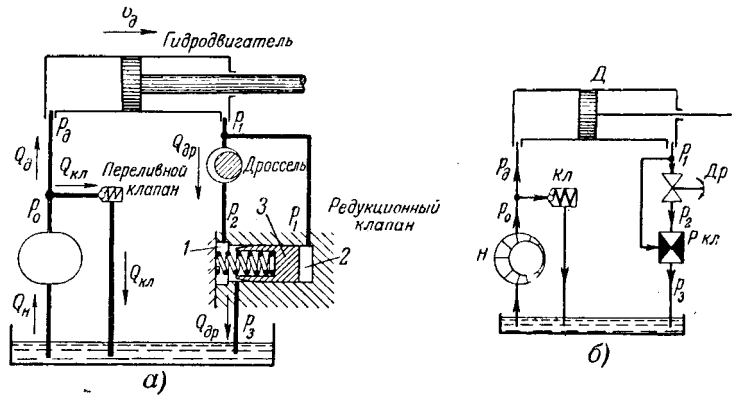


Рис. 5. Схема электрогидропривода со стабилизатором скорости (редукционным клапаном) за дросселем.

а — конструктивное устройство редукционного клапана; б — условное обозначение элементов схемы.

Нарушение равновесия произойдет в случае изменения нагрузки гидродвигателя:

$$f_{np1} - s_1 \Delta p_{\partial p} - (s_2 - s_1) p_o + (s_2 - s_1) p_{\partial 2} = \pm f_{рез}. \quad (176)$$

Знак результирующего усилия определяется изменением давления нагрузки относительно $p_{\partial 1}$. Так, при увеличении нагрузки уменьшается p_1 ; клапан перемещается вправо, больше открывая проходную щель. Это приводит к уменьшению сопротивления клапана $R_{кл}$ и, следовательно, к уменьшению давления p_2 , которое приближенно можно считать равным $p_2 = R_{кл} Q_{\partial p}^2$.

Тогда

$$\Delta p_{\partial p} = p_o - p_{\partial} - R_{кл} Q_{\partial p}^2,$$

откуда

$$R_{кл} = \frac{p_o - \Delta p_{\partial p} - p_{\partial}}{Q_{\partial p}^2}. \quad (18)$$

Сравнение этого выражения с (10) показывает, что в обеих схемах (рис. 2 и 5) редукционный клапан должен иметь одинаковую зависимость между $R_{кл}$ и p_o . Поэтому схема замещения и все закономерности, присущие ей, остаются для рассматриваемого электрогидропривода такими же, как и для предыдущего.

Электрогидропривод с редукционным клапаном, выполняющим также роль переливного. Схема привода приведена на рис. 6. В отличие от предыдущих здесь перелив избытка жидкости осуществляется через редукционный клапан. Жидкость поступает из полости 2 в полость 3 через зазоры между клапаном 4 и корпусом.

Уравнение равновесия для установившегося положения клапана будет:

$$f_{np} + s_1 p_1 - s_2 p_o = 0, \quad (19)$$

где f_{np} — усилие пружины 5;

s_1 и s_2 — активные площади клапана в полостях 1 и 2.

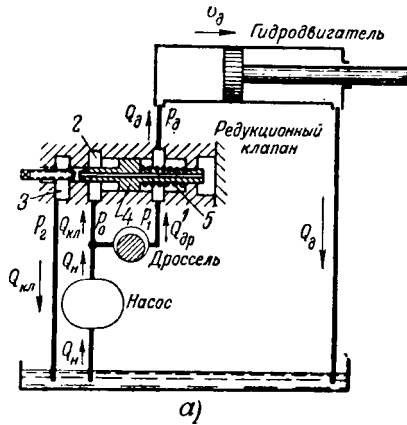


Рис. 6. Схема электрогидропривода с редукционным клапаном, осуществляющим перелив жидкости (стабилизация «на входе»).

а — конструктивное исполнение редукционного клапана;
б — условное обозначение элементов схемы.

Так как $p_1 \approx p_d$, то с увеличением нагрузки и повышением давления p_d клапан перемещается влево. Зазор между клапаном и корпусом уменьшается, и давление увеличивается за счет повышения сопротивления клапана.

Приблизительно можно считать:

$$p_o = R_{кл} (Q_n - Q_{др})^2, \quad (20)$$

где Q_n — производительность клапана.

Для поддержания постоянного перепада давления на дросселе давление p_o должно изменяться одновременно с изменением нагрузки гидродвигателя. Тогда

$$\Delta p_{др} = R_{кл} (Q_n - Q_{др})^2 - p_o. \quad (21)$$

Закон изменения сопротивления клапана в зависимости от нагрузки гидродвигателя

$$R_{кл} = \frac{p_o + \Delta p_{др}}{(Q_n - Q_{др})^2}. \quad (22)$$

В отличие от предыдущих схем здесь сопротивление редукционного клапана должно быть примерно пропорциональным давлению нагрузки. Стабилизация, как и в ранее рассмотренных схемах, осуществляется до некоторого предельного давления нагрузки, при котором клапан полностью открыт и имеет минимальное сопротивление $R_{кл.мин}$:

$$p_{д. пред} = R_{кл.мин} (Q_n - Q_{др})^2 - \Delta p_{др}. \quad (23)$$

Из (23) видно, что предельное давление тем больше, чем больше рабочей жидкости переливается через редукционный клапан и, следовательно, чем ниже $Q_{др}$ (скорость гидродвигателя).

Подходя к построению электрической схемы замещения, следует указать, что электрогидропривод, схема которого приведена на рис. 7, имеет к. п. д. выше, чем два предыдущих. Хотя и здесь к. п. д. может быть вычислен

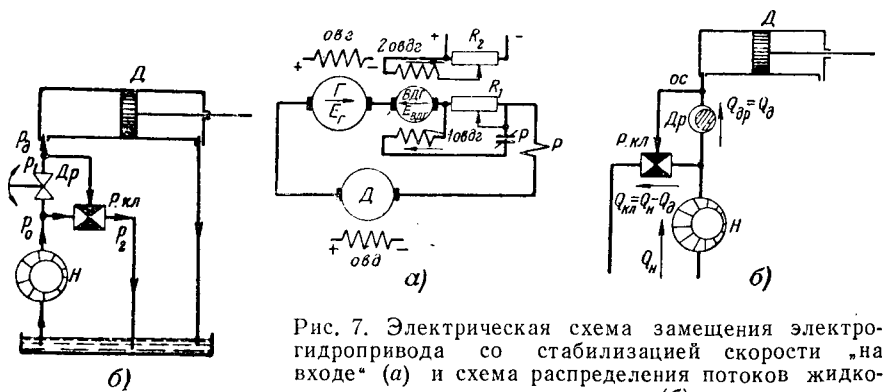


Рис. 7. Электрическая схема замещения электрогидропривода со стабилизацией скорости «на входе» (а) и схема распределения потоков жидкости в системе (б).

по (15), однако вследствие приблизительного равенства давления нагрузки и давления в полости нагнетания насоса ($p_1 = p_d \approx p_o$) выражение (15) принимает следующий вид:

$$\eta_z \approx \frac{Q_{др} p}{Q_{н.о}} \approx v_d, \quad (15a)$$

где $Q_{н.о}$ — производительность насоса в режиме идеального холостого хода, когда вся жидкость поступает в гидродвигатель.

Выражение (15a) аналогично выражению к. п. д. для системы генератор — двигатель, где генератор работает с постоянным возбуждением, а регулирование скорости двигателя осуществляется при помощи вольтодобавочного генератора, э. д. с. которого действует навстречу э. д. с. генератора.

Электрическая схема замещения рассматриваемого электрогидропривода приведена на рис. 7,а.

На рис. 7,б изображено распределение расходов жидкости через гидромашину и аппаратуру управления. Если в схеме рис. 7,б исключить связь ос, то механические характеристики будут иметь тот же вид, что и характеристики, изображенные пунктирными линиями на рис. 3,а. Для получения жестких характеристик в схеме замещения сопротивление R_1 должно изменяться одновременно с изменением скорости, т. е. уменьшаться с уменьшением скорости и с увеличением э. д. с. ВДГ. Такая связь может быть осуществлена механическим соединением ползунков R_1 и R_2 . Следовательно, в схеме эти элементы заменяют дроссель. Действие редукционного клапана учтено введением обратной связи по току, которая должна ослабляться по мере снижения скорости. Это достигается путем подключения обмотки обратной связи 10 вdg к зажимам сопротивления R_1 .

Ограничение стабилизации осуществляется при помощи максимального реле Р. Механические характеристики схемы замещения такие же, как и на рис. 3,б.

Следует отметить, что электрические схемы замещения для динамических режимов могут

Влияние емкостной компенсации на работу релейной защиты

Инж. В. М. ЕРМОЛЕНКО и инж. С. Я. ПЕТРОВ

Теплоэлектропроект

Повышение пропускной способности линий электропередачи и устойчивости систем при помощи статических конденсаторов получает все более широкое распространение. Наметились два способа увеличения пропускной способности линий путем компенсации индуктивных сопротивлений. Один из них основан на той или иной степени компенсации индуктивных сопротивлений, заключенных между передающей и приемной системами; другой основан на сохранении стабильности напряжения в промежуточных точках передачи путем приключения блоков синхронный компенсатор — трансформатор, индуктивное сопротивление которых компенсируется.

Наиболее исследованным является первый способ, получивший название продольной емкостной компенсации и внедренный в Советском Союзе на линиях напряжением 35 ... 220 кВ и принятый для электропередачи 400 кВ Куйбышев — Москва.

Сосредоточение на электропередачах конденсаторных батарей значительной мощности оказывает существенное влияние на электрические процессы при коротких замыканиях, вызывая в ряде случаев неблагоприятное для работы релейной защиты распределение токов и напряжений по электропередаче, а также колебательные процессы.

Исследования релейных защит различных типов, проведенные на электродинамических моделях электропередач с емкостной компенсацией, показали, что неустановившиеся процессы на большинство защит практически не влияют. Значительное замедление действия фильтровых защит с высокочастотной блокировкой, вызванное влиянием емкостной компенсации и емкостью электропередачи, устранено частотными фильтрами, включенными в цепи тока и напряжения защит.

В настоящей работе приводятся результаты исследований поведения релейных защит при установившихся режимах на электропередачах с емкостной компенсацией обоих типов и оценка возможных вариантов размещения конденсаторных батарей по условиям работы релейной защиты.

Реле направления мощности. Известны органы направления мощности как с включением на полные токи и напряжения, так и на симметричные составляющие положительной, отрицательной и нулевой последовательностей.

Как известно, на плоскости R и X характеристика органов направления мощности имеет вид прямой линии (рис. 1).

Без учета механического момента реле условие его действия определяется выражениями:

$$UI \sin(\varphi - \alpha) \geq 0, \quad (1)$$

$$X - R \operatorname{tg} \alpha \geq 0, \quad (2)$$

где U и I — напряжение и ток, подводимые к реле;

φ — угол между \dot{U} и \dot{I} , отсчитываемый от вектора \dot{U} по часовой стрелке;

R , X — активная и реактивная составляющие полного сопротивления на зажимах реле;

α — дополнительный угол поворота характеристики реле, отсчитываемый против часовой стрелки.

Критерии правильного действия реле наиболее просто могут быть найдены для режима трехфазного короткого замыкания, хотя неселективное действие и отказы могут иметь место и при других видах повреждений.

быть выполнены лишь с известным приближением вследствие инерционности электромеханических элементов.

Выводы. 1. Введение в схему электрогидропривода редукционного клапана аналогично введению в электрическую схему замещения вольтодобавочного генератора с обратной связью по току нагрузки.

2. Работа гидродвигателя при наличии переливного клапана, дросселя и редукционного клапана аналогична работе электродвигателя в потенциометрической схеме с последовательно включенной вольтодобавочной машиной (рис. 4).

3. Введение в схему электрогидропривода редукционного клапана, выполняющего также роль переливного, аналогично введению в систему

генератор — двигатель вольтодобавочной машины для целей регулирования и стабилизации скорости (рис. 7,а).

Литература

1. М. Г. Чиликин и А. М. Корытин. Механические характеристики электрогидроприводов. Электричество, № 4, 1953.

2. М. Г. Чиликин и А. М. Корытин. Некоторые вопросы динамики электрогидроприводов. Электричество, № 12, 1953.

3. М. Г. Чиликин и А. М. Корытин. Энергетика электрогидроприводов. Электричество, № 5, 1954.

4. М. Г. Чиликин, А. М. Корытин и В. Н. Прокофьев. Силовой электрогидропривод. Госэнергоиздат, 1955.

[28. 10. 1955]

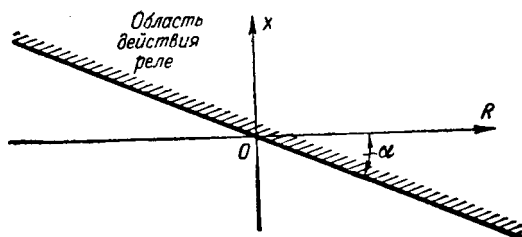


Рис. 1.

При трехфазных коротких замыканиях сопротивление на зажимах реле, включенных на полные токи и напряжения, а также на симметричные составляющие положительной последовательности (первая группа реле), определяется сопротивлениями сети на участке от места установки защиты до точки короткого замыкания; сопротивление же на зажимах реле, включенных на симметричные составляющие отрицательной или нулевой последовательностей (вторая группа реле), характеризуется полным сопротивлением сети на участке от места установки защиты до точки нулевого потенциала в схемах замещения соответствующих последовательностей. При повреждениях вне зоны действия реле знак у сопротивлений сети должен быть изменен на обратный, так как при этом фаза тока меняется на 180° . Обычно активные составляющие сопротивлений сети малы по сравнению с реактивными составляющими, и ими можно пренебречь.

Выражение (2) показывает, что правильное действие реле первой группы обеспечивается в том случае, когда сопротивление сети от места установки защиты до точки короткого замыкания является индуктивным. Следовательно, при наличии конденсаторных батарей работа органов направления мощности обеспечивается в тех случаях, когда индуктивное сопротивление линии до места установки конденсаторной батареи больше емкостного сопротивления батарей или когда батарея при коротком замыкании шунтируется защитными разрядниками.

Сказанное справедливо и для реле второй группы с той разницей, что в этом случае емкостное сопротивление батареи сравнивается с индуктивным сопротивлением от места установки защиты до точки нулевого потенциала соответствующих схем замещения. Следует отметить, что установка конденсаторных батарей со стороны обмоток трансформатора, соединенных в треугольник, исключает емкость в схеме замещения нулевой последовательности.

Правильное действие органов направления отрицательной и нулевой последовательностей в случае, когда сопротивление на зажимах реле емкостно-активное, может быть обеспечено путем токовой компенсации напряжения во вторичных цепях реле.¹ При этом условия работы реле определяются выражениями:

$$|-I| |\dot{U} - IZ_k| \sin(\varphi - \alpha) \geq 0, \quad (3)$$

$$X + X_k - (R + R_k) \operatorname{tg} \alpha \geq 0, \quad (4)$$

где $Z_k = R_k + jX_k$ — полное сопротивление компенсирующего устройства.

Характеристика реле дана на рис. 2.

Для правильной работы реле сопротивление компенсирующего устройства должно выбираться из условия:

$$X_m \geq X_k \geq X_c, \quad (5)$$

где X_m — наименьшее значение индуктивного сопротивления на зажимах реле при повреждениях вне зоны;

X_c — наибольшее значение емкостного сопротивления на зажимах реле при повреждениях в зоне.

Рассматриваемая токовая компенсация эквивалентна подводу к реле напряжения от точки сети, удаленной от места установки защиты на сопротивление X_k , и, следовательно, она также позволяет повысить чувствительность защиты при малых сопротивлениях системы.

Применение компенсации для первой группы реле не эффективно, поскольку сопротивления на их зажимах вне зависимости от параметров сети могут быть как угодно малы, что не позволяет удовлетворить неравенство (5).

Рассмотренным случаям соответствует схема замещения системы с одним контуром. При нескольких взаимосвязанных контурах сопротивления на зажимах реле и сопротивление компенсации должны подсчитываться с учетом коэффициентов разветвления.

Особо следует рассмотреть вопрос о влиянии шунтирования конденсаторных батарей на работу органов направления отрицательной и нулевой последовательностей.

При шунтировании батареи в одной или двух фазах в месте ее установки возникает продольная асимметрия. Если эта асимметрия находится в зоне действия защиты, то она может вызвать ложное действие защиты в нормальных режимах и при внешних трехфазных коротких замыканиях, когда ориентирующий момент от асимметрии в месте повреждения отсутствует. Ложная работа защиты может иметь место и при несимметричных коротких замыканиях, когда мощность от асимметрии в месте повреждения меньше мощности от асимметрии в месте установки конденсаторной батареи. В этом случае, при установке конденсаторной батареи вне зоны действия защиты, последняя может отказывать при повреждениях в зоне действия.

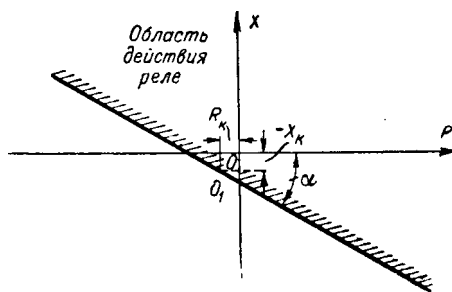


Рис. 2.

¹ Авторское свидетельство № 99692 от 10.I 1955 г. на имя С. Я. Петрова.

В случае направленных защит без высокочастотных блокировок для обеспечения селективности следует осуществлять отстройку защит по мощности срабатывания или оборудовать их пусковыми органами, отстроенными от указанной асимметрии.

Реле сопротивления. Дистанционные реле обычно используются в качестве защит от междофазных коротких замыканий при включении их на разность одноименных фазных токов и напряжений, а также в качестве защит от коротких замыканий на землю при включении их на фазные напряжения и фазные токи с компенсацией от тока нулевой последовательности. Сопротивления на зажимах этих реле определяются полным сопротивлением положительной последовательности сети на участке от места установки защиты до точки короткого замыкания с учетом коэффициентов разветвлений.

Установка конденсаторных батарей может привести к тому, что при коротких замыканиях в зоне действия защиты сопротивления на зажимах реле будут емкостно-активными, а при коротких замыканиях вне зоны — индуктивно-активными. Это может привести к неселективным действиям дистанционных защит и к их отказу.

В случае установки конденсаторных батарей в пределах первой ступени направленного реле сопротивления, реактивное сопротивление уставки защиты с учетом отстройки от коротких замыканий на шинах противоположной подстанции определяется выражением:

$$X_y = k_n (X_a - X_c) > 0, \quad (6)$$

где $k_n < 1$ — коэффициент надежности;

X_c и X_a — реактивные сопротивления конденсаторных батарей и линии.

Выражение (6) показывает, что дистанционный принцип можно использовать, когда $X_a > X_c$, т. е. если сопротивление и место установки батареи, когда она не шунтируется защитными разрядниками, выбрано таким образом, что индуктивное сопротивление линии до места установки батареи больше емкостного сопротивления. При одной конденсаторной батарее и расположении ее на середине участка можно компенсировать не больше 50% индуктивного сопротивления линии.

Емкостное сопротивление всех батарей, удовлетворяющее условию работы дистанционных направленных защит, определяется выражением:

$$X_c \leq \frac{n}{n+1} X_a, \quad (7)$$

где n — число батарей.

Таким образом, при равномерном распределении емкости можно скомпенсировать теоретически всю линию.

Однако с увеличением компенсации сопротивление в зоне действия и, следовательно, уставки дистанционного реле уменьшаются. Последнее

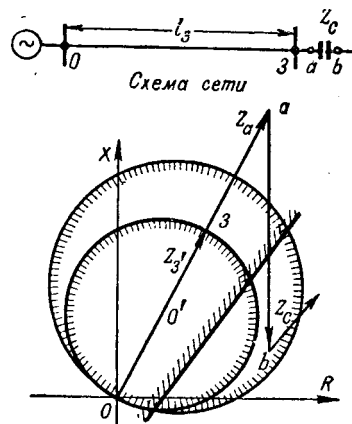


Рис. 3.

ограничивает возможности применения дистанционных защит. Шунтирование батарей разрядниками сопровождается возрастанием сопротивления до места короткого замыкания, что может привести к сокращению зоны действия защиты.

При значительных активных сопротивлениях линии от места установки защиты до конденсаторной батареи защита может быть выполнена вне зависимости от величины емкостного сопротивления.

При повреждении за конденсаторной батареей полное сопротивление до места установки защиты резко меняет свой угол (рис. 3). Это обстоятельство можно использовать для осуществления дистанционной защиты, различающей повреждения до и после конденсаторной батареи. Такую защиту можно выполнить сочетанием реле сопротивления с круговой и прямолинейной характеристиками (рис. 3), реле с эллиптической характеристикой и двух реле сопротивления с круговыми характеристиками.

В случае поперечной емкостной компенсации, которая осуществляется при помощи конденсаторных батарей, установленных в нулевых выводах генерирующих источников, сопротивление батареи не входит в сопротивление петли короткого замыкания (если не считаться с повреждениями внутри батареи). Однако в этом случае дистанционные и направленные реле первой группы будут работать правильно вне зависимости от величины сопротивления батареи только при металлических коротких замыканиях в схеме сети: генерирующий источник — линия — генерирующий источник (не говоря о линиях с односторонним питанием). Если в сети имеются ответвления, то при коротком замыкании на них, а также при повреждении через переходное сопротивление сопротивление на зажимах реле определяется не только током, текущим через защиту, но и током от других генерирующих источников:

$$Z_p = Z_k + \frac{I_p + I_{cm}}{I_p} Z_x, \quad (8)$$

где Z_x — полное сопротивление ответвления или дуги;

Z_k — полное сопротивление от места установки защиты до ответвления или точки короткого замыкания при повреждении через переходное сопротивление;

I_p — ток, протекающий через защиту;

I_{cm} — ток в ответвлении или дуге от сторонних источников питания.

Уравнение (8) показывает, что работа реле зависит от направления тока $I_p + I_{cm}$.

Емкостный характер сопротивления может изменить фазу тока и обусловить таким образом неправильную работу дистанционных реле.

Применяемое в настоящее время трехфазное реле сопротивления по принципу действия существенно отличается от рассмотренных выше реле. Уравнение его работы при двухфазных коротких замыканиях [Л. 1, 2], если пренебречь активными сопротивлениями, можно представить в виде:

$$|\dot{U}_{yn}| \left| \dot{E} \frac{X_y - X_k}{X_m + X_k} \right| \cos \varphi \geq 0, \quad (9)$$

где \dot{U}_{yn} — напряжение в конце зоны действия реле в режиме, предшествующем короткому замыканию;

\dot{E} — э. д. с. генерирующего источника за сверхпереходным реактансом;

X_y — реактивное сопротивление уставки;

X_k — сопротивление от места установки защиты до точки короткого замыкания;

X_m — сопротивление системы;

φ — угол между $\dot{E} \frac{X_y - X_k}{X_m + X_k}$ и напряжением \dot{U}_{yn} .

Как показывает уравнение (9), работа реле зависит от знаков дроби $p = \frac{X_y - X_k}{X_m + X_k}$ и $\cos \varphi$.

Так, при $\varphi < 90^\circ$ реле будет действовать неправильно при повреждениях в зоне действия защиты при $p < 0$ и вне зоны при $p > 0$.

Фильтровая направленная высокочастотная защита отрицательной и нулевой последовательностей. Действие фильтровых направленных высокочастотных защит отрицательной и нулевой последовательностей основано на сравнении углов между токами и напряжениями на концах линии при помощи высокочастотного канала. Защита действует на отключение, когда ток при выбранном положительном направлении от шин опережает напряжение на обоих концах линии, и блокируется, когда хотя бы на одной из сторон ток отстает от напряжения.

Защита выполняется с органами направления соответствующих последовательностей, что позволяет пользоваться проведенным выше анализом, сопоставляя работу комплектов защит, установленных на концах линии. В случае, когда конденсаторная батарея устанавливается в зоне действия защиты и защитные разрядники работают

при сквозных коротких замыканиях, необходимо предусматривать специальные меры по предотвращению неселективного действия защиты.

Отстройка органов направления от соответствующих значений токов и напряжений отрицательной (нулевой) последовательности или применение дополнительных пусковых органов, отстроенных от указанной асимметрии, обычно приводят к недопустимому загрублению защит.

Ложное действие защиты можно предотвратить установкой высокочастотного передатчика, управляемого специальным органом, реагирующим на угол между напряжениями соответствующих последовательностей, взятых по обе стороны батареи.² Действие органа и пуск передатчика обеспечиваются, когда подведенные к нему напряжения находятся в противофазе, что имеет место при несимметричном шунтировании конденсаторной батареи разрядниками в случае трехфазных коротких замыканий.

Такое мероприятие требует помимо передатчика и специального органа отбора напряжения по обеим сторонам от конденсаторной батареи и согласования указанного органа по чувствительности с комплектами защит.

Если на батарею предусмотреть трансформаторы тока, то рассмотренный орган может быть заменен двумя реле направления. В некоторых случаях по условию согласования чувствительности пусковых органов с комплектами защит это может оказаться целесообразным.

Рассмотренное решение значительно усложняет защиту и понижает надежность ее действия.

В случае параллельных линий продольная емкостная компенсация вызывает неблагоприятное для работы защит распределение токов на поврежденной линии. Степень емкостной компенсации существенно снижается при установке конденсаторных батарей в начале параллельных линий.

Продольные дифференциальные защиты. Действие продольных дифференциальных защит основано на сравнении величин и фаз токов по концам линии. Реле защиты реагирует на величину

$$I_p = I_m + I_n, \quad (10)$$

где I_p — ток в реле защиты;
 I_m и I_n — токи обеих сторон защищаемого элемента.

В общем случае к защитам подводится сумма токов отдельных последовательностей:

$$I_m = \alpha I_{ma1} + \beta I_{ma2} + \gamma I_{m0}, \quad (11)$$

$$I_n = \alpha I_{na1} + \beta I_{na2} + \gamma I_{n0}. \quad (12)$$

Защита не действует в нормальных режимах и при внешних коротких замыканиях, когда $I_m = -I_n$ (положительное направление от шин). При повреждениях в зоне действия за-

² Авторское свидетельство № 99084 от 14.X. 1954 г. на имя С. Я. Петрова.

щиты токи I_m и I_n в общем случае не равны, но в случае однородного характера сопротивления сети по обе стороны от места короткого замыкания они примерно совпадают по фазе, что обуславливает протекание тока в реле и действие защиты.

При трехфазном коротком замыкании в зоне, когда токи $I_2 = I_0 = 0$:

$$I_m = \frac{\dot{E}_A}{Z_m}, \quad (13)$$

$$I_n = \frac{\dot{E}_B}{Z_n}, \quad (14)$$

где \dot{E}_A и \dot{E}_B — приведенные к точке короткого замыкания э. д. с. генерирующих источников;

Z_m и Z_n — эквивалентные сопротивления генерирующих источников, приведенные к месту короткого замыкания.

Принимая для упрощения, что э. д. с. равны и совпадают по фазе, определяем ток в реле:

$$I_p = \dot{E}_m \frac{Z_m + Z_n}{Z_m \cdot Z_n}. \quad (15)$$

Угол между токами при этом определяется выражением:

$$\arg \frac{I_m}{I_n} = \arg \frac{Z_m}{Z_n}. \quad (16)$$

При установке конденсаторных батарей в сети может оказаться, что сопротивления Z_m и Z_n находятся примерно в противофазе. В этом случае при повреждении в зоне действия защиты может иметь место отказ защиты, так как через реле будет протекать не сумма, а разность токов I_m и I_n .

Анализ поведения защиты при несимметричных коротких замыканиях можно свести к сравнению величин и фаз токов отрицательной или нулевой последовательностей по концам защищаемого элемента. Для исключения влияния на работу защиты токов нагрузки величины коэффициентов β и γ выбираются таким образом, чтобы при несимметричных коротких замыканиях работа защиты определялась только составляющими токов отрицательной или нулевой последовательностей. Ток в реле определяется выражением, аналогичным выражению (15):

$$I_p = \frac{\dot{U} (Z_m + Z_n)}{Z_m Z_n}, \quad (17)$$

где \dot{U} — напряжение отрицательной или нулевой последовательности в месте короткого замыкания;

Z_m и Z_n — приведенные к месту короткого замыкания сопротивления ветвей схем замещения соответственно отрицательной или нулевой последовательности.

Таким образом, выводы, сделанные относительно влияния емкостного эффекта на работу защит при трехфазных коротких замыканиях, справедливы и для несимметричных коротких замыканий с той лишь разницей, что при этом должны рассматриваться схемы замещения соответствующих последовательностей.

Асимметрия, возникающая при шунтировании конденсаторных батарей, не может нарушить селективности защиты. Однако при повреждениях в зоне действия несимметричного шунтирования конденсаторных батарей может в отдельных случаях вызвать отказ в действии защит.

Все изложенное относится и к дифференциально-фазным высокочастотным защитами, являющимся разновидностями продольных дифференциальных защит.

Поперечные дифференциальные направленные и балансные защиты. Установка конденсаторных батарей на параллельных линиях нарушает обычную закономерность распределения токов по линиям и может вызвать неправильное действие рассматриваемых защит. Батареи, устанавливаемые за пределами параллельных линий, могут также обусловить неселективную работу защиты. Если пренебречь активными составляющими сопротивлений и различием между э. д. с. генерирующих источников, то токи поврежденной и неповрежденной параллельных линий можно представить в виде:

$$I_1 = I_k \frac{(1 + \alpha) X_A + \alpha (X_B + X_A)}{2(X_A + X_B) + X_A}, \quad (18)$$

$$I_2 = I_k \frac{(1 - \alpha) X_A - \alpha X_B}{2(X_A + X_B) + X_A}, \quad (19)$$

где I_k — ток в месте короткого замыкания;

X_A , X_B , X_A — сопротивление генерирующих источников и линии;

α — относительная удаленность места повреждения.

На основании приведенных выражений, можно найти условия, при которых модуль тока неповрежденной линии больше, чем поврежденной:

$$\alpha X_A < -2X_A, \quad (20)$$

$$2(X_A + X_B) + X_A < 0. \quad (21)$$

Приведенные неравенства могут быть соблюдены только при емкостном сопротивлении генерирующего источника ($X_A < 0$), что показывает возможность неселективного действия защит, когда конденсаторные батареи устанавливаются за пределами защищаемых линий.

Неселективное действие комплектов нулевой последовательности рассматриваемых защит при наличии конденсаторных батарей может иметь место также и при индуктивном сопротивлении генерирующих источников в режимах трехфазных и двухфазных коротких замыканий, когда происходят несимметричное шунтирование конденсаторной батареи разрядниками и каскадное отключение повреждения. Неселективное действие за-

щит в этом случае вызывается протеканием токов нулевой последовательности, обусловленных несимметрией батарей.

Селективность защиты в рассмотренном случае можно обеспечить введением задержки действия комплекта нулевой последовательности, достаточной для надежной блокировки защиты поврежденной линии.

Установка конденсаторных батарей непосредственно на линиях приводит к неселективному действию защит при коротких замыканиях, сопровождающихся шунтированием батарей поврежденной линии при помощи разрядников, а также при несимметричном шунтировании в случае внешних повреждений.

Выводы. 1. Продольная емкостная компенсация оказывает существенное влияние на поведение релейных защит. Удовлетворительная защита может быть обеспечена соответствующим выбором степени емкостной компенсации, рациональным размещением конденсаторных батарей и согласованием действия защит с работой разрядников, устанавливаемых на батареях.

2. При поперечной компенсации, когда емкостное сопротивление меньше индуктивного сопротивления трансформаторов и синхронных компенсаторов, создаются благоприятные условия для работы защит.

3. Степень продольной компенсации на электропередачах можно увеличить при использова-

нии схем защит, основанных на применении симметричных составляющих (с высокочастотными каналами), в особенности при сочетании их с токовыми отсечками.

4. Установка конденсаторных батарей на середине линии создает относительно благоприятные условия для работы дистанционных и дифференциально-фазных высокочастотных защит с токовыми пусковыми органами.

5. Емкостная компенсация ограничивает применение поперечных дифференциальных направленных защит на параллельных линиях и практически исключает их использование при установке конденсаторных батарей на защищаемых линиях.

6. Степень емкостной компенсации при односторонних линиях передачи можно повысить путем использования фильтровых направленных защит отрицательной и нулевой последовательностей с устройством компенсации от тока в цепях напряжения.

Литература

1. А. М. Федосеев. Релейная защита электрических систем. Госэнергоиздат, 1952.
2. С. Я. Петров. Исследование дистанционных реле при двухфазных коротких замыканиях. Электричество, № 7, 1954.
3. Г. И. Атабеков. Вопросы релейной защиты электропередач с продольной емкостной компенсацией. Электричество, № 8, 1953.

[24. 12. 1955]



Расчет опор и проводов линий электропередачи по предельному состоянию¹

Инж. О. Г. ВЕКСЕЛЬМАН

Харьков

В «Правилах устройства электротехнических установок» за критерий прочности и надежности опор и проводов линий электропередачи принимается допускаемое напряжение, определяемое как частное от деления предела прочности материала на коэффициент запаса, величина которого устанавливается произвольно.

Однако более правильно за критерий прочности и надежности принимать предельное состояние. Методика расчета по предельному состоянию дает возможность принимать большие сопротивления в конструкциях при повышенных нагрузках, наблюдаемых в течение небольшой части года. При меньших нагрузках, имеющих место в течение остальной части года, принимаются меньшие сопротивления.

На основе анализа этой новой прогрессивной методики, отражающей в значительной степени фактическую работу несущих конструкций, автор нашел, что применение этой методики для расчета опор и проводов линий электропередачи вскрывает излишние запасы прочности в строительной части линий, дает более равнопрочные конструк-

ции и приводит благодаря повышению расчетных сопротивлений в проводах и увеличению расчетных пролетов к значительной экономии металла, железобетона и дерева.

Основные расчетные положения. В настоящей статье рассматриваются и определяются основные положения расчета опор и проводов линий электропередачи по предельному состоянию в соответствии со «Строительными нормами и правилами» [Л. 1] для первого предельного состояния, определяемого несущей способностью конструкции, и для третьего предельного состояния, определяемого шириной раскрытия трещин в железобетонных опорах. Второе предельное состояние, определяемое развитием чрезмерных деформаций от статических или динамических нагрузок, ограничивающих возможность эксплуатации конструкции, ниже не рассматривается, так как при расчетах по этому предельному состоянию и при соответствующих расчетах по допускаемым напряжениям или по стадии разрушения (железобетонных опор) получаются практически одинаковые результаты.

Расчетные нагрузки. «Правилами» принимается для нагрузочной схемы «провода и тросы сво-

¹ Печатается в порядке обсуждения.

бодны от гололеда» скоростной напор ветра Q на высоте 20 м и более от земли для высшей зоны крепления проводов и тросов без учета их провисания. При этом Q на высоте 20 м равно 40 кг/м^2 ($v = 25 \text{ м/сек}$).

Учет скоростного напора ветра на высоте до 10 м согласно [Л. 1] уменьшает ветровую нагрузку до 30 кг/м^2 ($v = 22 \text{ м/сек}$), т. е. на 25%.

Учет средней высоты подвеса проводов и тросов, принимаемой как сумма минимального расстояния между проводами и землей и одной трети максимальной стрелы провеса, уменьшает скоростной напор против нормированного «Правилами» на 10 ... 12%.

Коэффициент перегрузки, учитывающий опасность превышения ветровых нагрузок по сравнению с их нормативными значениями, принимается согласно [Л. 1] равным 1,2. В результате расчетные ветровые нагрузки вследствие приведенных уточнений нормативных нагрузок и учета коэффициента перегрузки увеличиваются на 8 ... 10%.

При определении коэффициента перегрузки на гололедные нагрузки, наблюдаемые согласно «Правилам» не реже одного раза в пять лет, следует исходить не из максимальной гололедной нагрузки, отмеченной за весь период наблюдения в данном районе, а из такой гололедной нагрузки, которая характеризуется малой вероятностью появления больших нагрузок. Поэтому предлагается при назначении наибольшей расчетной гололедной нагрузки исходить из максимально наблюдавшейся раз в пятнадцать лет. По данным Центральной научно-исследовательской электротехнической лаборатории (ЦНИЭЛ) Министерства электростанций коэффициент перегрузки на нормативные толщины стенок гололеда 5, 10, 15, 20 мм соответственно для I, II, III, IV расчетных климатических районов получается различным для каждого района и этот коэффициент перегрузки для данного района тем больше, чем менее он является гололедным. Значения этого коэффициента, в частности, для II и III расчетных климатических районов могут быть, руководствуясь теми же данными ЦНИЭЛ об интенсивности гололеда раз в пятнадцать лет, приняты равными 1,8 и 1,5. При этом не вводится коэффициент перегрузки на нормативную скорость ветра при гололеде, принимаемую по «Правилам» ввиду весьма малой вероятности сочетания наибольших гололедных и повышенных ветровых нагрузок.

Следует отметить, что анализировался вопрос о введении при расчетах наиболее ответственных концевых и угловых опор повышенных коэффициентов на расчетные сопротивления в проводах и тросах, поскольку такие предложения в настоящее время обсуждаются. Значения этих коэффициентов определяются из условия, что сопротивления в материале опор не должны превосходить нормативных при обрыве проводов и тросов вследствие резкого возрастания внешних нагрузок. Произведенный анализ показал, что отсутствуют достаточные основания для учета этих коэффициентов.

Стальные опоры. Нормативное сопротивление $R^{(*)}$, характеризующее механические свойства материала, для марки стали СТ-3, которая, как правило, должна применяться для опор линий электропередачи, равно 2400 кг/см^2 . Коэффициент однородности k , учитывающий изменчивость механических свойств материала, равен 0,9. Расчетное сопротивление R , равное $R^{(*)} \cdot k$, определяется с округлением в меньшую сторону в 2100 кг/см^2 [Л. 1].

Коэффициент условий работы, учитывающий особенности работы конструкции, принимается для элементов всех типов опор, прикрепляемых односторонне, равным 0,75, как это имеет место также в расчетах по методике допускаемых напряжений.

Исчерпывающим критерием для оценки методики расчетов стальных опор по предельному состоянию является определение прочности анкерной опоры при регламентированном «Правилами» числе (два) оборванных проводов с предельным тяжением. Случаи обрывов проводов с предельными тяжениями практически могут иметь место лишь в исключительных случаях. Однако, поскольку анкерная опора по своему назначению должна воспринимать наибольшее тяжение, то проверка этой конструкции ведется на предельные изгибающие моменты от обрыва проводов вследствие предполагаемого критического возрастания внешних нагрузок, при которых в проводах возникнут тяжения, близкие к их пределу прочности.

В этом случае сопротивление, возникающее в опоре при коэффициенте запаса прочности в медном проводе, равно $\frac{0,9 \cdot 39}{19,5} = 1,8$, повышается с $R_n = 1800 \cdot 1,8 = 3240 \text{ кг/см}^2$ до $R_n = 2100 \cdot 1,8 = 3780 \text{ кг/см}^2$, где 0,9 — коэффициент, учитывающий снижение предела прочности провода по сравнению с суммой пределов прочности составляющих его проволок; 39 и $19,5 \text{ кг/см}^2$ — предел прочности и допускаемое напряжение в медном проводе согласно «Правилам»; 1800 кг/см^2 — допускаемое напряжение в стали СТ-3 согласно «Правилам».

Работа анкерной опоры при сопротивлении в металле, близком к низшему пределу прочности металла 3780 кг/см^2 (который колеблется для СТ-3 от 3800 до 4700 кг/см^2) при теоретически максимально возможных аварийных нагрузках, характеризует оптимальность расчетной методики по предельному состоянию.

Принятие одинакового расчетного сопротивления 2100 кг/см^2 для всех типов опор при их расчетах на аварийные нагрузки является закономерным, потому что степень значимости данной опоры на линии электропередачи в аварийном режиме должна определяться лишь ее устойчивостью при том или ином числе оборванных проводов, а не различным напряжением в ее материале.

Дифференциация допускаемых напряжений в зависимости от типа опор, как это принимается «Правилами», не может найти обоснования.

Предлагаемая расчетная методика приводит к некоторой экономии стали, в основном, вследствие расчетного сопротивления для нормального режима работы линии электропередачи, равного при уточненных расчетных ветровых нагрузках 2100 кг/см^2 вместо принятых «Правилами» 1600 кг/см^2 . Экономия будет большей при применении выпускающих зажимов для промежуточных опор.

Деревянные опоры. Расчетное сопротивление древесины при его нормальном сопротивлении 330 кг/см^2 и коэффициенте однородности 0,4 равно $330 \cdot 0,4 = 130 \text{ кг/см}^2$ [Л. 1].

Такое расчетное сопротивление должно приниматься при расчетах всех элементов всех типов опор в нормальных режимах работы линии электропередачи вместо 120 кг/см^2 по пределу I согласно «Правилам». При расчете опор на аварийные режимы работы линии электропередачи предлагается принимать расчетные сопротивления равными $330 \cdot 0,6 = 200 \text{ кг/см}^2$ и $330 \cdot 0,8 = 260 \text{ кг/см}^2$ для элементов опор, для которых принимаются согласно «Правилам» допускаемые напряжения $190, 215 \text{ кг/см}^2$ по пределам II, III и 240 кг/см^2 по пределу IV.

При расчете концевых и угловых опор на основные расчетные сопротивления вводится снижающий коэффициент 0,8, учитывающий уменьшение сопротивления древесины под воздействием постоянной нагрузки [Л. 1, 2].

Расчет деревянных опор по предельному состоянию приводит к некоторой экономии древесины вследствие уменьшения расчетного ветрового напора из-за относительно небольшой высоты деревянных опор и, в основном, из-за увеличения значения сбега бревен с 0,8 см до 1 см на 1 м длины бревна [Л. 1].

Железобетонные опоры. При расчетах железобетонных опор по предельному состоянию расход

железобетона получается практически таким же, как и при расчетах по прежней методике. Расчет этих опор на трещиностойчивость производится лишь при применении предварительно напряженной арматуры. Предлагаются обычные железобетонные конструкции, т. е. с ненапряженной арматурой, не проверять на раскрытие трещин, так как линии электропередачи, в том числе I-го класса, по совокупности капитальности и эксплуатационного качества не могут быть отнесены к строительным сооружениям I-й степени долговечности.

Провода. Сопоставление расчетных коэффициентов запаса прочности в проводах и в стержнях металлических опор по отношению к значениям их пределов текучести показывает, как это видно из табл. 1, их сравнимость.

Применяемые «Правилами» нормативные сопротивления в проводах будут иметь место при нормативных расчетных внешних гололедных и ветровых нагрузках. Но внешние нагрузки в течение 10 и более месяцев в году вовсе отсутствуют, а в остальное время они меньше расчетных. Нагрузки выше расчетных редко имеют место, особенно в I и II расчетных климатических районах. В гололедных районах, в частности, в IV расчетном климатическом районе с особо сильными гололедами, фактические нагрузки относительно чаще выше расчетных, а в редких единичных случаях значительно их превосходят. Поэтому расчет проводов должен производиться по метеорологическим условиям, характеризующимся:

1) отсутствием внешних нагрузок при среднегодовой температуре в данном климатическом районе; этим длительным среднеэксплуатационным условиям соответствуют среднеэксплуатационные сопротивления проводов (табл. 1);

Таблица 1

Коэффициенты запаса прочности и расчетные сопротивления в проводах и в стержнях металлических опор из стали марки Ст-3 при допускаемых напряжениях, принимаемых «Правилами», и при расчетах по предельному состоянию

Материал провода и опоры	Предел прочности, кг/мм^2	Предел текучести — нормативное сопротивление, кг/мм^2	Допускаемое напряжение — среднеэксплуатационное сопротивление, кг/мм^2	Эксплуатационно-допустимое сопротивление, кг/мм^2	Расчетные коэффициенты запаса прочности		Примечание
					Нормированные по пределу прочности	По пределу текучести	
Сталь (железо)	65...70	45...50	32,5...35	52...56	2	1,44...1,40	
Сталь	120	85	60	96	2	1,41	
Медь	39	28	19,5	32	2	1,44	
Алюминий	15...16	10...11	7,5...8	13...12	2	1,33...1,38	
Сталеалюминий АС-35	25,8*	12,9*	9,3*	17	2,77	2,0	
АС-50...АС-70	27,2*	13,25*	9,5*	17	2,86	2,05	
АС-95	32,1*	14,1*	10,0*	19	3,21	2,27	
АС-120...АС-400	31,3*	14,1*	10,0*	19	3,13	2,22	
Сталь Ст-3	—	24**	16	—	—	1,5	I предел
Сталь Ст-3	—	—	18	—	—	1,33	II предел
Сталь Ст-3	—	—	22	—	—	1,09	III предел

* Согласно существующей методике расчета сталеалюминиевых проводов.

** Как выше указывалось, расчетное сопротивление принимается 21 кг/мм^2 .

2) нормативными нагрузками для того или другого климатического района; этим нагрузкам соответствуют нормативные сопротивления проводов, т. е. их предел текучести (табл. 1);

3) изредка наблюдаемыми нагрузками, имеющими место раз в несколько лет в течение небольшого периода времени; этим эксплуатационно-допустимым нагрузкам соответствуют сопротивления в проводах большие, чем их предел текучести, так называемые эксплуатационно-допустимые сопротивления, при которых линия электропередачи остается в эксплуатации (табл. 1).

Предлагаемая дифференциация расчетов проводов, предусматривающая учет их пластических деформаций, позволяет не вводить коэффициентов перегрузки и однородности материала при их расчетах на нормативные и на эксплуатационные нагрузки.

Возникающие опасения в отношении ухудшения виброустойчивости проводов вследствие повышения расчетных сопротивлений не имеют сколько-либо существенного значения, так как виброглушители должны применяться при расчетных сопротивлениях, принимаемых в настоящее время [Л. 3].

Повышение расчетных сопротивлений проводов имеет наибольшее актуальное значение для сталеалюминиевых проводов, почти исключительно применяющихся в настоящее время для линий электропередачи 1-го класса.

Возможность и допустимость повышения нормативных сопротивлений в этих проводах с 9,3 ... 10 кг/мм², принимаемых в настоящее время, до предлагаемых автором настоящей статьи 12,90 ... 14,1 кг/мм² (табл. 1) определяются следующими действенными факторами.

1. Существующая расчетная методика исходит из условия распределения механической нагрузки между стальной и алюминиевыми частями провода пропорционально их модулям упругости.

Между тем испытания механических свойств этих проводов показывают, что это распределение является непропорциональным. Нагрузки на алюминиевую часть провода, вследствие пластических деформаций, обусловливаемых в значительной степени остаточными деформациями алюминия, оказываются меньше, чем расчетные. В частности, при сопротивлении в проводе 14,1 кг/мм² в его алюминиевой части возникает напряжение, равное 8,3 ... 8,6 кг/мм² [Л. 4, 5, 6] вместо 11 кг/мм², получающегося по расчету и не намного превышающего принимаемое в настоящее время напряжение 7,5 ... 8 кг/мм². Такое превышение вполне допустимо, так как работа алюминиевых жил провода в сочетании со стальным сердечником совершенно несравнима с работой алюминиевого провода без стального сердечника.

2. Испытания проводов на утомляемость материала, произведенные автором настоящей статьи, показывают, что сталеалюминиевые провода в отношении их сопротивления усталости обладают несколько худшими характеристиками, чем мед-

ные провода, и для получения одинаковой эксплуатационной прочности требуется принимать коэффициент запаса для сталеалюминиевых проводов на 10 ... 15% больше, чем для медных проводов. При коэффициенте запаса прочности для медных проводов, равном 2, коэффициент запаса прочности для сталеалюминиевых проводов должен приниматься 2,2 ... 2,3 или в среднем 2,25. Этому коэффициенту запаса прочности соответствует нормативное сопротивление 14,1 кг/мм² [Л. 3].

3. Практика эксплуатации сталеалюминиевых проводов в зарубежных странах подтверждает допустимость повышения их расчетных сопротивлений.

В Германии нормативное сопротивление сталеалюминиевых проводов, подсчитанное по методике расчета, во всем идентичной нашей, получается равным 11,53 кг/мм² при $t = -5^\circ$ и дополнительных нагрузках и 11 кг/мм² при наименьшей температуре $t = -20^\circ$ [Л. 7, 8]. Эти нормативные сопротивления удовлетворяют наименьшему коэффициенту запаса прочности для проводов из составных материалов, равному согласно немецким «нормам сильного тока» 2,5 [Л. 7].

Однако в действительности в Германии принимается меньший коэффициент запаса прочности. Так, в сконструированном Прейсварком «невибрирующем» проводе [Л. 9, 10, 11], рассчитанном на такой же ток, как и нормальный провод, необходимая «игра» или зазор между стальным сердечником и алюминиевой оболочкой был получен за счет уменьшения стального сердечника, а не за счет возможного увеличения внутреннего и внешнего диаметра алюминиевой оболочки.

Уменьшение в этом проводе площади поперечного сечения стали с 34 до 17,8 мм², т. е. примерно на 50%, и увеличение тем самым отношения сечения алюминия к стали от 4,32 до 8,26 снизи-

ло прочность провода с $\frac{120 + 4,32 \cdot 18}{1 + 4,32} \cdot 0,875 =$

$= 32,55 \text{ кг/мм}^2$ до $\frac{120 + 8,26 \cdot 18}{1 + 8,26} \cdot 0,875 =$

$= 25,32 \text{ кг/мм}^2$, где согласно немецким нормам: 120 кг/мм² — предел прочности стали; 18 кг/мм² — предел прочности алюминия; 0,875 — коэффициент, учитывающий снижение пределов прочности сталеалюминиевого провода по сравнению с суммой пределов прочности составляющих его проволок.

Следовательно, коэффициент запаса прочности уменьшился с $32,55 : 11,2 = 2,82$ до $25,32 : 11,54 = 2,2 < 2,5$.

В Германии было построено 1 100 км линий электропередачи с этими «невибрирующими» проводами за первые пять лет со времени их появления, и эти провода оправдали себя в эксплуатации [Л. 12].

В Англии эти «невибрирующие» провода не могли быть применены на действующих линиях электропередачи, оказавшихся неустойчивыми в отношении вибрации, лишь потому, что напряже-

ния в этих проводах достигли бы недопустимой величины, так как в Англии сталеалюминиевые провода выбираются и рассчитываются по нормативам, по которым расчетные сопротивления в них получаются большие, чем в Германии [Л. 12].

В США расчетное сопротивление в сталеалюминиевых проводах принимается, как и для всех прочих проводов, равным половине пределов прочности всех проволок [Л. 13], что соответствует коэффициенту запаса прочности провода, равному 2,1.

В Швейцарии, в которой имеют место чрезвычайно большие гололедные отложения на проводах и где наблюдались гололедные образования наибольших из отмеченных в мировой литературе (50 кг/м), расчетные сопротивления проводов принимаются равными пределу текучести при расчетной гололедной нагрузке 2 кг/м (близкой к нагрузке IV района) [Л. 14].

4. Статистика аварийности электросетей в СССР за последние годы показывает, что при абсолютном небольшом числе обрывов проводов и их незначительном удельном весе в общей аварийности не было случаев обрыва сталеалюминиевых проводов от перегрузки гололедом. Эти эксплуатационные данные позволяют сделать вывод о явной целесообразности повышения расчетных сопротивлений в сталеалюминиевых проводах, так как при принимаемых в настоящее время значительно заниженных значениях этих сопротивлений не соблюдается координация в запасах прочности этих проводов и опор. Вследствие этого несоответствия имела место поломка металлических опор при целых проводах из-за чрезмерного возрастания гололедной нагрузки.²

Проверка устойчивости проводов при средних эксплуатационных условиях производится, исходя из допустимых значений среднеэксплуатационных сопротивлений. Эти значения должны быть меньше вышепринятых расчетных сопротивлений в такой же степени, в какой эти расчетные сопротивления для монометаллических проводов меньше предела прочности последних. При этом снижающем коэффициенте, равном 0,7, значения средних эксплуатационных сопротивлений получаются такие же, как допускаемые напряжения, принимаемые «Правилами» (табл. 1).³

Правомерность учета пластических деформаций проводов, т. е. непосредственной связи возможных редких внешних нагрузок, превышающих нормативные, с условиями работы проводов за пределами текучести, определяется характерной особенностью гибкой нити, у которой отсутствует пропорциональность между приложенной нагрузкой и вызванным ею напряжением. Последнее, как известно, объясняется тем, что при увеличе-

нии внешних сил провод удлиняется и тем самым саморазгружается, в результате чего рост нагрузки опережает увеличение напряжения в проводе. Получающиеся увеличенные стрелы провеса проводов вследствие их неупругой деформации можно считать допустимыми на период этих кратковременных, весьма редких больших внешних нагрузок с последующим отрегулированием проводов. При этом по аналогии с указанием «Правил» о допустимости в населенных местностях снижения габарита до земли на 3...3,5 м при обрыве провода в соседних пролетах можно принять для данного случая снижение в 3 м. Однако, как показывают расчеты, оно не превышает 2,5 м (в эксплуатации наблюдались еще большие снижения этих габаритов при значительных гололедных отложениях). Вместе с тем не следует опасаться, что при повторных гололедах деформации увеличатся, так как последние практически не меняются при не превосходящих по своей величине повторных нагрузках тем более, что старые провода дают меньшие удлинения, чем новые.

Учет особенностей кривых растяжений проводов, построенных по данным испытаний Ленинградского электрофизического института [Л. 4, 5], по которым (рис. 1, 2) при начальных сравнительно небольших и поэтому допустимых деформациях имеет место относительно значительное увеличение сопротивлений в материале провода, позволяет повысить эксплуатационно-допустимую нагрузку, которой соответствует эксплуатационно-допустимое сопротивление провода. За расчетные значения этих эксплуатационно-допустимых сопротивлений могут быть приняты те их значения, которые находятся в начальной надежной части приведенных кривых растяжения проводов на участке от предела пропорциональности до предела прочности. Эксплуатационно-допустимые сопротивления для стальных проводов из-за отсутствия данных испытаний об их работе за пределами текучести могут быть приняты равными 0,8 от их предела прочности, т. е. примерно в таком же соотношении, как и для медных проводов. Предлагаемые значения эксплуатационно-допустимых

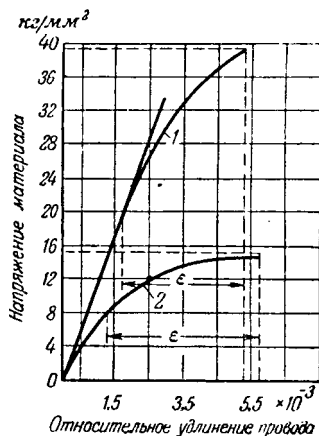


Рис. 1. Диаграмма растяжения проводов.
1 — медные провода; 2 — алюминиевые провода.

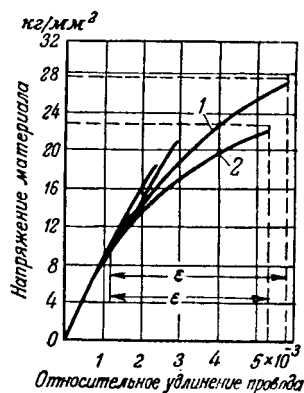


Рис. 2. Диаграмма растяжения проводов.
1 — сталеалюминиевые провода марок АС-95—АС-400;
2 — сталеалюминиевые провода марок АС-50—АС-70.

² Шведские электротехнические нормы (SEK 1945 г.) при расчетах проводов на нормативные гололедные нагрузки допускают напряжения выше их предела текучести, в частности для медных проводов принимается 32 кг/мм².

³ По Шведским нормам при расчетах проводов на минимальную температуру (дополнительные нагрузки отсутствуют) также принимается 50% предела прочности провода.

сопротивлений, приведенные в табл. 1, примерно соответствуют длительным сопротивлениям растяжению по германским нормам [Л. 8], по которым они принимаются для медных проводов равными 30 кг/мм^2 , сталеалюминиевых — 20 кг/мм^2 , алюминиевых — 13 кг/мм^2 и стальных — 56 кг/мм^2 (при проводах с пределом прочности 70 кг/мм^2).

Приведенные в приложении расчеты сталеалюминиевого и медного проводов средних сечений АС-120 и М-70, подвешенных на типовых металлических опорах во II расчетном климатическом районе, показывают, что: 1) при нормативных сопротивлениях $14,1$ и 28 кг/мм^2 эксплуатационно-допустимые сопротивления достигают принятых значений 19 и 32 кг/мм^2 при толщине стенки гололеда $18,25 \text{ мм}$ для сталеалюминиевого провода и $14,7 \text{ мм}$ для медного провода; средние эксплуатационные сопротивления при практически наименьшей средней эксплуатационной температуре -5° не достигают принятых значений 10 и $19,5 \text{ кг/мм}^2$; 2) расчетное сопротивление медного провода при принятой эксплуатационно-допустимой нагрузке, соответствующей толщине стенки гололеда, наблюдавшейся раз в пятнадцать лет и равной 18 мм , должно быть уменьшено с 28 до 24 кг/мм^2 .

Эти результативные данные иллюстрируют, что значительные запасы прочности, имеющиеся в проводах, не используются и что их расчетные сопротивления могут быть повышены, в частности, для сталеалюминиевых проводов на 40% и тем самым расчетные пролеты могут быть увеличены на 20% .

Дальнейшие уточнения приводят к снижению приведенных в табл. 1 нормативных сопротивлений медного и алюминиевого проводов при работе последних без комбинации с более прочным стальным проводом, поскольку по испытаниям ЛЭТИ [Л. 4, 5] пределы текучести этих монометаллических проводов равны соответственно 24 и $7,5 \dots 8 \text{ кг/мм}^2$ вместо принятых «Правилами» 28 и $10 \dots 11 \text{ кг/мм}^2$. При этих сниженных значениях нормативных сопротивлений принятые в табл. 1 средние эксплуатационные сопротивления этих проводов также уменьшаются до 16 и $4,5 \dots 5 \text{ кг/мм}^2$.

Это уточнение еще в большей степени увеличивает технико-экономические преимущества сталеалюминиевых проводов.

Кроме того, в отношении стальных (железных) проводов и стальных грозозащитных тросов надо учитывать на ближайший период времени их меньшую устойчивость против коррозии. Это обстоятельство требует введения снижающих коэффициентов на все значения расчетных сопротивлений этих проводов, приведенные в табл. 1.

Эти коэффициенты могут быть приняты равными $0,6$; $0,7$ и $0,9$ соответственно для среднеэксплуатационных, нормативных и эксплуатационно-допустимых сопротивлений этих проводов. Получающиеся при этом значения (с округлением) сопротивлений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сопротивления стальных проводов с учетом снижающих коэффициентов на коррозионность

Виды сопротивлений	Значения сопротивлений, кг/мм^2	
	стальные (железные) провода	стальные провода
Среднеэксплуатационные . . .	20 . . . 21	36
Нормативные	32 . . . 35	60
Эксплуатационно-допустимые	47 . . . 50	85

В соответствии с приведенными уточнениями, принимаемые значения расчетных сопротивлений алюминиевых, стальных (железных) и стальных проводов не отличаются от регламентированных в настоящее время «Правилами» максимально допустимых напряжений в этих проводах.

Выводы. 1. Техничко-экономические подсчеты определяют значительную экономию материалов и труда, достигаемую при расчете механической части линии электропередачи по предельному состоянию и выражающуюся в ежегодном значительном уменьшении капиталовложений. В частности, стоимость 1 км линии электропередачи уменьшается в среднем на 2500 и 5000 руб для напряжения 110 кВ соответственно при деревянных и металлических опорах и на 10000 руб для напряжения 220 кВ при металлических опорах.

2. Оценка степени эксплуатационной надежности линий электропередачи, рассчитанной по предельному состоянию, приводит к выводу, что их эксплуатационная надежность в итоге повышается вследствие уменьшения числа слабых точек на линии благодаря уменьшению количества опор, в то время как отказ от излишних запасов прочности в опорах и проводах не приводит к фактическому снижению их устойчивости.

Приложение. Требуется произвести сокращенный расчет проводов АС-120 и М-70 для линии электропередачи, проходящей во II расчетном климатическом районе. Рабочий габарит промежуточной опоры $15,1 \text{ м}$. Расчетная (габаритная) стрела провеса $f_2 = 7,3 \text{ м}$. Расчетный пролет выше критического (табл. 3).

Для медного провода увеличение эксплуатационно-допустимой толщины стенки гололеда с $14,7 \text{ мм}$ до необходимой толщины 18 мм требует снижения расчетного сопротивления с R до R' и тем самым уменьшения расчетного пролета с l до l' . Значения этих двух неиз-

Таблица 3

Наименование параметра	АС-120	М-70
Расчетное сопротивление провода $R, \text{ кг/мм}^2$	14,1	28
Удельная нагрузка от собственного веса провода, веса гололеда и давления ветра при гололеде $j_7, \text{ кг/м} \cdot \text{мм}^2$	$8 \cdot 76 \cdot 10^{-3}$	$18 \cdot 07 \cdot 10^{-3}$
Расчетный пролет $l = \sqrt{\frac{8R \cdot f_2}{j_7}}$ (1) в соответствии с последующей проверкой по вертикальной стреле провеса при $t = -5^\circ$ и j_3 ; $t = +40^\circ$ и $j_1, \text{ м}$	307	301

Продолжение

Наименование параметра	АС-120	М-70
Удельная эксплуатационно-допустимая нагрузка $i_{\text{эдо}} = R_{\text{эдо}} \times$ $\times \sqrt{\frac{24\epsilon}{l^2} + \frac{i_7^2}{R^2}}$ (2) с учетом остаточной деформации в проводе при неизменной температуре [Л. 4], кг/м·мм ² , где: а) эксплуатационно-допустимое сопротивление провода $R_{\text{эдо}}$, кг/мм ² ; б) удлинение провода ϵ при увеличении сопротивления в нем на величину $R_{\text{эдо}} - R$ вследствие увеличения нагрузки от i_7 до $i_{\text{эдо}}$ согласно кривым растяжения проводов (рис. 1, 2)	15,8·10 ⁻³ 19 0,0012	24,7·10 ⁻³ 32 0,00067
Среднеэксплуатационное сопротивление $R_{\text{срэ}}$, соответствующее среднеэксплуатационной температуре $t_{\text{срэ}} + 5^\circ$ $t_{\text{срэ}} + 0^\circ$ $t_{\text{срэ}} - 5^\circ$ меньше допускаемого, кг/мм ²	7,38 7,67 7,95 10	17,85 18,32 18,77 19,5
Стрела провеса при эксплуатационно-допустимой нагрузке $i_{\text{эдо}} =$ $= f_2 \frac{R}{l_7} \sqrt{\frac{24\epsilon}{l^2} + \frac{i_7^2}{R^2}}$, определяемая из совместного решения уравнения (2) и уравнения $f_2 = \frac{l^2 i_7}{8R}$ (она получается больше габаритной на 9,8 — 7,3 = 2,5 м и на 8,9 — 7,3 = 1,6 м, что меньше допустимого превышения на 3 м), м	9,8	8,9
Удельная нагрузка от веса гололеда $i_{2\text{эдо}} = i_{\text{эдо}} - i_1$, соответствующая эксплуатационно-допустимой нагрузке без учета ветровой нагрузки, как практически не изменяющая толщину стенки гололеда, кг/м·мм ²	12·24·10 ⁻³	15·59·10 ⁻³
Толщина (мм) стенки гололеда $b =$ $= \frac{d}{2} + \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \frac{1000 i_{2\text{эдо}} \cdot s}{3,14 \cdot 0,9}}$, соответствующая эксплуатационно-допустимой гололедной нагрузке $i_{2\text{эдо}}$, где: а) диаметр провода d , мм б) сечение провода s , мм ²	18,25 15,3 141,4	14,7 10,6 68,7

вестных R' и l' находятся из совместного решения двух уравнений (1) и (2) при заданной $j'_{\text{эдо}}$ (соответствующей толщине стенки гололеда 18 мм) и известной f_2 . При этом следует иметь в виду, что значение ϵ для перепада сопротивления $R_{\text{эдо}} - R$ увеличивается до ϵ' в результате увеличения этого перепада до $R_{\text{эдо}} - R'$, поскольку $R' < R$. Однако можно обойтись без введения аналитической связи между R и ϵ , так как значения ϵ' , R' и l' быстро и точно определяются путем последовательных приближений, имея также в виду, что в подкоренном выражении уравнения (2) первый член, в который входит значение ϵ , мал по сравнению со вторым членом. В рассмотренном примере $\epsilon' = 0,0011$; $R' = 24$ кг/мм² и $l' = 278$ м.

Литература

1. Строительные нормы и правила. Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, Москва, 1954.
2. В. М. Коченов. Несущая способность элементов и сооружений деревянных конструкций. Госстройиздат, 1953.
3. О. Г. Вексельман. Выступление в дискуссии по статье А. А. Глазунова, А. А. Глазунова и Г. М. Розанова „Экономически целесообразное отношение сечения алюминия и стали в сталеалюминиевых проводах“. Электричество, № 6, 1953.
4. Л. В. Торосян. Исследование механических свойств проводов. Труды Всесоюзной электротехнической ассоциации, т. II, ОНТИ, 1935.
5. М. П. Виноградов и Л. В. Торосян. Механический расчет проводов с учетом остаточных деформаций. Сборник докладов, представленных комитетом по участию СССР в международных энергетических объединениях. ОНТИ, 1937.
6. М. М. Белоусов. Расчет сталеалюминиевых проводов по их действительным характеристикам. Электричество, № 4, 1953.
7. A. Birklin. Сталеалюминиевые провода. ETZ, стр. 1143, 1924.
8. VDE. Нормы устройства воздушных линий силового тока. 23-е издание, 1941.
9. Preiswerk. Невибрирующий провод для воздушных линий передачи. ETZ, стр. 1225, 1934.
10. Preiswerk. Невибрирующий провод для воздушных линий передачи. Association Suisse des Electriciens, Bull., стр. 543, 1936.
11. Preiswerk. Вклад в разрешение проблемы вибрации проводов на линиях передачи. Париж. конференция 1937, доклад № 212.
12. E. W. W. Doable, W. D. Tuck. Вибрация проводов воздушных линий. JSEE, т. 86, № 518, стр. 129, 1940.
13. S. A. Jordan. Упрощенный метод расчета стрелы провеса и напряжения сталеалюминиевых проводов. Tr. AIEE, т. III, стр. 1108, 1952.
14. Сравнительный обзор действующих в различных странах норм сооружения электрических воздушных линий силового тока. ОНТИ, 1937.

[4. 4. 1955]



Расчет магнитного сопротивления цепей с переменной площадью сечения

Кандидат техн. наук П. В. НОВИЦКИЙ
и инж. М. М. ФЕТИСОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Обыкновенно при расчете магнитного сопротивления цепей с переменной площадью поперечного сечения их разбивают на ряд мелких участков, рассчитывают их сопротивление по некоторым средним значениям площади поперечного сечения и магнитной проницаемости стали данного участка, а затем складывают полученные цифры. Такой метод расчета довольно громоздок и не точен. Здесь предлагается простой и достаточно точный метод расчета сопротивления сложных магнитных цепей с переменной площадью поперечного сечения, пригодный для определения магнитного сопротивления как на постоянном, так и на переменном токе при любой степени проявления поверхностного эффекта.

Пусть некоторое ферромагнитное тело с переменной площадью поперечного сечения (рис. 1) пронизывается вдоль оси X магнитным потоком¹ Φ , в общем случае переменным во

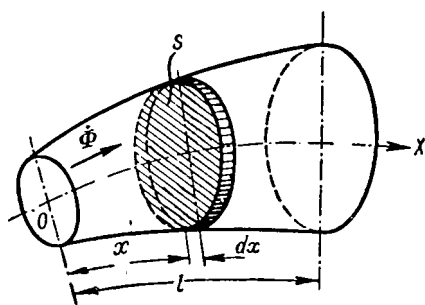


Рис. 1.

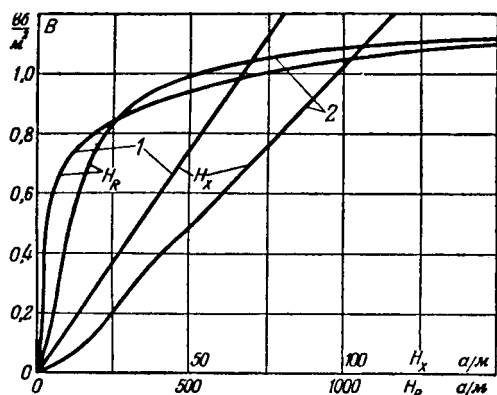


Рис. 2. Характеристика листовых электротехнических сталей Э4-А (кривые 1) и Э1-АА (кривые 2) ($f = 50$ гц, толщина листа 0,5 мм).

времени. Выделим на расстоянии x от произвольного начала элемент этого тела длиной dx . Тогда комплексное магнитное сопротивление

¹ В статье везде приняты действующие значения величин Φ , F , \dot{H} , B и др.

по оси X этого элемента можно представить как [Л. 1]:

$$dZ_m = \frac{d\dot{F}}{\dot{\Phi}} = \frac{\dot{H}}{\dot{\Phi}} dx,$$

где $d\dot{F}$ и \dot{H} — н. с. и напряженность магнитного поля в рассматриваемом сечении.

Если направить поток по оси вещественных — положить $\dot{\Phi} = \Phi$, то для полного магнитного сопротивления участка магнитной цепи длиной l можно написать:

$$Z_m = \int_0^l \frac{\dot{H}}{\Phi} dx.$$

Активное и реактивное магнитные сопротивления можно найти из соотношения:

$$Z_m = R_m + jX_m = \int_0^l \frac{H_R}{\Phi} dx + j \int_0^l \frac{H_X}{\Phi} dx, \quad (1)$$

где H_R — составляющая напряженности магнитного поля, совпадающая по фазе с магнитным потоком и характеризующая собою реактивную мощность магнитного потока;

H_X — составляющая напряженности магнитного поля, опережающая поток на угол $\frac{\pi}{2}$ и характеризующая активные потери в ферромагнитном теле.

Формула (1) пригодна для расчета магнитного сопротивления как на постоянном, так и на переменном токе при любой степени проявления поверхностного эффекта.

Для определения сопротивления магнитной цепи необходимо знать характеристики используемой стали, которые должны соответствовать реальным условиям работы рассматриваемой магнитной цепи. Например, для определения магнитного сопротивления на постоянном токе следует пользоваться основной кривой намагничивания $B = f(H)$. При определении сопротивления на переменном токе в зависимости от степени проявления поверхностного эффекта следует пользоваться соответствующими характеристиками, снятыми на переменном токе² (рис. 2, 3).

² Кривые рис. 2 получены путем пересчета кривых, приведенных в [Л. 2]. В части рис. 3 следует иметь в виду указание Л. Р. Неймана [Л. 3], что при резком появлении поверхностного эффекта характеристики $H = f\left(\frac{\Psi}{U}\right)$ для всех практически используемых ферромагнитных материалов в области сильных магнитных цепей совпадают с точностью $\pm 10\%$.

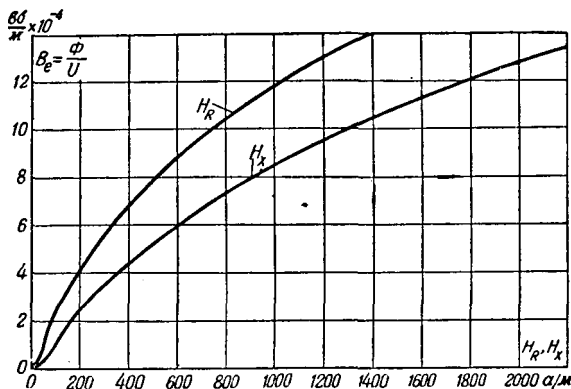


Рис. 3. Характеристика стали Армко при резко выраженном поверхностном эффекте ($f = 50 \cdot 24$).

ление можно тогда определить как $\frac{1}{\Phi} \int_{l_1}^{l_2} H dx$.

Вид зависимостей $S = f(x)$ и $\Phi = f(x)$ определяется конфигурацией конкретной магнитной цепи, и их построение обычно не вызывает затруднений.

Вполне понятно, что при определении комплексного магнитного сопротивления такое построение надо произвести одинаковым образом как для H_R , так и для H_x (рис. 3), а полученные цифры сложить согласно (1). При резком проявлении поверхностного эффекта необхо-

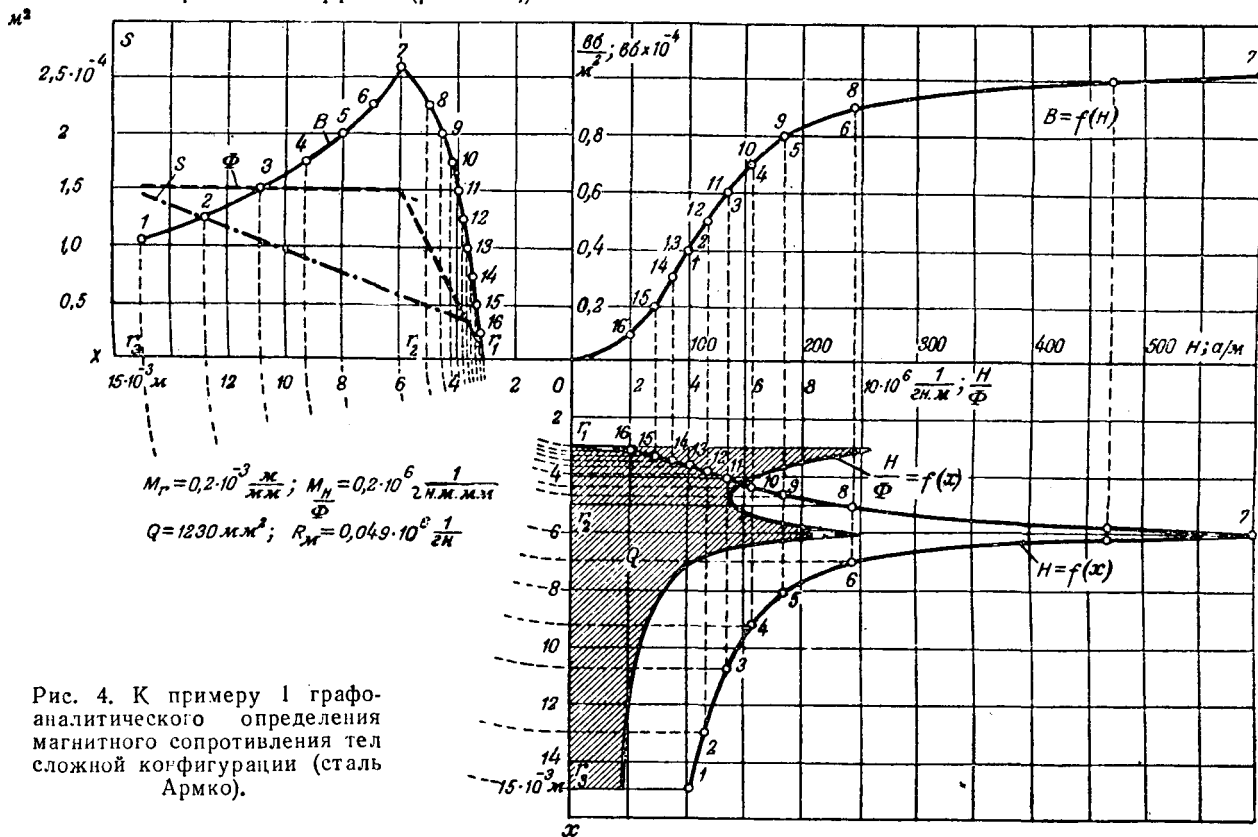


Рис. 4. К примеру 1 графоаналитического определения магнитного сопротивления тел сложной конфигурации (сталь Армко).

Предлагаемый графоаналитический метод расчета магнитного сопротивления очень прост и состоит в том, что по кривым потока $\Phi = f(x)$ и площади $S = f(x)$, располагаемым влево по оси B (рис. 4), строится зависимость $B = f(x)$, а по этой зависимости, пользуясь кривой $B = f(H)$, данной в первом квадрате, зависимость $H = f(x)$ (второй квадрат). Кривую $H = f(x)$ затем легко перестроить в кривую $\frac{H}{\Phi} = f(x)$. Интегрирование кривой $\frac{H}{\Phi}$ (с учетом масштабов величин H , Φ , $\frac{H}{\Phi}$ и l) в пределах от l_1 до l_2 дает искомое сопротивление.

Если магнитный поток остается постоянным на рассматриваемом участке магнитной цепи, то необходимость в построении кривой $\frac{H}{\Phi} = f(x)$ отпадает, так как магнитное сопротив-

ление можно учитывать, что вместо зависимостей индукции $B = f(x)$ и площади $S = f(x)$ следует строить зависимости линейной плотности магнитного потока $B_l = \frac{\Phi}{U} = f(x)$ и периметра $U = f(x)$.

Заметим, что в области сильных магнитных полей ($H > H_k$) при резком проявлении поверхностного эффекта справедливо соотношение³ [Л. 3]:

$$\frac{H_R}{H_X} = \frac{R_m}{X_m} \approx 0,55. \quad (2)$$

Поэтому в ряде случаев, когда в рассчитываемой магнитной цепи имеют место достаточно большие напряженности магнитного поля, можно определить лишь одну составляющую комплекс-

³ Предложено для стали Армко при синусоидальном потоке.

ного магнитного сопротивления и, воспользовавшись равенством (2), найти другую составляющую.

Как показала практика, преимущества графо-аналитического метода расчета особенно ощутимы в случае, когда доля определяемого этим методом магнитного сопротивления сложного участка велика по сравнению с магнитным сопротивлением остальной магнитной цепи, и, следовательно, когда от точности расчета рассматриваемого участка решающим образом зависит точность расчета всей магнитной цепи. Ошибка описанного метода не превосходит 10...15%, тогда как при усредненном вычислении магнитного сопротивления в сложной цепи легко ошибиться в 1,5...2 раза.

Примеры. 1 (рис. 5). Рассчитать магнитное сопротивление на постоянном токе диска из стали Армко цилиндрической магнитной системы, изображенной на рис. 5, при заданной величине магнитного потока $\Phi = 0,6 \cdot 10^{-4}$ вб.

Влево от оси B (рис. 4) строим кривую $\Phi = f(x)$, считая, что от r_1 до r_2 магнитный поток возрастает по линейному закону, а в промежутке $r_2 \dots r_3$ остается постоянным и равным $0,6 \cdot 10^{-4}$ вб. Площадь поперечного сечения диска меняется по закону: $S = 2\pi r h = 2 \cdot 3,14 \times 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot r = 9,42 \cdot 10^{-3} \cdot r$ [м²], где $h = 1,5$ мм — толщина диска, индукция $B = \frac{\Phi}{9,42 \cdot 10^{-3} \cdot r}$. По построенной кривой $B = f(x)$ путем соответствующего переноса точек на основную кривую $B = f(H)$ (для стали Армко) строим вниз от оси H кривую $H = f(x)$.

Путем деления ординат H на магнитный поток Φ в соответствующих точках получаем кривую $\frac{H}{\Phi} = f(x)$.

Площадь Q , ограниченная кривой $\frac{H}{\Phi} = f(x)$, в пределах от r_1 до r_3 выражает собою $\int_{r_1}^{r_3} \frac{H}{\Phi} dr$. Поэтому магнитное сопротивление диска от r_1 до r_3 .

$$R_m = \int_{r_1}^{r_3} \frac{H}{\Phi} dr = Q \cdot M_H \cdot M_r = 1230 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 10^6 = 0,049 \cdot 10^6 \frac{1}{2H},$$

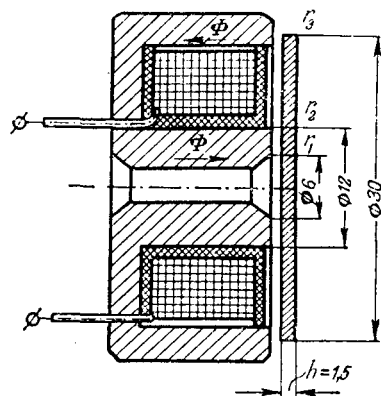
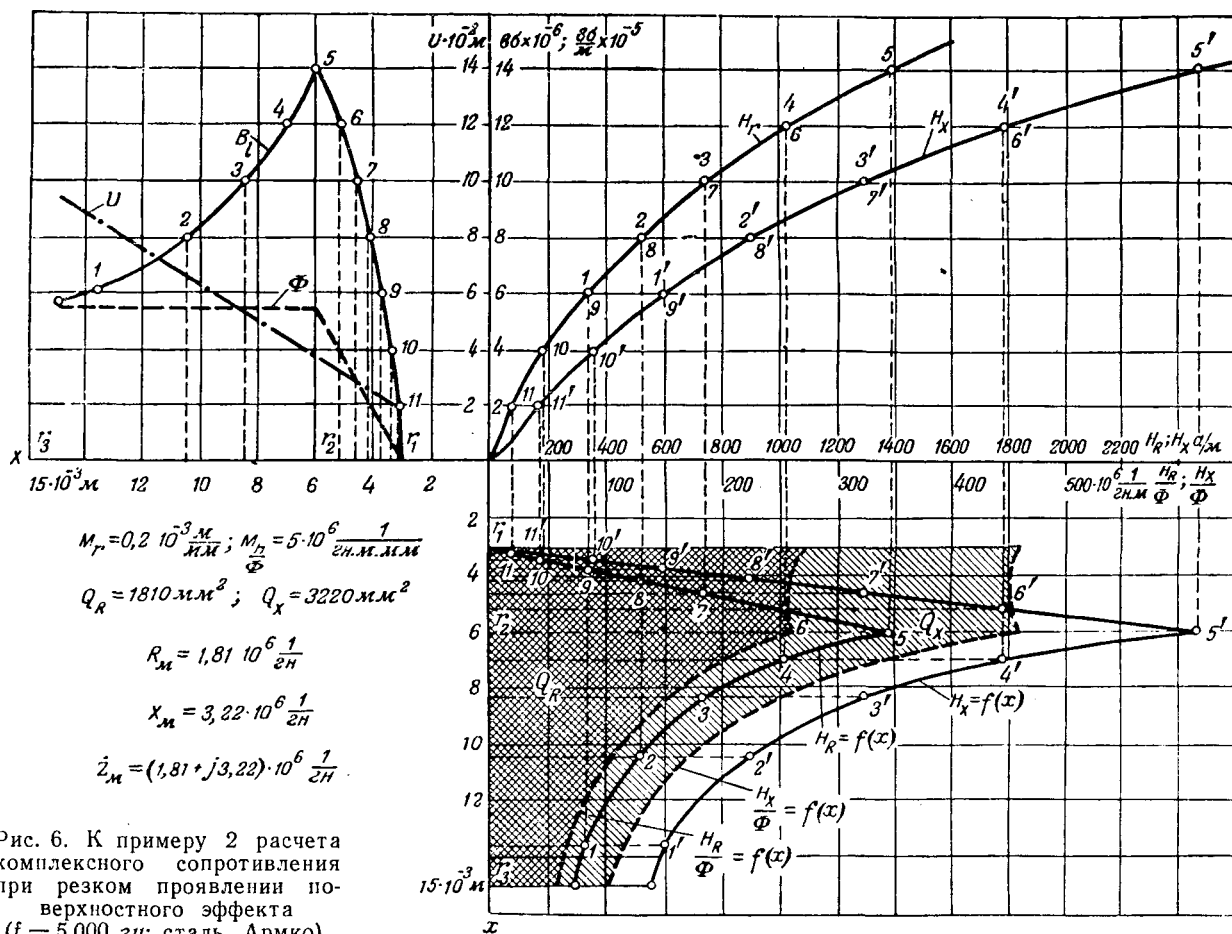


Рис. 5.



Расчет магнитных усилителей с обратной связью

Кандидат техн. наук Р. Х. БАЛЪЯН

Ленинград

Одной из основных задач расчета магнитных усилителей является определение условий, при которых могут быть обеспечены их минимальный вес, габарит или стоимость. В статье даны основные закономерности для усилителей с обратной связью и излагается упрощенный способ их расчета, приводящий к простым инженерным решениям.

Рассматриваются оба вида обратной связи — внутренняя (рис. 1, а) и внешняя (рис. 1, б) как для одноконтурных (дроссельных), так и двухконтурных усилителей. Сердечники предполагаются тороидальными, так как эта форма наиболее рациональна. Обратная связь считается достаточно глубокой, близкой к 100%.

Введем обозначения: I_n , U_n — номинальные ток и напряжение нагрузки; U_x — допустимое напряжение на нагрузке при холостом ходе; I_y — ток управления; δ — плотность тока, а/мм². Эти

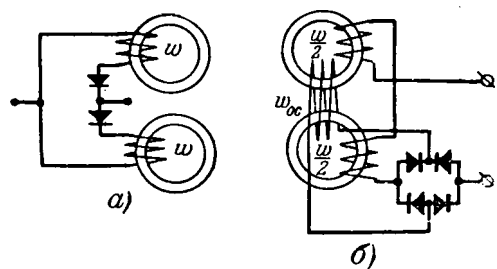


Рис. 1. Базисные схемы магнитных усилителей с внутренней (а) и внешней (б) обратной связью.

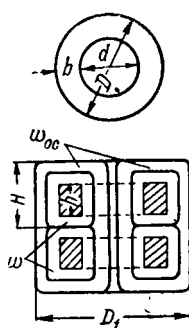


Рис. 2. Основные размеры обмоточного тороидального сердечника.

величины задаются. Кроме того, обозначим: B и U — индукция и напряжение на дросселе при холостом ходе; I_d — ток в обмотке дросселя в режиме максимального выхода; w , w_{oc} , w_y — числа витков рабочей обмотки, обмотки обратной связи и управления; q — сечение провода силовых обмоток, мм²; k_z — коэффициент заполнения по меди; k_c — то же по стали; S — активное сечение сердечника, см². Обозначения геометрических размеров понятны из рис. 2, причем на рисунке $\frac{h}{b} = \beta$. Все линейные величины даны в сантиметрах, индукция — в гауссах.

Основные закономерности. Особенностью усилителей с глубокой обратной связью является то обстоятельство, что обмотка управления занимает пренебрежимо малое место по сравнению с силовыми обмотками и поэтому ее можно не учитывать. Достаточно лишь для надежности принять несколько заниженный коэффициент заполнения k_z , т. е. вместо 0,25...0,3 принимать $k_z = 0,22...0,27$. С учетом сказанного, считая U синусоидальной величиной, можно написать исходные равенства:

$$U = \pi \sqrt{2} f w S B \cdot 10^{-8}, \quad (1)$$

$$S = k_c b h = k_c \beta b^2,$$

или, заменив b :

$$S = k_c \beta \left(\frac{D-d}{2} \right)^2. \quad (2)$$

где M_r — масштаб длины (в данном примере — радиуса);

$$M_H \frac{H}{\Phi} \text{ — масштаб кривой } \frac{H}{\Phi} = f(x).$$

2. Рассчитать комплексное магнитное сопротивление диска примера 1 при значении магнитного потока $\Phi = 5,3 \cdot 10^{-6}$ вб и частоте источника питания катушки $f = 5000$ гц.

При частоте 5000 гц в диске будет резко выражен поверхностный эффект, в чем легко убедиться, если подсчитать по формулам Л. Р. Неймана [Л. 3] глубину проникновения электромагнитной волны в толщу диска.

Как и в предыдущем примере, влево от оси B (рис. 6) строим кривую потока $\Phi = f(x)$ и периметра $U = 2 \cdot \pi r = 6,28 \cdot 10^{-3} r$ [м]. Здесь же получаем кривую изменения линейной плотности магнитного потока в функции радиуса диска как $B_l = \frac{\Phi}{U} = \frac{\Phi}{6,28 \cdot 10^{-3} r}$. Путем переноса соответственных точек на кривые $B_l = f(H_R)$ и $B_l = f(H_X)$, пересчитанные из кривых рис. 3 по соотношениям $H_{50} =$

$$= H_{5000}, \left(\frac{\Phi}{U} \right)_{5000} = \left(\frac{\Phi}{U} \right)_{50} \sqrt{\frac{50}{5000}}, \text{ находим } H_R = f(x)$$

и $H_X = f(x)$. Кривые $\frac{H_R}{\Phi} = f(x)$ и $\frac{H_X}{\Phi} = f(x)$ получаем аналогично описанному в примере 1.

Активные и реактивные составляющие искомого магнитного сопротивления будут:

$$Z_m = R_m + jX_m = (Q_R + jQ_X) M_H \cdot M_r =$$

$$= (1,81 + j3,22) \cdot 10^6 \frac{1}{2H}.$$

Если воспользоваться в этом примере формулой (2), приняв за известное R_m , то

$$X_m = \frac{R_m}{0,55} = 3,29 \cdot 10^6 \frac{1}{2H}.$$

Как видно, расчет по формуле (2) дает вполне удовлетворительный результат.

Литература

1. П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники. Госэнергоиздат, 1951.
2. Б. К. Буль. Метод расчета катушки со сталью на переменном токе. Электричество, № 8, 1954.
3. Л. Р. Нейман. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. Госэнергоиздат, 1948.

[6. 5. 1955]



Для внутренней обратной связи (рис. 1,а)

$$w = k_s \frac{\pi d^2}{4q} \cdot 10^2 = k_s \frac{\pi d}{4I_\partial} d^2 \cdot 10^2. \quad (3)$$

Для внешней обратной связи (рис. 1,б) рабочая обмотка занимает лишь половину окна, поэтому

$$\frac{w}{2} = \frac{1}{2} \cdot k_s \frac{\pi d^2}{4q} \cdot 10^2, \text{ или } w = k_s \frac{\pi d^2}{4I_\partial} 10^2.$$

Решая (1), (2) и (3) совместно, получим:

$$D = d + \frac{A}{d \sqrt{\beta}}; \quad (4)$$

$$A = \sqrt{\frac{8 \sqrt{2} U I_\partial \cdot 10^6}{k_s k_c \delta \pi^2 f B}} [cm^2]. \quad (5)$$

Введем понятие экономического показателя усилителя:

$$\mathcal{E} = m V_m + n V_c,$$

где V_m — объем меди; V_c — объем стали; m и n — экономические коэффициенты, определяемые поставленными требованиями.

В частности, если требуется добиться наименьшего общего габарита, то нас интересуют реально занятые объемы, и надо принять:

$$m = \frac{1}{k_s}; \quad n = \frac{1}{k_c}.$$

Если решается задача на минимум веса усилителя, то m и n будут удельные веса меди и стали с их изоляцией. Наконец, если необходимо обеспечить минимальную стоимость, то под m и n следует понимать соответствующие удельные стоимости.

Во всех случаях удобно записать:

$$\mathcal{E} = m (V_m + k V_c). \quad (6)$$

Коэффициент $k = \frac{n}{m}$ — относительный экономический коэффициент.

Из рис. 2 следует, что объем стали

$$V_c = \frac{\pi}{2} \beta (D^2 - d^2) k_c \frac{D - d}{2}.$$

Общий объем

$$V = \frac{\pi}{2} (D^2 + d^2) \left[\beta \frac{D - d}{2} + (1 + \gamma) \frac{d}{4} \right],$$

где для внутренней связи $\gamma = 1$, для внешней $\gamma = \frac{1}{2}$. Следовательно, объем меди

$$V_m = k_s \left(V - \frac{V_c}{k_c} \right).$$

Подставляя в (6) выражения для V_c и V_m и учитывая (4), получим окончательно:

$$\mathcal{E} = \frac{\pi}{2} m k_s \left[\frac{1 + \gamma}{2} d^3 + A \left(\sqrt{\beta} + \frac{1 + \gamma}{2 \sqrt{\beta}} \right) d + + A^2 \frac{1}{2d} \left(1 + \frac{1 + \gamma}{2\beta} + \frac{k k_c}{k_s} \right) + \frac{A^3}{4 \sqrt{\beta}} \left(1 + \frac{k k_c}{k_s} \right) \frac{1}{d^3} \right]. \quad (7)$$

Это выражение является основным для анализа. Из (7) следует, что экономические пока-

затели усилителя зависят от диаметра сердечника d и β — соотношения сторон сечения.

Исследование (7) на минимум в функции этих двух переменных, сводящееся к решению системы уравнений шестой степени, показывает, что для каждой задачи, кладущей в основу тот или иной экономический показатель \mathcal{E} , существует определенная зависимость $d(\beta, A)$, обеспечивающая оптимальные результаты, а именно:

$$d = N(\beta) \sqrt{A}. \quad (8)$$

Величина $N(\beta)$ имеет различные значения для двух видов обратной связи и определяется вычислением по следующей формуле:

$$N = \sqrt{-\sqrt{-\frac{p}{3} \left(M + \frac{1}{M} \right) - \frac{1}{9} \left(\frac{1}{\sqrt{\beta}} + \frac{2 \sqrt{\beta}}{1 + \gamma} \right)}}, \quad (8a)$$

где

$$M = \sqrt[3]{\frac{2 \sqrt{-p^3}}{\sqrt{27g + 1} \sqrt{27g^2 + 4p^3}}};$$

$$p = -\frac{1}{3} \left[\frac{1}{2\beta} + \frac{k k_c + k_s}{(1 + \gamma) k_s} + \frac{1}{9} \left(\frac{1}{\sqrt{\beta}} + \frac{2 \sqrt{\beta}}{1 + \gamma} \right)^2 \right];$$

$$g = \frac{2}{729} \left(\frac{1}{\sqrt{\beta}} + \frac{2 \sqrt{\beta}}{1 + \gamma} \right)^3 + \frac{1}{27} \left(\frac{1}{\sqrt{\beta}} + \frac{2 \sqrt{\beta}}{1 + \gamma} \right) \times$$

$$\times \left(\frac{1}{2\beta} + \frac{k k_c + k_s}{(1 + \gamma) k_s} \right) - \frac{k k_c + k_s}{2 k_s (1 + \gamma) \sqrt{\beta}}.$$

Определены также и значения β , которые гарантируют наилучшие показатели. Так, минимальный общий габарит усилителя достигается при $\beta = 3,2$ для внутренней и $\beta = 2,15$ для внешней обратной связи. Минимальный вес обеспечивается при β соответственно 3,0 и 1,9. Практически важным является тот факт, что в определенном диапазоне β наблюдается лишь незначительное отклонение \mathcal{E} от минимального значения для всех видов задач. Эта зависимость может быть найдена, если в (7) подставить соотношения (8).

Тогда получим для оптимальных условий:

$$\mathcal{E}_0 = \frac{\pi}{2} m k_s \sqrt[3]{\frac{1 + \gamma}{2}} N^3 + \left(\sqrt{\beta} + \frac{1 + \gamma}{2 \sqrt{\beta}} \right) N + + \frac{1}{2N} \left(1 + \frac{1 + \gamma}{2\beta} + \frac{k k_c}{k_s} \right) + \frac{1}{4 \sqrt{\beta} N^3} \left(1 + \frac{k k_c}{k_s} \right) =$$

$$= \frac{m k_s \pi}{2} \sqrt[3]{A^3 \cdot Z(\beta)}. \quad (9)$$

Зависимость $\mathcal{E}(\beta)$ характеризуется функцией $Z(\beta)$.

На рис. 3 приведены в относительных единицах кривые $Z = f(\beta)$ применительно ко всем поставленным задачам экономического расчета.

Из рис. 3 можно видеть, что в зоне $1,5 \leq \beta \leq 5$ для всех возможных задач отклонение Z от минимума практически ничтожно. При квадратном сечении сердечника ($\beta = 1$) Z несколько увеличивается и показатели ухудшаются на 4...10%. При дальнейшем уменьшении β ($\beta < 1$) происходит уже быстрое отклонение показате-

лей от их минимальных значений. Таким образом, при рациональном проектировании сердечник должен иметь либо квадратную, либо, что лучше, вытянутую вдоль оси прямоугольную форму при соотношении сторон от 1,5 до 5.

Интересно также выяснить, как изменяются показатели при нарушении оптимального соотношения (8).

Положив $\beta = \text{const} = \beta_0$,

$$d = \frac{d}{d_0} d_0 = \frac{d}{d_0} N_0 \sqrt{A},$$

получим по (7) зависимость \mathcal{E} от $\left(\frac{d}{d_0}\right)$, изображенную на рис. 4 в относительных единицах для внутренней обратной связи и $\beta_0 = 3$. Из графиков видно, что если по β минимум был очень пологим, то по $\frac{d}{d_0}$, наоборот, он весьма

крут. Таким образом, отклонение от соотношения (8) может привести к значительному ухудшению экономических показателей усилителя. Отсюда следует сделать вывод, что соблюдение условия (8) строго обязательно.

Чтобы облегчить нахождение величины N , на рис. 5 приведены уже вычисленные по (8а) значения N в зависимости от β .

Кривые рис. 3—5 построены для $k_s = 0,25$ и $k_c = 0,9$. Для определения минимума габарита кривые применимы для любых k_s и k_c , ибо в (7)

$$k = \frac{k_s}{k_c} \text{ и } \frac{k k_c}{k_s} = 1.$$

Выведенные зависимости позволяют также произвести строго обоснованное сравнение по экономическим показателям схем внешней и внутренней обратной связи. Для этого найдем по (9) оптимальный показатель \mathcal{E} для обеих схем, вводя соответствующие им значения N и A . Определяя A по (5), учтем, что согласно общей теории выпрямления [Л. 1] для внутренней связи

$$\left. \begin{aligned} I_d &= \frac{I_n}{\sqrt{2}}, \\ I_d &= I_n. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

для внешней

Кроме того, можно показать, что при соблюдении выведенных выше оптимальных условий дроссели с внутренней обратной связью допускают несколько (около 10%) большую плотность тока δ при одинаковых перегревах обмоток.

Произведенные таким образом вычисления показали, что схемы с внутренней обратной связью значительно экономичнее, чем с внешней. Так, при одинаковых условиях получения для задачи на минимальный габарит (оптимальные значения $\beta = 3,2$ и 1,9), что схемы с внутренней обратной связью обеспечивают примерно в 1,4 раза меньший габарит,

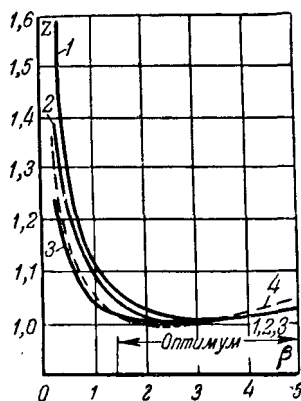


Рис. 3. Экономические показатели в зависимости от β (в относительных единицах).

1—габарит; 2—вес; 3—стоимость при $k=1,2$ (кривые 1...3 для внутренней обратной связи); 4—габарит для внешней обратной связи.

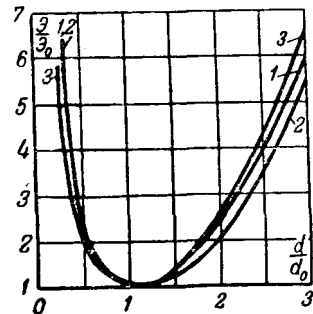


Рис. 4. Экономические показатели в зависимости от диаметра сердечника (в относительных единицах). 1—габарит; 2—вес; 3—стоимость при $k=5$.

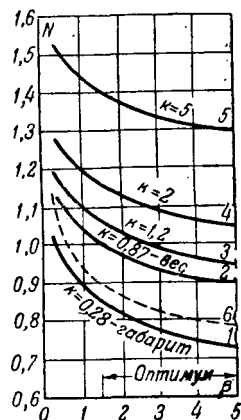


Рис. 5. График для определения коэффициента N .

Кривые соответствуют условиям:

1—минимального габарита; 2—минимального веса; 3—минимальной стоимости при $k=0,28, 0,87, 1,2, 2,5$ (кривые 1...5 для внутренней обратной связи); 6—минимального габарита для внешней обратной связи.

меньший расход стали и меди. Приведенные цифры еще раз говорят о необходимости самого широкого применения внутренней обратной связи в магнитных усилителях.

Наконец, если в (9) раскрыть A по (5) и учесть, что величина UI_d характеризует мощность усилителя P , то можно видеть, что габарит, вес и стоимость усилителя пропорциональны $\sqrt[3]{P/f}$, т. е. растут несколько медленнее, чем мощность, и падают несколько медленнее, чем растет частота питания.

Заметим, что все приведенные выводы имеют общий характер и ограничены единственным и достаточно обоснованным допущением синусоидальности напряжений U при холостом ходе.

Методика расчета. Если для установления общих закономерностей выбор B и U в выражении (5) для A не имел значения, то при расчете конкретного усилителя знание этих величин необходимо для определения $d = N \sqrt{A}$ по (8).

Как уже отмечалось, управляющая обмотка занимает ничтожно малое место и поэтому при проектировании легко удовлетворить заданным значениям ее сопротивления и тока управления. Поэтому в рассматриваемом случае почти всегда может быть обеспечена необходимая н. с. для получения потребного максимального выхода. Если пренебречь вторичными факторами, то для этого достаточно лишь иметь напряжение сети $U_c \geq U_n$. Однако практически стремятся работать в линейной зоне управления, не достигая

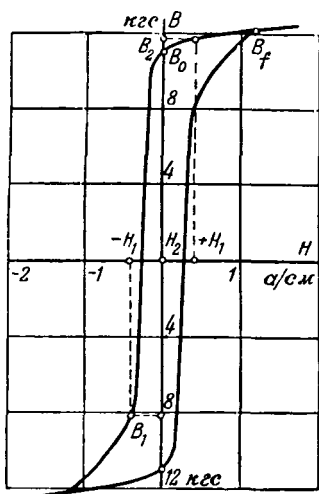


Рис. 6. Петля гистерезиса (сталь Э310).

полного насыщения сердечника. Кроме того, имеют место падения напряжения в выпрямителях и активном сопротивлении обмоток, поэтому $U_c > U_k$. Чем выше требования по линейности, тем сильнее это неравенство. Практически можно положить¹:

$$U_c = 1,2 \dots 1,4 U_k.$$

В режиме холостого хода напряжение на дросселе U практически не отличается от напряжения сети U_c и

$$U = 1,2 \dots 1,4 U_k. \quad (11)$$

Значения B уже установились в практике (они лежат на колене кривой намагничивания).

Таковы приближенные пути выбора B и U . При желании их можно определить строго, для чего необходимо иметь петлю гистерезиса данного материала (рис. 6).

Рассмотрим случай внутренней обратной связи (рис. 1, а), почти не освещенный в отечественной литературе. Предполагается, что сопротивление цепи управления для высших гармоник бесконечно велико, а смещение (начальное подмагничивание) отсутствует.

Известно, что к началу рабочего полупериода магнитное состояние сердечника определяется той или иной точкой на верхней стороне гистерезисной петли [Л. 2]. Положение этой точки зависит от значения н. с. управления. Например, $-H_1$ соответствует индукция B_1 ; $+H_1$ — индукция B_2 ; $H=0$ — индукция B_0 (рис. 6). Управление дросселем осуществляется в основном в зоне отрицательных н. с. Крайнее значение этой н. с. $-H_1$ следует выбирать из соображений желательной линейности характеристики. Другое граничное значение н. с. H_k для двухтактной схемы будет $+H_1$, а для однотактной выбирается из соображений линейности (при хорошей „прямоугольности“ петли гистерезиса H_k близка к нулю). Индукцию, соответствующую H_k , обозначим B_k . После выбора величин H_1

¹ При пассивной нагрузке (двигательная нагрузка требует особого рассмотрения).

и H_k и соответственно B_1 и B_k легко определить B и $U = U_c$.

Воспользуемся методом „анализа по углу зажигания“ [Л. 2].

Для режима холостого хода имеем:

$$U_x = U \left(1 - \frac{B_1 + B_f}{2B} \right),$$

для режима максимального выхода

$$U_k = U \left(1 - \frac{B_f - B_k}{2B} \right),$$

где B_f — так называемая „индукция зажигания“. Для B_f следует принять то значение индукции, при котором прямая и обратная ветви гистерезисной петли вплотную сближаются (рис. 6).

Решая эти уравнения совместно, получим:

$$B = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_1 + B_f - (B_f - B_k) \frac{U_x}{U_k}}{1 - \frac{U_x}{U_k}} \approx \frac{1}{2} \frac{B_1 + B_f}{1 - \frac{U_x}{U_k}}; \quad (12)$$

$$U = U_k \frac{B_1 + B_f - (B_f - B_k) \frac{U_x}{U_k}}{B_1 + B_k} \approx U_k \frac{B_1 + B_f}{B_1 + B_k}.$$

Для двухтактных схем следует в (12) принять $\frac{U_x}{U_k} = 0$.

Учитывая падение напряжения в силовой цепи, практически можно положить:

$$U \approx 1,1 \frac{B_1 + B_f}{B_1 + B_k} \cdot U_k. \quad (13)$$

Для схем с выходом на постоянном токе, где U_k — среднее значение, U должно быть увеличено еще в $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$ раза. Выражения

(12) и (13) позволяют легко найти U и B .

Изложенные положения определяют методику рационального расчета усилителей с обратной связью на заданную мощность.

1. Выбирается или рассчитывается по (12) индукция B . По (11) или (13) определяется расчетное напряжение дросселя U . Разумеется, для двухтактных схем найденное значение U следует удвоить.

2. По (10) определяется ток дросселя I_d . При выходе на постоянном токе I_d увеличивается в 1,11 раза.

3. По (5) вычисляется A .

4. Из каких-либо соображений выбирается значение β в диапазоне $1,0 \dots 5$ и по (8а) или по графикам рис. 5 определяется для заданных требований коэффициент N .

5. По (8) находится d , по (3) ω , по (4) D .

6. Подсчитывается высота сердечника $h = \beta \frac{D-d}{2}$.

7. Определяется

$$\omega_y = \frac{1}{I_y} \left[\pi \frac{D+d}{2} H_1 + 0,25 I_{ок} \left(\frac{U_o}{U_{ок}} \right)^3 \omega \right],$$

где I_y — допускаемый ток управления, а;

$I_{ок}$ — обратный ток вентиля при номинальном амплитудном напряжении, а;

U_o и $U_{ок}$ — фактическое и номинальное обратные напряжения на вентиль.

В выражении для ω_y первый член учитывает основную н. с., второй, как это можно показать, учитывает приближенно н. с. для компенсации влияния обратных токов применительно к отечественным типам селеновых выпрямителей.

Этим расчет усилителя заканчивается. Он прост и осуществляется сравнительно быстро. Методика полностью применима и для случаев индуктивной или двигательной нагрузки на выходе усилителя, но I_∂ и U в (5) должны быть вычислены при этом с учетом соответствующих условий (см. например, [Л. 3]).

Полученные аналитические соотношения и методика расчета проверены на опыте. Изготовленные усилители обеспечивали выходную мощность нагрузки с точностью до $5 \dots 10\%$ от номинальной.

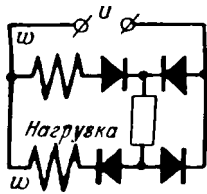


Рис. 7. Схема усилителя к примеру.

Приложение. Пример. Требуется рассчитать на минимальный вес одноконтурный усилитель с внутренней обратной связью по схеме рис. 7 (выход на постоянном токе). Материал — сталь Э310, характеристика которой дана на рис. 6. $B_f = 12\,300$ гс. Задано также: $f = 400$ гц, $P_k = 150$ вт, $U_k = 60$ в, $I_k = 2,5$ а, $U_x = 3$ в, $I_y = 50$ ма, $\delta = 3$ а/мм². Принимаем $k_3 = 0,25$, $k_c = 0,9$, удельный вес стали 7,8, меди 9,0. Тогда

для задачи на минимум веса $k = \frac{7,8}{9} = 0,87$.

Назначаем $\beta = 1,5$ и по рис. 5 находим $N = 1$. Для каждого плеча схемы берем селеновый выпрямитель ТВС-40, содержащий три элемента, соединенных в параллель, и три последовательно. $U_{ок} = 108$ в, $I_{ок} = 4 \cdot 17,5 = 70$ ма.

Для достижения хорошей линейности выберем диапазон изменения управляющей н. с. от $H_1 = -0,4$ а/см до $H_k = 0$ (рис. 6). Соответственно $B_1 = 8\,200$ гс, $B_k = 11\,200$ гс.

По изложенной методике находим:

$$B = \frac{1}{2} \cdot \frac{8\,200 + 12\,300 - \frac{3}{60} (12\,300 - 11\,200)}{1 - \frac{3}{60}} = 10\,750 \text{ гс};$$

$$U_c = U = 1,11 \cdot 1,1 \cdot \frac{8\,200 + 12\,300}{8\,200 + 11\,200} = 78 \text{ в};$$

$$I_\partial = 1,11 \cdot \frac{2,5}{\sqrt{2}} = 1,97 \text{ а};$$

$$A = \sqrt{\frac{V \cdot 2 \cdot 8 \cdot 78 \cdot 1,97 \cdot 10^6}{0,25 \cdot 0,9 \cdot 3 \pi^2 \cdot 400 \cdot 10\,750}} = 7,8 \text{ см}^2;$$

$$d = 1 \sqrt{7,8} = 2,8 \text{ см};$$

$$\omega = 0,25 \cdot \frac{\pi \cdot 3 \cdot 2,8^2}{4 \cdot 1,97} \cdot 10^2 = 233;$$

$$q = \frac{1}{3} \cdot 1,11 \cdot \frac{2,5}{\sqrt{2}} = 0,655 \text{ мм}^2;$$

$$D' = 2,8 + \frac{7,8}{2,8 \sqrt{1,5}} = 5,08 \text{ см}; \quad b' = \frac{5,08 - 2,8}{2} = 1,14 \text{ см};$$

$$h' = 1,5 \cdot \frac{5,08 - 2,8}{2} = 1,71 \text{ см}.$$

В сортаменте стали Э310 есть лента шириной 2,0 см. Поэтому принимаем $h = 2,0$ см и пересчитываем:

$$b = b' \cdot \frac{h'}{h} = 1,14 \cdot \frac{1,71}{2} = 0,98 \text{ см}; \quad D = 2,8 + 1,96 = 4,76 \text{ см}.$$

В заключение определим число витков обмотки управления:

$$\omega_y = \frac{1}{0,05} \cdot \left[\pi \frac{4,76 + 2,8}{2} \cdot 0,4 + 0,25 \cdot 0,07 \left(\frac{78}{108} \right)^3 233 \right] = 118 \text{ витков}.$$

Литература

1. И. Л. Каганов. Электронные и ионные преобразователи. Госэнергоиздат, 1950.
2. W. J. Dornhoefer. Самонасыщение в магнитных усилителях. Тр. AIEE, т. 68, ч. II, стр. 835, 1949.
3. Р. Х. Бальян. Двухтактный магнитный усилитель с выходом на постоянном токе. Автоматика и телемеханика, № 2, 1956.

[5.3.1956]

Расчет опасности электрокоррозии подземных металлических сооружений

Инж. Л. Д. РАЗУМОВ

Центральный научно-исследовательский институт связи

При проектировании средств защиты очень важно иметь предварительную, хотя бы ориентировочную, оценку опасности коррозии. Это помогло бы найти верное и экономичное решение.

Путем расчета можно приблизительно определить такое расстояние между источником блуждающих токов и подземным сооружением, при котором последнее не будет подвергаться электрокоррозии или же опасность ее будет минимальна. Приблизительное определение такого «критического» расстояния даст возможность запроектировать прокладку трубопровода или кабеля в зоне минимального действия блуждающих токов и тем

самым значительно снизить опасность электрокоррозии.

Как известно, основным показателем, определяющим опасность электрокоррозии, является поверхностная плотность тока, стекающего в землю с единицы поверхности подземного сооружения в анодной зоне (подземное сооружение положительно относительно окружающей среды). Таким образом, задача определения опасности электрокоррозии расчетным путем сводится к тому, чтобы по заданному взаимному расположению источника блуждающих токов и подземного сооружения рассчитать поверхностную плотность

тока утечки с оболочки кабеля или трубопровода. Для этого, конечно, необходимо знать основные параметры как источника, так и подземного сооружения, условия прокладки, а также удельное сопротивление земли.

Точное математическое решение этой задачи для любого случая взаимного расположения источника блуждающих токов и подземного сооружения чрезвычайно сложно. В настоящее время она решена [Л. 2, 3, 4, 5] лишь для некоторых частных случаев, например для случая расположения одного или двух кабелей связи (трубопроводов) в зоне влияния одного источника блуждающих токов (одиночной рельсовой линии трамвая, электрифицированной железной дороги, питаемой от одной или двух тяговых подстанций, рабочего заземлителя линии электропередачи постоянного тока, работающей по системе провод — земля, и т. п.).

Трудность точного определения опасности электрокоррозии даже для простейших случаев усугубляется еще тем, что целый ряд параметров, входящих в расчетные формулы, не поддается точному учету. К таким параметрам, в первую очередь, следует отнести: удельное сопротивление земли и переходное сопротивление между подземным сооружением и землей. Эти параметры чрезвычайно изменчивы, и допускаемое в приведенных ниже формулах предположение, что они постоянны и не зависят от координат рассматриваемой точки, крайне неточно. Поэтому приводимые ниже формулы следует рассматривать лишь как первое приближение.

В этих формулах предполагается, что земля имеет совершенно однородное строение с одинаковым удельным сопротивлением ρ , что параметры оболочки кабеля или трубопровода и рельсов (продольное сопротивление и переходное сопротивление по отношению к земле) не зависят от их длины (длина подземного сооружения значительно больше расстояния между ним и источником блуждающих токов). Принимается также, что в месте контакта подземного сооружения с землей не возникает никаких электродвижущих сил поляризации.

В общем случае предполагается, что подземное сооружение имеет тонкий изолирующий слой и что поэтому общее переходное сопротивление между подземным сооружением и удаленной точкой земли может быть представлено в виде суммы сопротивления изолирующего слоя и сопротивления растеканию токов с подземного сооружения как с протяженного заземлителя. Для подземного сооружения, имеющего непосредственный контакт с землей (изолирующий слой отсутствует), расчет ведется по тем же формулам, но в выражении переходного сопротивления учитывается только сопротивление растеканию.

Формулы справедливы и для двух кабелей или трубопроводов, проложенных параллельно в непосредственной близости друг от друга и электрически соединенных между собой. В этом случае два кабеля или два трубопровода заменяются одним с эквивалентным продольным сопротивле-

нием и эквивалентным переходным сопротивлением по отношению к земле.

Сближение подземного сооружения с электрифицированной железной дорогой. На рис. 1 показан случай параллельного сближения бесконечно длинного подземного сооружения с бесконечно длинной электрифицированной железной дорогой, питание контактной сети которой осуществляется параллельно.

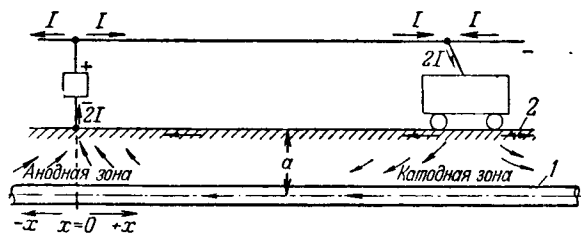


Рис. 1. Размещение анодной и катодной зоны на подземном сооружении при параллельном сближении с электрифицированной железной дорогой.

1 — подземное сооружение; 2 — полотно железной дороги.

Линейная плотность тока (a/m) утечки с подземного сооружения в анодной зоне на расстоянии x от тяговой подстанции может быть определена по формуле:

$$J'(x) = \frac{I\Gamma_p^2 \rho}{\pi(\Gamma_p^2 - \Gamma_n^2) R_{0n}(1-\mu)} [\gamma_n \Omega(\gamma_n x, \gamma_n a) - \gamma_p \Omega(\gamma_p x, \gamma_p a)], \quad (1)$$

где I — ток нагрузки контактной сети (в одну сторону от тяговой подстанции), a , γ_p и γ_n — приведенные значения постоянных распространения тока в рельсах и подземном сооружении, $\frac{1}{m}$;

a — расстояние между подземным сооружением и полотном электрифицированной железной дороги, m ;

R_{0n} — переходное сопротивление между подземным сооружением и землей, $ом \cdot м$.

Функции $\Omega(\gamma_p x, \gamma_p a)$ и $\Omega(\gamma_n x, \gamma_n a)$ в общем виде определяются по формулам [Л. 2]:

$$\Omega(u, v) = \frac{1}{2} [e^{-u} \Phi(u, v) + e^u \Phi(-u, v)];$$

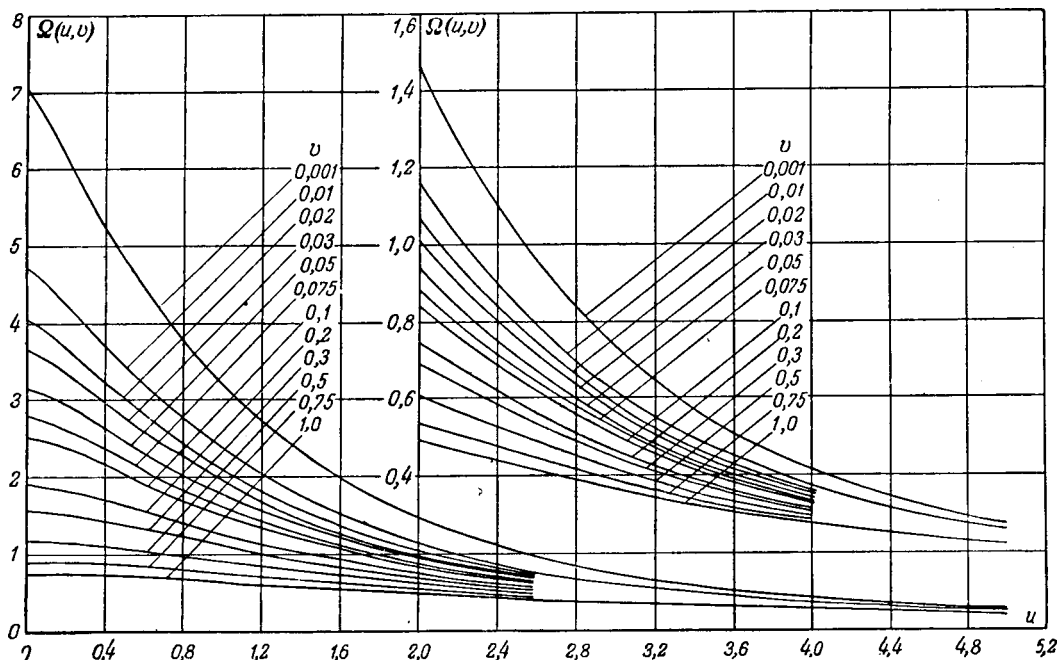
$$\Phi(u, v) = \int_{-u}^{\infty} \frac{e^{-\tau} d\tau}{v^2 + \tau^2}$$

Значения функций $\Omega(u, v)$ приведены на рис. 2. Подробные таблицы функции $\psi = 2\Omega$ имеются в [Л. 9].

Приведенные значения постоянных распространения:

$$\gamma_p = \sqrt{\frac{\Gamma_p^2 + \Gamma_n^2}{2(1-\mu)}} \left[1 \pm \sqrt{1 - (1-\mu) \left(\frac{2\Gamma_p \Gamma_n}{\Gamma_p^2 + \Gamma_n^2} \right)^2} \right];$$

$$\gamma_n = \sqrt{\frac{\Gamma_p^2 + \Gamma_n^2}{2(1-\mu)}} \left[1 \pm \sqrt{1 - (1-\mu) \left(\frac{2\Gamma_p \Gamma_n}{\Gamma_p^2 + \Gamma_n^2} \right)^2} \right],$$

Рис. 2. Функция $Q(u, v)$.

где

$$\mu = \frac{R_{0pn}^2}{R_{0p} R_{0n}}; \quad R_{0pn} = \frac{\rho}{\pi} K_0(\sqrt{\Gamma_p \Gamma_n} a),$$

Γ_p и Γ_n — постоянные распространения тока в рельсах и в подземном сооружении, $\frac{1}{m}$:

$$\Gamma_p = \sqrt{\frac{R_p}{R_{0p}}}; \quad \Gamma_n = \sqrt{\frac{R_n}{R_{0n}}};$$

R_p и R_n — продольные сопротивления постоянному току рельсов и подземного сооружения, $\text{ом} \cdot \text{м}$;

R_{0p} — переходное сопротивление между рельсами и землей, $\text{ом} \cdot \text{м}$.

В выражениях для приведенных постоянных распространения перед внутренними корнями при $\Gamma_n > \Gamma_p$ берутся верхние знаки, а при $\Gamma_n < \Gamma_p$ берутся нижние знаки.

При $\mu \ll 1$ $\gamma_p = \Gamma_p$; $\gamma_n = \Gamma_n$.

Плотность тока, втекающего в подземное сооружение в катодной зоне, т. е. в точках, расположенных при указанной на рис. 1 полярности включения контактной сети вблизи электровоза, может быть определена также по формуле (1) с той лишь разницей, что ток I берется с обратным знаком. Функция $J'(x)$ является четной относительно x .

В формуле (1) предполагается, что электровоз находится в бесконечности. Чтобы учесть конечное расстояние между подстанцией и электровозом, можно, подсчитав искомую величину отдельно от подстанции и отдельно от электровоза, а затем воспользовавшись принципом суперпозиции, сложить полученные величины с учетом их знака.

Если l — расстояние между подстанцией и электровозом, то результирующий ток утечки (a/m):

$$J'_p = J'(x) - J'(l - x). \quad (2)$$

При пересечении подземного сооружения и электрифицированной железной дороги под прямым углом (рис. 3) плотность тока (a/m), втекающего в подземное сооружение на расстоянии y от места пересечения в случае присоединения контактного провода к положительному полюсу подстанции или стекающего в случае присоединения к полюсу обратной полярности, определяется по формуле:

$$J'(y) = -\frac{I_p \Gamma_p}{2\pi R_{0n}} \{e^{\Gamma_n y} Ei(-\Gamma_n r) + e^{-\Gamma_n y} Ei(\Gamma_n r)\}, \quad (3)$$

где

$$r = \sqrt{y^2 + h^2}, \text{ м.}$$

Значения экспоненциальной интегральной функции $Ei(\Gamma_n r)$ и $Ei(-\Gamma_n r)$ приведены в книге Е. Янке и Ф. Эмде [Л. 6, стр. 102—104]. Формула (3) справедлива при $|\Gamma_n y| \ll 1$.

Переходное сопротивление R_{0p} или R_{0n} в общем случае, как было указано выше, скла-

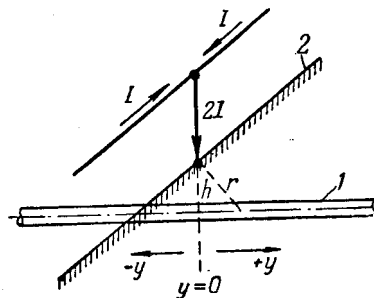


Рис. 3. Пересечение подземного сооружения и электрифицированной железной дороги под прямым углом.

1 — подземное сооружение; 2 — полотно железной дороги.

дывается из сопротивления изолирующего слоя (балластного слоя на рельсах, внешнего джутового покрытия на кабеле и т. п.) и сопротивления растеканию токов в землю с рельсов или подземного сооружения, как протяженного заземлителя [Л. 2]:

$$R_{0p} = R_{из.p} + \frac{\rho}{\pi} K_0(r_{э.p} \Gamma_p) \text{ ом} \cdot \text{м}, \quad (4)$$

$$R_{0n} = R_{из.n} + \frac{\rho}{\pi} K_0(r_{э.n} \Gamma_n) \text{ ом} \cdot \text{м}, \quad (5)$$

где $R_{из.p}$ и $R_{из.n}$ — сопротивления изолирующего (балластного) слоя на рельсах и подземном сооружении, ом·м;
 $K_0(r_{э.p} \Gamma_p)$ и $K_0(r_{э.n} \Gamma_n)$ — видоизмененные функции Бесселя второго рода и нулевого порядка (при значениях аргумента, меньших 0,1, $K_0(u) = \ln \frac{1,12}{u}$);

$r_{э.p}$ и $r_{э.n}$ — эквивалентные радиусы рельсового пути и подземного сооружения, м.

Если шпалы рассматривать как электроды, с которых ток стекает в землю, то рельсовый путь можно представить в виде сплошной полосы, ширина которой равна ширине верхнего строения пути железной дороги. Эквивалентный радиус (м) такой пластины [Л. 7] равен $1/4$ ее ширины, т. е.

$$r_{э.p} = \frac{1}{4} b,$$

где b — ширина верхнего строения железнодорожного пути.

Следует отметить, что очень точного определения этого радиуса не требуется, так как величина его входит в качестве аргумента в функцию Бесселя K_0 . Зависимость же этой функции от аргумента при малых его значениях почти логарифмическая.

Эквивалентный радиус подземного сооружения (м)

$$r_{э.n} = \sqrt{r_n \sqrt{r_n^2 + (2h)^2}}.$$

Обычно $r_n^2 \ll (2h)^2$, поэтому, пренебрегая величиной r_n^2 , получим:

$$r_{э.n} = \sqrt{2r_n h},$$

где r_n — внешний радиус подземного сооружения (трубопровода, свинцовой оболочки или брони кабеля), м;

h — глубина заделки подземного сооружения, м.

При $h=0$ эквивалентный радиус $r_{э.n} = r_n$.

Сопротивление внешнего изолирующего покрова на кабелях связи с течением времени быстро снижается. Поэтому в проектных рас-

четах величиной $R_{из.n}$ можно пренебречь, а переходное сопротивление между оболочкой (броней) кабеля и землей определять по формуле:

$$R_{cn} = \frac{\rho}{\pi} K_0(r_{э.n} \Gamma_n) \text{ ом} \cdot \text{м}. \quad (6)$$

Если параллельно на небольшом расстоянии друг от друга прокладываются два подземных сооружения (кабеля или трубопровода), то в первом приближении они могут быть заменены одним сооружением, параметры которого определяются по следующим формулам:

$$R_{n(1-2)} = \frac{R_{n1} R_{n2}}{R_{n1} + R_{n2}}; \quad (7)$$

$$R_{0n(1-2)} = \frac{R_{0n1} R_{0n2} - R_{0n12} R_{0n21}}{R_{0n1} + R_{0n2} - R_{0n12} - R_{0n21}}; \quad (8)$$

$$\Gamma_{n(1-2)} = \sqrt{\frac{R_{n(1-2)}}{R_{0n(1-2)}}}, \quad (9)$$

где

$$R_{0n12} = \frac{\rho}{\pi} K_0 \left(\sqrt{\Gamma_{n1} \Gamma_{n2}} \sqrt{(a_{12}^2 + r_{n2}^2)(a_{12}^2 + 4h^2)} \right); \quad (10)$$

$$R_{0n21} = \frac{\rho}{\pi} K_0 \left(\sqrt{\Gamma_{n1} \Gamma_{n2}} \sqrt{(a_{12}^2 + r_{n1}^2)(a_{12}^2 + 4h^2)} \right), \quad (11)$$

a_{12} — расстояние между подземными сооружениями;

R_{0n1} и R_{0n2} определяются по формуле (6).

Так как обычно r_{n1}^2 и r_{n2}^2 значительно меньше a_{12}^2 , то

$$\begin{aligned} R_{0n12} &= R_{0n21} = \\ &= \frac{\rho}{\pi} K_0 \left(\sqrt{\Gamma_{n1} \Gamma_{n2}} \sqrt{a_{12}^2 (a_{12}^2 + 4h^2)} \right). \end{aligned}$$

Эти формулы справедливы для двух подземных сооружений одинакового диаметра, расположенных на одинаковой глубине.

Уравнения (4), (5) и (6) легче всего решать графическим способом, для чего строится зависимость правой части каждого из уравнений от R_{0p} или R_{0n} . Абсцисса точки пересечения кривой с прямой линией, проведенной из начала координат под углом 45° , равна искомой величине.

В случае параллельного сближения, как показывает расчет, максимальная плотность тока утечки с подземного сооружения имеет место в точке $x=0$, расположенной против отсасывающего фидера тяговой подстанции, если контактный провод присоединен к положительному полюсу тяговой подстанции, или в точке, расположенной против электроваза, если контактный провод присоединен к отрицательному полюсу тяговой подстанции. Следовательно, расчет для определения максимально возможной плотности тока утечки следует производить при $x=0$.

Поверхностная плотность тока утечки ($a/\text{дм}^2$)

$$J = \frac{J'}{S'}, \quad (12)$$

где J' — линейная плотность тока утечки, $a/\text{м}$;
 S' — поверхность утечки (дм^2) одного метра длины подземного сооружения.

Пользуясь приведенными выше формулами, можно для данной проводимости земли рассчитать кривую зависимости поверхностной плотности тока утечки от расстояния между подземным сооружением и электрифицированной железной дорогой. Из этой кривой легко определить такое «критическое» расстояние, при котором величина поверхностной плотности тока утечки с брони кабеля или трубопровода будет меньше допустимой ($0,15 \text{ ма}/\text{дм}^2$ для кабеля и $0,75 \text{ ма}/\text{дм}^2$ для трубопровода).

Ввиду приближенности расчета действительная плотность тока утечки может оказаться больше или меньше рассчитанной. Однако очевидно, что при прокладке подземного сооружения на «критическом» расстоянии от электрифицированной железной дороги интенсивность процессов электрокоррозии будет значительно ослаблена.

Указанные в «Правилах» [Л. 1] допустимые значения плотности тока утечки являются не максимальными, а среднесуточными (максимальные допускаемые величины могут быть несколько больше $0,15$ или $0,75 \text{ ма}/\text{дм}^2$). Поэтому в случае присоединения контактного провода к положительной шине подстанции, когда максимальная плотность тока утечки имеет место против подстанции, для определения среднесуточной величины поверхностной плотности тока утечки в формулу (1) надо подставлять среднесуточное значение тока нагрузки тяговой подстанции на данном плече питания.

Определяя плотность тока утечки по формуле (1) вышеуказанным способом, мы несколько завышаем результат, так как не учитываем конечное расстояние между подстанцией и электровозом. Как показывает расчет, это расстояние следует учитывать при его увеличении до $3 \dots 5 \text{ км}$ в зависимости от удельного сопротивления земли. При дальнейшем увеличении этого расстояния распределение блуждающих токов практически будет таким, какое было бы при бесконечно большом расстоянии между подстанцией и электровозом. Поэтому получающаяся неточность, учитывая общую приближенность расчетов, вполне допустима.

В случае присоединения контактного провода к отрицательной шине подстанции, когда максимальная плотность тока утечки имеет место против электровоза, среднесуточное значение плотности тока утечки надо определять с учетом скорости и графика движения поездов. Средняя величина тока нагрузки одного электровоза составляет примерно 1000 а .

Расчет опасности электрокоррозии ни в коем случае не освобождает от необходимости производить измерения на проложенном подземном сооружении. Проведение таких измерений для

уточнения мероприятий по защите подземного сооружения от коррозии обязательно.

Сближение подземного сооружения с линией электропередачи постоянного тока. Как известно, система «провод — земля» является одной из возможных систем передачи электроэнергии постоянным током (рис. 4). В этом случае весь рабочий ток линии электропередачи будет протекать по земле и создавать серьезную опасность коррозии для подземных металлических сооружений. Анодная зона будет возникать вблизи заземленного отрицательного полюса линии. Вблизи заземленного положительного полюса на оболочке кабеля возникает катодная зона.

По такой же схеме может осуществляться дистанционное питание усилительных пунктов на кабельных магистралях связи.

Линейная плотность тока утечки с подземного сооружения в анодной зоне определяется по формуле [Л. 2]:

$$J'(x) = \frac{I\rho}{2\pi R_{0n}} \times \left[\Gamma_n \Omega(\Gamma_n x, \Gamma_n a) - \frac{1}{\sqrt{x^2 + a^2}} \right], \quad (13)$$

где I — ток, поступающий в заземлитель, а ;
 ρ — удельное сопротивление земли, $\text{ом} \cdot \text{м}$;
 R_{0n} — переходное сопротивление между подземным сооружением и землей, $\text{ом} \cdot \text{м}$;
 a — кратчайшее расстояние от подземного сооружения до заземлителя, м ;
 Γ_n и $\Omega(\Gamma_n x, \Gamma_n a)$ — то же, что в формуле (1).

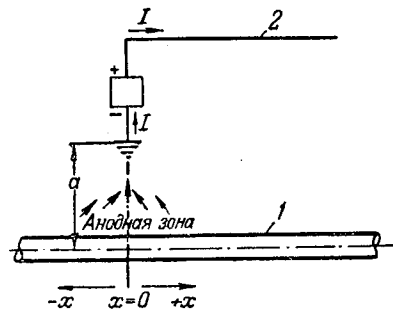
Пользуясь формулами (13) и (12), можно рассчитать величину поверхностной плотности тока утечки с подземного сооружения и определить «критическое» расстояние для заданных условий. Функция $J'(x)$ является четной относительно x .

Величина плотности тока, втекающего в подземное сооружение вблизи заземленного положительного полюса линии электропередачи (катодная зона), определяется также по формуле (13) с той разницей, что ток I подставляется в нее с обратным знаком.

В формуле (13) предполагается, что второй заземленный конец линии электропередачи находится в бесконечности. Конечное расстояние между заземленными полюсами линии учитывается так же, как расстояние между подстанцией и электровозом. Если l — расстояние между полюсами, то результирующая плотность тока утечки определяется по формуле (2).

Влияние катодной защиты подземных сооружений на смежные незащищенные подземные

Рис. 4. Размещение анодной зоны на оболочке кабеля при сближении его с линией электропередачи постоянного тока, работающей по системе «провод — земля».



1 — подземное сооружение;
2 — линия электропередачи.

сооружения. На практике встречаются случаи, когда одно подземное сооружение прокладывается вблизи другого, защищенного от коррозии катодными установками. Например, междугородный кабель связи прокладывается параллельно защищенному катодными установками трубопроводу (рис. 5).

Как показывают измерения [Л. 8], в этом случае на оболочке кабеля возникают катодные и анодные зоны, причем результирующий потенциал оболочки кабеля создается в результате суммарного действия трубопровода, соединенного с отрицательным полюсом источника тока, и рабочего заземлителя катодной установки, соединенного с положительным полюсом источника тока.

Трубопровод создает на оболочке кабеля анодную зону вблизи места включения источника тока катодной установки и катодные зоны на некотором расстоянии от него. Действие трубопровода на кабель в данном случае аналогично действию рельсовой линии, соединенной с отрицательным полюсом подстанции.

Заземлитель катодной установки создает вблизи места включения источника тока катодную зону, а на некотором расстоянии от него анодные зоны. Действие заземлителя на кабель аналогично действию заземленного положительного полюса линии электропередачи постоянного тока.

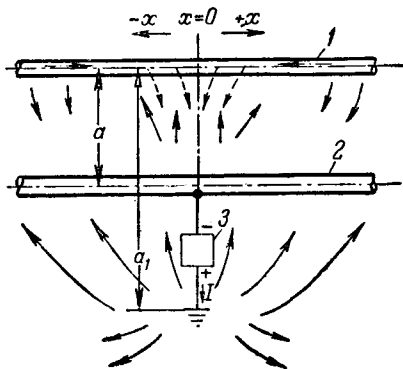
Результирующее размещение анодных и катодных зон определяется расстоянием рабочего заземлителя катодной установки от кабеля. Чем дальше находится заземлитель от кабеля, тем ближе к месту включения источника тока располагаются анодные зоны.

Таким образом, мы имеем здесь наложение двух рассмотренных выше случаев. Следовательно, результирующая линейная плотность тока утечки с незащищенного подземного сооружения

$$J(x) = \frac{I\rho}{2\pi R_{0\text{нк}}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{x_1^2 + a_1^2}} - \Gamma_{\text{нк}} \Omega(\Gamma_{\text{нк}} x_1, \Gamma_{\text{нк}} a_1) - \frac{\Gamma_{\text{пз}}^2}{(1-\mu)(\Gamma_{\text{пз}}^2 - \Gamma_{\text{нк}}^2)} \left[\gamma_{\text{пз}} \Omega(\gamma_{\text{пз}} x, \gamma_{\text{пз}} a) - \gamma_{\text{нк}} \Omega(\gamma_{\text{нк}} x, \gamma_{\text{нк}} a) \right] \right\}, \quad (14)$$

где I — ток катодной установки, a ; $\Gamma_{\text{нк}}$ и $\Gamma_{\text{пз}}$ — постоянные распространения незащищенного и защищенного подземных сооружений, $1/\text{м}$;

Рис. 5. Распределение токов утечки с оболочки кабеля 1 при сближении его с трубопроводом 2, защищенным катодными установками 3. Сплошными стрелками показаны утекающие и притекающие токи, обусловленные действием заземлителя катодной установки, а пунктирными — токи утечки с оболочки кабеля, обусловленные действием трубопровода.



$\gamma_{\text{нк}}$ и $\gamma_{\text{пз}}$ — приведенные постоянные распространения незащищенного и защищенного подземных сооружений, $1/\text{м}$;

$R_{0\text{нк}}$ — переходное сопротивление между незащищенным подземным сооружением и землей, $\text{ом} \cdot \text{м}$;

a_1 — расстояние от незащищенного подземного сооружения до заземлителя катодной установки, м ;

a — расстояние между незащищенным и защищенным подземными сооружениями, м ;

x_1 — расстояние по оси x от рассматриваемой точки на незащищенном подземном сооружении до заземлителя катодной установки, м .

При сближении защищенного и незащищенного подземных сооружений наиболее целесообразной защитой является устройство металлических перемычек между сооружениями в местах с наибольшей плотностью тока утечки.

В заключение приведем пример расчета токов утечки с оболочки кабеля при сближении с трубопроводом, защищенным катодными установками.

Пример. Вдоль трубопровода, защищенного катодными установками, проложено два междугородных кабеля (двухкабельная система). Продольное сопротивление оболочки и брони одного кабеля равно $0,81 \cdot 10^{-3} \text{ ом}/\text{м}$. Внешний диаметр брони 45 мм. Глубина заковки кабелей 0,7 м. Расстояние между кабелями 15 см. Расстояние между трубопроводом и кабелем 100 м. Схема взаимного расположения трубопровода, кабеля и рабочего заземлителя катодной установки показана на рис. 5. Трубопровод с внешним диаметром 377 мм и толщиной стенки 11 мм имеет продольное сопротивление $1 \cdot 10^{-5} \text{ ом}/\text{м}$. Глубина заковки трубопровода 2 м. Катодные установки размещены друг от друга на расстоянии 10...20 км. Установленный ток катодной станции 25 а. Расстояние от трубопровода до рабочего заземлителя катодной установки 50 м. Переходное сопротивление между трубопроводом и землей 200 $\text{ом} \cdot \text{м}$.

Удельное сопротивление земли в районе прокладки трубопровода и кабеля $\rho = 100 \text{ ом} \cdot \text{м}$.

Требуется определить токи утечки с оболочек кабелей. Считая, что кабели находятся в непосредственном контакте с землей, из уравнения (6) найдем, что переходное сопротивление между кабелем и землей $R_{\text{ск}} = 270 \text{ ом} \cdot \text{м}$.

Продольное сопротивление оболочек двух кабелей:

$$R_{\text{к}(1-2)} = \frac{R_{\text{к1}}}{2} = 0,405 \cdot 10^{-3} \text{ ом} \cdot \text{м}.$$

Эквивалентное переходное сопротивление двух кабелей находим из выражений (8)...(10)

$$R_{\text{ск}(1-2)} = 250 \text{ ом} \cdot \text{м}.$$

Затем находим эквивалентную постоянную распространения двух кабелей и постоянную распространения трубопровода.

Линейную плотность тока утечки с оболочек двух кабелей находим по формуле (14). Считая, что ток утечки поровну распределяется между двумя кабелями, по формуле (12) определяем поверхностную плотность тока утечки. Результаты расчета приведены в таблице.

Как видно из таблицы, на оболочках кабелей против каждой катодной установки возникает катодная зона протяженностью около 1000 м. Анодные зоны начинаются на расстоянии около 500 м от точки, находящейся против

Заключительная фаза реостатного торможения

Кандидат техн. наук, доц. В. Е. СКОБЕЛЕВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Электродинамическое реостатное торможение поезда с целью его остановки обычно осуществляется при постоянном значении тормозного тока I_T , что достигается постепенным изменением сопротивления тормозного реостата. Такое регулирование возможно лишь до некоторой скорости v_T , по достижении которой тормозной реостат окажется полностью выведенным, и сопротивление цепи принимает минимальное значение r , определяемое сопротивлением обмоток машин, соединительных проводов и включенных элементов аппаратуры управления.

Для простейшей одномашинной тормозной схемы (схема машины 2, рис. 1) можно составить уравнение

$$v_T = \frac{r I_T}{\left(\frac{e}{v}\right)_T} \text{ [м/сек]}, \quad (1)$$

где $\frac{e}{v}$ — приведенная э. д. с., определяемая по характеристике намагничивания машины для тока возбуждения I_T .

Между приведенной э. д. с. $\frac{e}{v}$ и потоком главных полюсов Φ машины существует следующая зависимость:

$$\frac{e}{v} = \frac{N p \mu}{a \pi D_k} \Phi = c_o \Phi \text{ [в сек/м]}, \quad (2)$$

где N и a — число проводников и число параллельных ветвей обмотки якоря;
 p — число пар полюсов машины;
 μ и D_k — передаточное отношение редуктора и диаметр колеса по кругу катания.

При $v < v_T$ обычная схема реостатного торможения не обеспечивает поддержание тормозного тока неизменным, и он падает с уменьшением скорости v .

Если для этой заключительной фазы реостатного торможения рассчитать по формуле (1) зависимость установившегося тока от скорости $I = f(v)$, то она будет иметь вид кривой I рис. 2. Согласно этой характеристике, при некоторой критической скорости v_k ток падает до ничтожной величины, и тормозной эффект практически исчезает. На этом основании часто делается вывод о невозможности обеспечить полную остановку поезда посредством реостатного тормоза.

Исследования, проведенные автором в лаборатории электрической тяги Ленинградского политехнического института, показали, что в заключительной фазе торможения действительные зависимости $i = f(v)$ для мгновенных значений тока и скорости могут резко отличаться от кривой I рис. 2, и практически оказывается возможным сохранить тормозной эффект до полной остановки.

При проведении опытов со спаренными двигателями ПТ-35а замедляемая масса была незначительной и определялась моментом инерции двух якорей и соединяющей их муфты. Одна из машин 1 работала двигателем, а вторая 2 — генератором в режиме реостатного торможения (рис. 1). После установления выбранного значения тормозного тока I_T (что при данном сопротивлении цепи машины 2 достигалось изменением напряжения на двигателе 1 и, следова-

катодной установки, а максимальный ток утечки — на расстоянии примерно 1000 м.

Полученная картина распределения анодных и катодных зон хорошо согласуется с результатами измерений [Л. 8].

Из данных таблицы также следует, что максимальная поверхностная плотность тока утечки оказалась меньше допустимой величины $0,15 \text{ ма/дм}^2$, т. е. ориентировочно кабели оказались расположенными на расстоянии, превышающем «критическое».

$x, \text{ м}$	$J'(x), \text{ ма/м}$	$J(x), \text{ ма/дм}^2$
0	6,2	0,44
100	4,5	0,32
500	—0,5	—0,035
1000	—0,75	—0,054
1500	—0,52	—0,037

Литература

1. Правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами. Связьиздат, 1940.
2. E. Sunde. Влияние проводимости земли на системы передачи. Нью-Йорк, 1949.
3. R. Gibrat. Новые исследования в области электролиза подземных канализаций. Bull. SFE. Серия 5. т. IV, 1934.
4. Б. Г. Лорткипанидзе. Токораспределение в элементах обратной сети с подземным проводником и определение токов утечки из подземного сооружения. Труды научно-технического совещания по защите трубопроводов и кабелей от коррозии. Госэнергоиздат, 1953.
5. М. И. Михайлов, В. Н. Акуленок и А. Ф. Марченко. Защита междугородных кабелей связи от коррозии. Связьиздат, 1953.
6. Е. Янке и Ф. Эмде. Таблицы функций с формулами и кривыми. Гостехиздат, 1949.
7. Ф. Оллендорф. Токи в земле. ГОНТИ, 1932.
8. В. Н. Акуленок. Влияние катодной защиты кабелей на смежные незащищенные металлические сооружения. Вестник связи, № 10, 1953.
9. Л. Н. Тавдгиридзе. Электрическое поле протяженных проводников с утечкой. Труды Института энергетики АН Грузинской ССР, т. VII, 1953.

[20. 6. 1955]



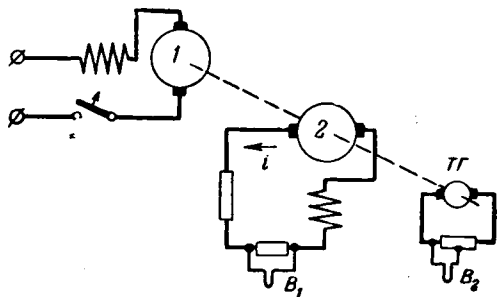


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки с двигателями ПТ-35а.

1—двигатель; 2—генератор; ТГ—тахогенератор; В₁, В₂—вибраторы осциллографа.

тельно, скорости вращения агрегата) разрывалась цепь питания двигателя, и машины быстро замедлялись. При этом осциллографом регистрировались ток и скорость (рис. 3), и по полученным данным находились зависимости $i = f(v)$ для мгновенных значений i и v (рис. 4).

Экспериментально было установлено, что при определенных условиях после полной остановки происходит вращение машин в обратном направлении. Это объясняется тем, что электромагнитная энергия $W_T = \frac{1}{2} \Psi_T I_T$, за счет кото-

рой поддерживается тормозной ток, при определенных условиях может сохранить некоторую свою часть $W_0 = \frac{1}{2} \Psi_0 I_0$ до скорости $v = 0$.

Поскольку тормозной момент машины действует против направления ее вращения, то после остановки машины ток I_0 будет стремиться вызвать ее вращение в обратном направлении, причем энергия W_0 частично перейдет в кинетическую энергию обратного движения и частично в тепло.

Очевидно, что при уменьшении сопротивления тормозной цепи r и сокращении времени торможения (что достигается повышением тормозной силы и снижением тормозимой массы) снижаются электрические потери в цепи, вследствие чего возрастают ток I_0 и энергия W_0 при скорости $v = 0$, что подтверждается опытом.

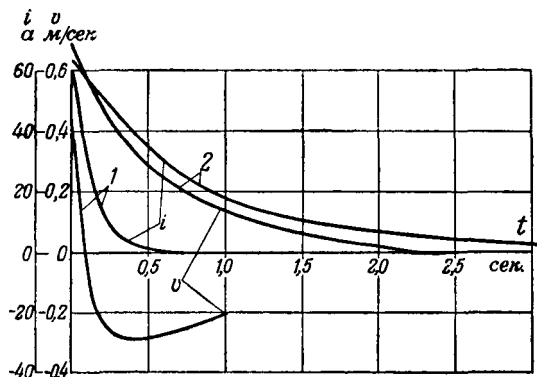


Рис. 3. Осциллограммы токов и скоростей для заключительной фазы торможения.

1—при $r = 0,545 \text{ ом}$, $m = 65 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}$ (двигатель ПТ-35а); 2—при $r = m = 800 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}$ (двигатель У-104^в).

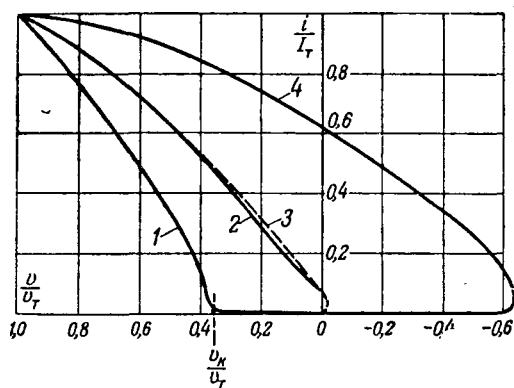


Рис. 2. Зависимости тока от скорости (в относительных единицах) при торможении двигателя ПТ-35а.

1—статическая (расчетная) характеристика; 2, 3 и 4—экспериментальные динамические характеристики.

Дальнейшие эксперименты проводились на маховичной установке, оборудованной четырьмя тяговыми двигателями типа У-104^в. Испытания проводились аналогичным образом, причем две машины работали в двигательном режиме, а две другие—генераторами в общей тормозной схеме. На долю каждой из тормозящих машин приходилась эквивалентная масса поезда около $800 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}$, что близко к реальным условиям работы двигателей этого типа. При этом также можно было наблюдать четкую и быструю остановку машин с сохранением тормозной силы до скорости $v = 0$, если начальный тормозной ток машины $I_T \geq 30 \text{ а}$ (рис. 5).

То обстоятельство, что одновременно с уменьшением скорости происходит и снижение тормозного тока, не является недостатком тормоза, так как для обеспечения плавной остановки необходимо постепенное уменьшение тормозной силы. По этой причине пневматический тормоз обычно частично отпускают перед полной остановкой поезда.

Для практического учета этих явлений при разработке новых и анализе существующих систем реостатного торможения необходимо располагать методикой расчета зависимости $i = f(v)$ для заключительной фазы торможения и уста-

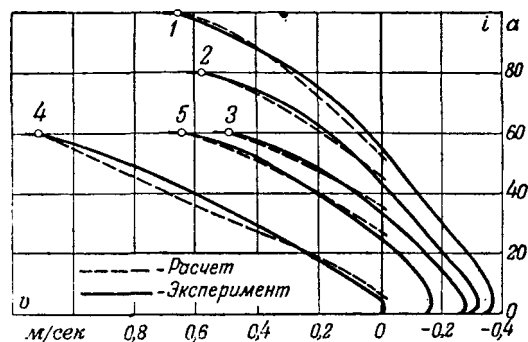


Рис. 4. Зависимости $i = f(v)$ для двигателя ПТ-35а ($m = 65 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}$).

1—при $r = 0,54 \text{ ом}$; 2—при $r = 0,56 \text{ ом}$; 3—при $r = 0,58 \text{ ом}$; 4—при $r = 1,33 \text{ ом}$; 5—при $r = 0,76 \text{ ом}$.

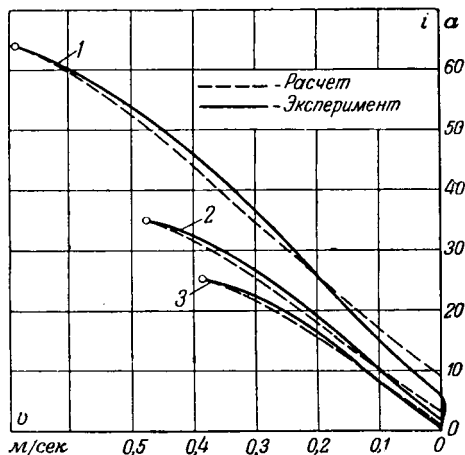


Рис. 5. Зависимости $i = f(v)$ для двигателя У-104^В при замедляемой массе $m = 800 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}$ и $r = 1,25 \text{ ом}$.
1—при $I_T = 64 \text{ а}$; 2—при $I_T = 34,5 \text{ а}$; 3—при $I_T = 25 \text{ а}$.

новить условия, при которых обеспечивается $I_0 \gg 0$.

Аналитическое исследование. Поскольку все тяговые двигатели поезда в режиме реостатного торможения обычно нагружены равномерно, то при исследовании можно ограничиться рассмотрением схемы, включающей только одну тормозящую машину (рис. 1) с приходящейся на нее частью m общей массы поезда.

Обозначим через $F = F_T + B_1$ замедляющую силу, являющуюся суммой тормозного усилия F_T , создаваемого тормозящей машиной на ободе колес, и сопротивления движению B_1 части поезда массой m^* . Тогда

$$-m \frac{dv}{dt} = F. \quad (3)$$

Для тормозной цепи

$$ir + \frac{d\psi}{dt} = e. \quad (4)$$

Вывод аналитической зависимости $i = f(v)$ без введения допущений, заметно искажающих исходные взаимосвязи физических величин и общий конечный результат, не представляется возможным. Однако удовлетворительное решение может быть получено, если предварительно найти зависимость $\Phi = f(v)$, а затем, пользуясь характеристикой намагничивания $\Phi = f(i)$, перейти к зависимости $i = f(v)$.

В рассматриваемой схеме основные потокоцепления создаются главным полем машины Φ с обмоткой ее последовательного возбуждения, имеющей ω витков. Если прочие потокоцепления учесть коэффициентом $k > 1$, т. е. положить $\Psi = k\omega\Phi$, то, принимая во внимание (2), можно записать:

$$ir + k\omega \frac{d\Phi}{dt} = c_0 v \Phi. \quad (5)$$

* Для мотор-вагонного подвижного состава при служебном торможении нормальной интенсивности сила F лишь незначительно (на 3... 5%) превышает силу F_T .

Произведя замену переменной и учитывая (3), получим:

$$\frac{d\Phi}{dv} = \left(\frac{rm}{k\omega} \right) \frac{i}{F} - \left(\frac{c_0 m}{k\omega} \right) v \frac{\Phi}{F}. \quad (6)$$

Исследование характеристик тяговых машин позволяет установить, что для тормозных режимов с достаточным приближением можно полагать (рис. 6):

$$\frac{i}{F} = A, \quad (7)$$

$$\frac{\Phi}{F} = B - D\Phi.$$

Подставляя эти выражения в уравнение (6), получим линейное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\Phi}{dv} - C_3 v \Phi = C_1 - C_2 v, \quad (8)$$

где

$$C_1 = \frac{rmA}{k\omega}; \quad C_2 = \frac{c_0 mB}{k\omega}; \quad C_3 = \frac{c_0 mD}{k\omega}.$$

Общее решение (8):

$$\Phi = e^{-\frac{C_3}{2} v^2} \left[C_1 \int_0^v e^{\frac{C_3}{2} v^2} dv - C_2 \int_0^v v e^{\frac{C_3}{2} v^2} dv + C \right]. \quad (9)$$

Численная величина первого члена полученного выражения может быть легко найдена, если воспользоваться табличными значениями „интеграла вероятности“ [Л. 1]:

$$P(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Очевидно, что

$$\int_0^v e^{-\frac{C_3}{2} v^2} dv = \sqrt{\frac{\pi}{2C_3}} P(x),$$

где $x = v\sqrt{C_3}$.

Следовательно, выражение (9) можно представить в удобном для расчета виде:

$$\Phi = \frac{B}{D} - \left[\frac{B}{D} - C_1 \sqrt{\frac{\pi}{2C_3}} P(v\sqrt{C_3}) - C \right] e^{\frac{C_3}{2} v^2}. \quad (10)$$

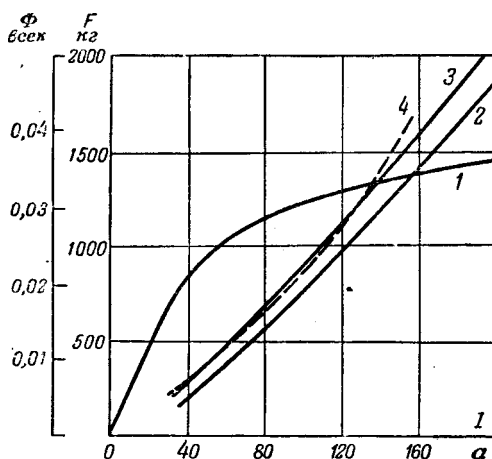


Рис. 6. Характеристики двигателя ДТИ-60.
1—кривая намагничивания; 2—характеристика силы тяги; 3—характеристика замедляющего усилия; 4—аппроксимирующая характеристика.

Поток Φ_0 при $v=0$ численно равен постоянной интегрирования C , определяемой из начальных условий (при $t=0$, $i=I_T$; $v=v_T$ и $\Phi=\Phi_T$) и характеризует интересующее нас значение тока I_0 :

$$\Phi_0 = C = \frac{B}{D} - \left(\frac{B}{D} - \Phi_T \right) e^{-\frac{C_3}{2} v_T^2} - C_1 \sqrt{\frac{\pi}{2C_3}} P(\sqrt{C_3} v_T). \quad (11)$$

Практическое применение полученных выражений к исследованию тормозных процессов в схемах с реальными значениями сопротивлений цепи r и масс поезда m , приходящихся на каждую тормозящую машину, показывают, что

член $\left(\frac{B}{D} - \Phi_T \right) e^{-\frac{C_3}{2} v_T^2}$ относительно мал, а численное значение интеграла вероятности $P(\sqrt{C_3} v_T)$ близко к единице. Это обстоятельство позволяет применять упрощенные выражения:

$$\Phi_0 = C = \frac{B}{D} - C_1 \sqrt{\frac{\pi}{2C_3}} \quad (11a)$$

и

$$\Phi = \frac{B}{D} - C_1 \sqrt{\frac{\pi}{2C_3}} e^{\frac{C_3}{2} v^2} [1 - P(\sqrt{C_3} v)]. \quad (10a)$$

Из (11a) после подстановки значений C_1 и C_3 получим:

$$r^2 m = \alpha \left(\frac{B}{D} - \Phi_0 \right)^2, \quad (12)$$

где $\alpha = \frac{2}{\pi} k \omega c_0 D$.

Из выражения (12) следует, что произведение $r^2 m$ сохраняет постоянное значение при неизменных B , D , A и Φ_0 , т. е. при определенных I_T и I_0 . Отсюда можно заключить, что при экспериментальном исследовании процессов спада тока в заключительной фазе торможения можно производить частичное замещение массы поезда эквивалентным сопротивлением тормозной цепи.

Из сравнения кривой 2 рис. 2, относящейся к случаю малой массы и повышенного сопротивления, с кривой 3 для большой массы и относительно малого сопротивления цепи следует, что не только относительные величины токов I_0 , но и характеры зависимостей $i=f(v)$ в этих случаях получаются близкими. Это может служить подтверждением допустимости указанных эквивалентных замещений.

С другой стороны, выражение (12) наглядно устанавливает связь между остаточным сопротивлением r тормозной цепи и массой m , которая может быть доведена до полной остановки каждой из тормозящих машин. Для определенного типа машины и значений I_T и I_0 эта связь

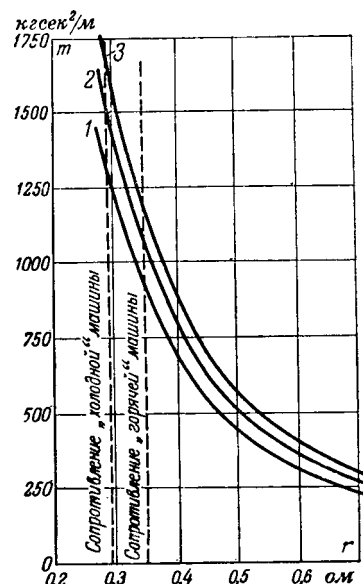


Рис. 7. Зависимость массы поезда, которая может быть доведена до полной остановки одним двигателем ДТИ-60, от сопротивления тормозной цепи.

1—при $I_T = 80$ а; 2—при $I_T = 112$ а; 3—при $I_T = 150$ а.

имеет вид гиперболической кривой 3-го порядка (рис. 7), определяемой уравнением

$$mr^2 = \text{const.}$$

Таким образом, при увеличении сопротивления цепи тягового двигателя в 2 раза при тех же начальных (I_T) и конечных (I_0) токах он сможет остановить лишь в 4 раза меньшую массу поезда. Отсюда видно, насколько важно обеспечить возможно малое остаточное сопротивление тормозной цепи, если предполагается использовать электрическое реостатное торможение для полной остановки поезда.

Путем простых преобразований выражение (12) может быть приведено к следующему виду: $mv^2 = \beta I_T^2$, откуда следует, что кинетическая энергия массы m , которая может быть доведена до полной остановки, зависит от электромагнитной энергии, запасенной в тормозной цепи. Очевидно, что при более интенсивном торможении (больших I_T) имеются большие возможности сохранить тормозной эффект до полной остановки.

С целью проверки разработанного аналитического метода были проведены многочисленные расчеты зависимостей $i=f(v)$ для малых и больших замедляемых масс и различных сопротивлений тормозной цепи.

Сравнение расчетных и экспериментальных кривых рис. 4 и 5 свидетельствует об удовлетворительной сходимости их при самых разнообразных условиях.

Эксперименты на маховичной установке, оборудованной двигателями У-104^в (часовой ток 60 а), показывают, что при $I_0 \geq 5$ а всегда наблюдается быстрая и четкая остановка маховика.

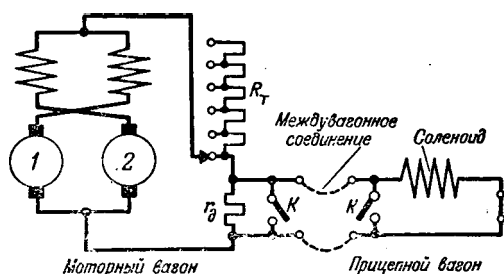


Рис. 8. Схема торможения трамвайного поезда.

Отсюда можно заключить, что для обеспечения полной остановки вагона достаточно соблюсти аналогичное условие:

$$\frac{I_0}{I_{\text{ч}}} \geq 0,08.$$

Аналитическое исследование заключительной фазы торможения двухосного трамвайного вагона собственным весом 12,5 т, оборудованного тяговыми двигателями ДТИ-60 и имеющего схему торможения (рис. 8), которая допускает включение тормозных соленоидов прицепных вагонов, показало, что если сопротивление тормозной цепи определяется только сопротивлением тяговых двигателей¹, то всегда обеспечивается надежная остановка одного моторного вагона как без нагрузки, так и с предельной пассажирской нагрузкой. Значение тока I_0 при этом может достигать 20...25 а (рис. 9), что значительно превышает величину $I_0 \geq 0,08 I_{\text{ч}}$ и, следовательно, должно обеспечить полную остановку.

Если в цепь торможения введено дополнительное сопротивление $r_{\text{д}} = 0,35$ ом, то путем расчета можно установить, что ток I_0 имеет отрицательное значение даже для ненагруженного вагона, что указывает на невозможность сохранить тормозной эффект до полной остановки.

Опыты, проведенные М. М. Граевским с подобным вагоном в трамвайном парке им. Леонова (Ленинград), полностью подтвердили выводы, полученные нами на основе аналитического исследования. При торможении одного моторного вагона (сопротивление $r_{\text{д}}$ закорочено) всегда наблюдается четкая и полная остановка, иногда даже с некоторой тенденцией к откату. При введении дополнительного сопротивления $r_{\text{д}}$ такая остановка не обеспечивается; после исчезновения тормозного эффекта вагон некоторое время „ползет“, и окончательная остановка достигается лишь под действием сил сопротивления движению. Подобное явление имеет место и при торможении поезда из моторного и прицепного вагонов по схеме рис. 8. Следует отметить, что в последнее время благодаря улучшению технического состояния подвижного состава Ленинградского трамвая заметно сни-

¹ Дополнительное сопротивление $r_{\text{д}}$ закорочено контактами К розетки междувагонного соединения.

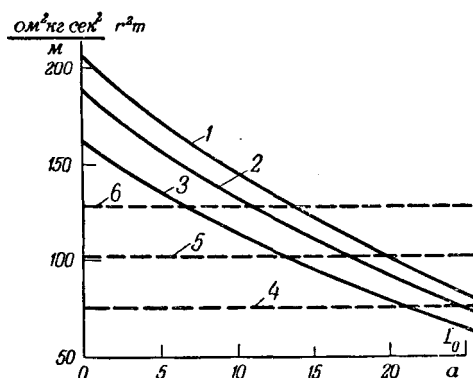


Рис. 9. Зависимости $r^2 m = f(I_0)$ для различных значений начального тормозного тока двигателя ДТИ-60.
1—при $I_T = 150$ а; 2—при $I_T = 112$ а; 3—при $I_T = 80$ а; 4—для вагона весом 12,5 т; 5—для вагона весом 16,5 т; 6—для вагона весом 20,5 т.

зилось сопротивление движению вагонов, вследствие чего явления „ползучести“ стали проявляться в более резкой форме.

Как показывают исследования, причиной быстрого спада тока в нормальной тормозной схеме Ленинградского трамвая является дополнительное сопротивление $r_{\text{д}}$, в котором поглощается значительная часть электромагнитной энергии, запасенной в тормозном контуре. Если это сопротивление выполнить таким образом, чтобы, помимо требуемого активного сопротивления, оно обладало и достаточной индуктивностью, то тормозная схема обеспечит полную остановку поезда и сохранит возможность торможения одним моторным вагоном при нарушениях цепи в междувагонном соединении.

Опыты, проведенные с поездом из моторного и прицепных вагонов, показывают, что при отключенном сопротивлении $r_{\text{д}}$ обеспечивается эффективное торможение до полной остановки, причем индуктивность тормозных соленоидов играет положительную роль в смысле поддержания тока в цепи.

Выводы. 1. При определенных условиях электрический реостатный тормоз может обеспечить полную остановку моторвагонного подвижного состава, что исключает необходимость применения механического дотормаживания. При этом возможность сохранения тормозного эффекта до полной остановки резко возрастает при снижении сопротивления тормозной цепи и торможении с большими токами. Поэтому снижение остаточного сопротивления тормозной цепи до возможного минимума является одной из важнейших мер, способствующих полной остановке поезда посредством реостатного тормоза.

2. Метод расчета зависимости $i = f(v)$ для заключительной фазы торможения обеспечивает удовлетворительную сходимость с данными опыта и может применяться для исследования изменения тока в схемах реостатного торможения и определения тока I_0 .

3. Предлагаемый метод может быть применен и к схемам промышленного электропривода с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения, если в них предусматривается реостатное торможение.

Пример. Расчет заключительной фазы реостатного торможения двухосного вагона, оборудованного тяговыми двигателями ДТИ-60.

Исходные данные: собственный вес вагона 12,5 т; номинальная нагрузка—50 пассажиров (4,0 т); максимальная нагрузка—100 пассажиров (8,0 т); количество тяговых двигателей 2; полное сопротивление: при $t = 75^\circ \text{C}$ $r_{75^\circ} = 0,350 \text{ ом}$ и при $t = 20^\circ \text{C}$ $r_{20^\circ} = 0,288 \text{ ом}$; полное число витков обмотки возбуждения $w = 216$.

Исходя из тяговых характеристик двигателя ДТИ-60 и пользуясь формулами:

$$\frac{e}{v} = 2628\Phi; \eta_1 = \eta + \frac{Ir_{100^\circ}}{U}; F_T = F_\partial \left(\frac{1}{\eta_1} \right)^2;$$

$$F = F_T + 20 [\text{кг}],$$

рассчитываем характеристики намагничивания машины и замедляющие силы F , создаваемые машиной и силами сопротивления движению на ободе колес. Последние принимаем неизменными и равными 20 кг на одну колесную пару. Данные расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

$I, \text{ а}$	$v, \text{ м/сек}$	$F_\partial, \text{ кг}$	$\eta, \%$	$e, \text{ в}$	$e/v, \text{ в сек/м}$	$\eta_1, \%$	$F, \text{ кг}$	$\Phi, \text{ в сек}$	$\Phi/F, \text{ в сек/кг}$
40	9,73	193	83,5	536	55,1	85	281	0,0210	$0,747 \cdot 10^{-4}$
60	7,78	390	87,2	529	68,0	91	490	0,0259	$0,528 \cdot 10^{-4}$
80	6,92	580	88,3	522	75,5	93,4	690	0,0287	$0,416 \cdot 10^{-4}$
100	6,39	780	88,3	515	80,6	94,7	890	0,0307	$0,345 \cdot 10^{-4}$
120	6,10	980	87,5	508	84,6	95,1	1110	0,0322	$0,290 \cdot 10^{-4}$
150	5,56	1300	86,0	497	89,5	95,5	1450	0,0341	$0,235 \cdot 10^{-4}$

Аппроксимирующую прямую $\frac{\Phi}{F} = B - D\Phi$ проводим через точки $I_1 = 40 \text{ а}$ и $I_5 = 120 \text{ а}$ действительной характеристики; тогда получим $D = 0,408 \cdot 10^{-2}$; $B = 1,605 \cdot 10^{-4}$; $\frac{B}{D} = 0,0393$.

По данным табл. 1 на рис. 6 построены соответствующие характеристики, причем пунктиром (кривая 4)

изображена зависимость $F = f(I)$, рассчитанная по формуле $F = \frac{\Phi}{B - D\Phi}$ и кривой $\Phi = f(I)$. Нетрудно видеть, что в области токов ниже 150 а аппроксимирующая кривая 4 почти совпадает с кривой 3, отображающей зависимость $F = f(I)$.

Найдем значения произведения r^2m для одной машины ДТИ-60 при определенных значениях тока I_0 , которыми задаемся. По кривой 1 рис. 6 находим Φ_0 для данного значения I_0 . Значения постоянной A [формула (7)] выбираем в зависимости от величины начального тормозного тока I_T таким образом, чтобы прямая, определяемая уравнением $I = AF$, близко совпадала с кривой 3. Расчет производим по формуле

$$r^2m = \left(\frac{B}{D} - \Phi_0 \right)^2 \frac{2k\omega c_o D}{\pi} = 1623 \left(\frac{0,0393 - \Phi_0}{A} \right)^2$$

и сводим в табл. 2.

Таблица 2

$I_0, \text{ а}$	0	5	10	15	20	25	
$\Phi_0, \text{ в сек}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$35 \cdot 10^{-4}$	$70 \cdot 10^{-4}$	$92 \cdot 10^{-4}$	$122 \cdot 10^{-4}$	$150 \cdot 10^{-4}$	При $I_T, \text{ а}$
$r^2m, \text{ ом}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}$	161	136	112	97,5	79	63,5	80
То же	188	158	130	113	92	74	112
" "	205	172	143	124	100	81	150

По данным табл. 2 на рис. 9 построены зависимости $r^2m = f(I_0)$ для различных значений начального тормозного тока. Точки пересечения кривых 1, 2 и 3 с пунктирными прямыми 4, 5 и 6, представляющими значения произведения r^2m при $r = 0,350 \text{ ом}$ соответственно для порожнего, нормально нагруженного и предельно нагруженного вагона, определяют значения токов I_0 для этих нагрузок. Во всех рассмотренных случаях получились положительные значения тока I_0 , превышающие 6,5 а, что указывает на возможность осуществления полной остановки вагона.

Литература

1. И. Н. Бронштейн и К. А. Семендяев. Справочник по математике. Гостехиздат, стр. 108, 1948. [26.1.1955]



Автоматическое повторное включение без проверки синхронизма

Инж. А. Б. БАЙРАМ-ЗАДЕ

Азербайджанэнерго

Устройства автоматического повторного включения (АПВ) с проверкой синхронизма, значительно повышающие надежность работы энергосистем, получили широкое распространение. Однако существующие схемы этих устройств не всегда полностью удовлетворяют требованиям надежной работы энергосистемы.

В этих случаях особый интерес представляет метод осуществления автоматического повторного включения без проверки синхронизма, особенно эффективный на одиночных длинных линиях, связывающих электростанцию с энергосистемой.

О целесообразности применения несинхронного включения на длинных линиях электропередачи указывалось в «Сборнике директивных материалов Технического отдела МЭС СССР» (Госэнергоиздат, 1950) и в «Эксплуатационном циркуляре Технического управления МЭС» от марта 1955 г.

В июле 1955 г. на одной гидроэлектростанции, связанной с энергосистемой линией 220 в большой протяженности (рис. 1), были проведены опыты несинхронного включения гидрогенератора, мощность которого $P = 59,8$ мвт, напряжение $U = 13,8$ кв, номинальный ток $I = 2925$ а, скорость вращения $n = 125$ об/мин. Мощность возбuditеля гидрогенератора $P_{\text{в}} = 400$ квт, напряжение $U_{\text{в}} = 250$ в, ток $I_{\text{в}} = 1700$ а. Мощность подвозбудителя $P_{\text{пв}} = 20$ квт, напряжение $U_{\text{пв}} = 110$ в, $I_{\text{пв}} = 182$ а. Возбудитель и подвозбудитель находятся на одном валу с генератором.

Генератор работал в блоке с трансформатором мощностью 70 мва. Связь с системой осуществлялась по линии 1 протяженностью 265 км через трансформаторную группу мощностью 3×40 мва на приемном конце линии. Линия 2 находилась в ремонте.

Мощность, постоянно передаваемая по линии, составляет 25 ... 30% общей мощности системы. Каждое отключение линии приводило к нарушению энергоснабжения.

Установленное ранее на линии электропередачи устройство автоматического повторного включения с проверкой синхронизма оказалось неэффективным. Анализ режимов работы показал, что в условиях данной энергосистемы единственным способом, позволяющим обеспечить ее надежную работу, является применение устройства без проверки синхронизма.

Предварительные расчеты показали, что при несинхронном включении генератора, даже в случае, когда угол расхождения векторов напряжений генератора и системы составляет 180° , «всплеск» уравнительного тока из-за большой реактивности связи генератора с системой не превышает значения $3 \cdot I_{\text{н}}$. Проведенные испытания

подтвердили результаты предварительных расчетов.

Несинхронное включение производилось генераторным выключателем. При испытаниях никаких изменений в уставки защиты не вносилось.

Первые два опыта несинхронного включения проводились в режиме холостого хода при расхождении векторов напряжений генератора и системы примерно на 90° (первый опыт) и 180° (второй опыт). Величина угла определялась по синхроскопу приближенно. Генератор пускался по синхронной скорости и при полном возбуждении включался в сеть.

Как показывают осциллограммы (рис. 2), генератор втягивался в синхронизм сразу после включения. Вхождение генератора в синхронизм сопровождалось синхронными качаниями.

Следующие четыре опыта несинхронного включения проводились в режиме, когда генератор до нарушения связи с системой нес определенную нагрузку. Отключение генератора от сети производилось генераторным выключателем от руки. Повторное включение осуществлялось автоматически.

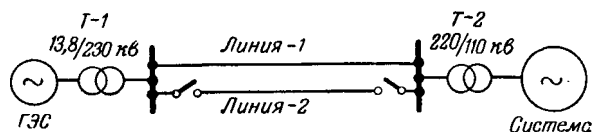


Рис. 1.

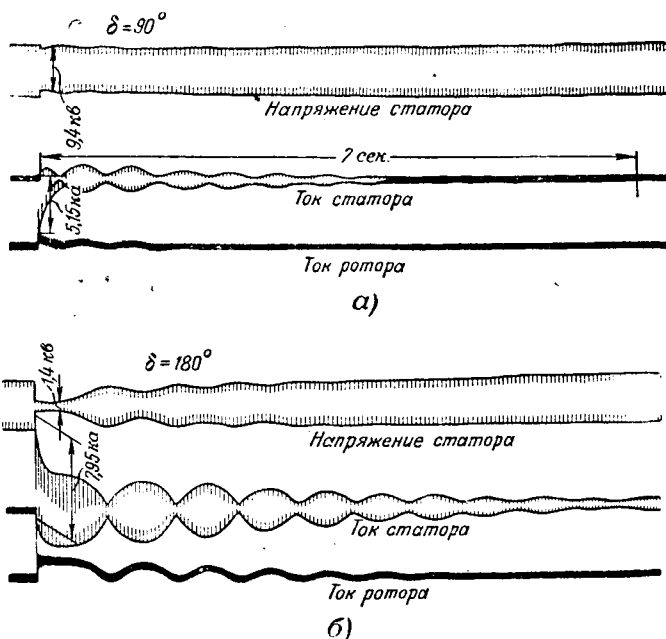


Рис. 2. Осциллограммы несинхронного включения генератора при расхождении векторов напряжений генератора и системы на 90 и 180° .

Номер		Нагрузка генератора, <i>Мвт</i>	Время автоматического повторного включения, <i>сек</i>	Угол расхождения векторов напряжений, град.	Продолжительность асинхронного хода генератора, <i>сек</i>	Продолжительность синхронных колебаний, <i>сек</i>	Наибольшее скольжение при автоматическом повторном включении, %	Кратность тока статора	Наименьшее напряжение на шинах станции, <i>кв</i>
опыта	рисунка								
1	2, а	0	0	90	0	7	0	1,7	9,4
2	2, б	0	0	180	0	10	0	2,72	1,4
3	—	16	0,96	200	2,2	8	—	1,85	11,4
4	—	30	0,96	70	3,8	9	4,5	2,35	11,5
5	3	49	0,96	15	7,5	14	19	2,9	12,8
6	—	15	1,68	220	1,2	7	—	1,95	11,3

При этом машина под действием избыточного момента гидротурбины шла в разгон и при повторном включении имела скорость выше синхронной. На рис. 3 приведены осциллограммы одного из четырех включений. В остальных трех опытах в качественном отношении процесс протекал аналогично.

Анализ последних четырех осциллограмм показал, что вхождению генератора в синхронизм во всех опытах предшествовал асинхронный ход, сопровождающийся значительными биениями тока статора.

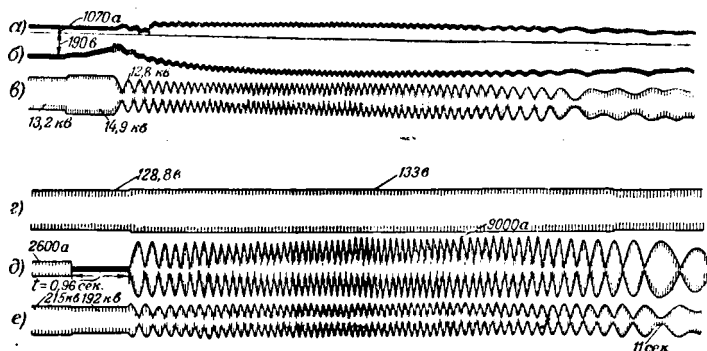


Рис. 3. Осциллограммы автоматического повторного включения генератора без проверки синхронизма.

а — ток ротора; б — напряжение ротора; в — напряжение статора; г — напряжение пеньдиль-генератора; д — ток статора; е — напряжение на шинах 220 кв.

Однако из-за большой реактивности связи генератора с системой наибольшее амплитудное значение тока не превышало величины $3I_{\kappa}$. Такая перегрузка в течение нескольких секунд для генератора вполне допустима. Результаты опытов сведены в таблицу.

На основании положительных результатов проведенных опытов на линии электропередачи 220 кв, связывающей гидроэлектростанцию с системой, осуществлено АПВ без проверки синхронизма. Схема гидроэлектростанции выполнена по принципу многоугольника.

Время полного цикла устройства АПВ 3,5 сек (выключатель типа Хидати).

В 1955 г. имели место два случая грозового перекрытия изоляторов на линии электропередачи 220 кв. Передаваемая по линии мощность составляла 20% мощности энергосистемы. Линия отключалась дифференциально-фазной защитой ДФЗ-2 с последующим автоматическим повторным включением. Благодаря действию устройства

автоматического повторного включения без проверки синхронизма были предотвращены две тяжелые системные аварии. Кривые восстановления напряжения на шинах 110 кв приемного конца линии электропередачи при действии устройства автоматического повторного включения приведены на рис. 4, а и б.

Гидроэлектростанция связана с системой несколькими линиями электропередачи.

С целью уменьшения толчка тока и продолжительности синхронных колебаний вначале

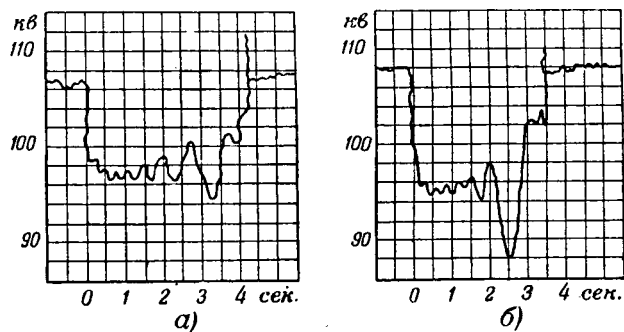


Рис. 4.

включается одна линия, а затем с небольшими интервалами остальные.

Автоматическое повторное включение без проверки синхронизма дает возможность также увеличить пределы статической и динамической устойчивости гидроэлектростанции.

На гидрогенераторах станции монтируется автоматический регулятор частоты, который, поддерживая номинальное число оборотов гидротурбины, значительно облегчает восстановление синхронной работы отделившейся от энергосистемы электростанции при действии устройства АПВ без проверки синхронизма.

Выводы. 1. Автоматическое повторное включение без проверки синхронизма на линиях электропередачи большой протяженности, связывающих электростанцию с энергосистемой, не сопровождается большими уравнительными токами и поэтому вполне допустимо.

2. Автоматическое повторное включение без проверки синхронизма увеличивает предел мощности, передаваемой по линии.

3. При наличии на гидрогенераторах автоматического регулятора частоты условия действия АПВ без проверки синхронизма значительно облегчаются.

По страницам технических журналов

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА ЗА РУБЕЖОМ¹

Протяженность железных дорог мира, составлявшая в начале столетия 643 700 км, за последние 50 лет возросла почти вдвое. В настоящее время во всем мире электрифицировано лишь 4% общей протяженности железнодорожных линий. Уровень электрификации железнодорожного транспорта Швейцарии составляет 90% протяженности всех железнодорожных магистралей страны; в Италии, Японии, Франции, Нидерландах и Швеции порядка 30...40%, в Австрии 24%, в Бразилии 12%, в Великобритании 5%.

Состояние электрификации железных дорог в различных странах мира и перевозки, выполненные различными видами тяги, видны из табл. 1...5, охватывающих все основные виды рельсового транспорта магистральных и пригородных железных дорог мира.

Из приведенных данных видно, что электрическая тяга распространена в Европе на 25,8% общей протяженности железнодорожных линий и на 12%, исходя из численности тягового парка. В США численность электроподвижного состава составляет всего 9% общего числа тяговых единиц, эксплуатируемых на железнодорожном транспорте страны, тогда как удельный вес тепловозной тяги достигает 44%. Любопытно, что Австралия обладает наибольшим относительным количеством электровозов, составляющим 17% всего тягового парка железных дорог страны.

По протяженности электрифицированных магистралей Европа стоит на первом месте в мире среди частей света, обладая 10% электрифицированных линий по отношению к общей протяженности железных дорог мира, что соответствует 64,1% протяженности всех электрифицированных в мире железных дорог.

При обособленном сравнении электрификации железных дорог Европы и США видно, что в Европе имеется примерно равное количество электровозов и электромоторных вагонов, тогда как в США последние преобладают над электровозами, количество которых составляет всего 27% общего электротягового хозяйства. Автоматрисы получили наибольшее развитие в Европе (77% всей тепловозной тяги) и ничтожное в США (всего 3%), где преобладают тепловозы.

В Швейцарии электровозами обслуживается наибольшее из всех европейских стран количество перевозок — 94,6%; в Швеции — 85,4%, в Италии — 65,6%.

В Европе доля перевозок, приходящаяся на тепловозную тягу, крайне незначительна: в разных странах она колеблется в пределах, не превышающих 3,2%, тогда как в США этот вид перевозок достигает 60%.

При электрификации магистральных железных дорог получили развитие различные системы тока и напряжения. Переменный ток распространен главным образом в Центральной Европе и Скандинавии, в то время как постоянный ток нашел применение в Великобритании, Франции, Нидерландах, Африке, Австралии, Индии и Южной Америке. В США применяются разнообразные системы тока и напряжения.

Общая протяженность линий, эксплуатируемых на постоянном токе, больше, чем на переменном. При электрификации на переменном токе в Европе преобладает напряжение 15...16 кВ, при частоте 16²/₃ гц или 20...25 кВ при 50 гц, а в Америке — напряжение 11 кВ при частоте 25 гц. На линиях незначительной протяженности в Италии применяется система трехфазного переменного тока, представляющая, однако, значительную сложность в эксплуатации вследствие наличия двух контактных проводов; поэтому в настоящее время они переоборудуются на постоянный ток.

Обособленное развитие получила, пока еще в небольшом объеме, система однофазного переменного тока нормальной частоты 50 гц, главным образом, во Франции (Валенсьен — Тионвиль). Использование этой системы тока обеспечивает возможность увеличения расстояния между подстанциями с 32...40 км (при постоянном токе напряжением 3 000 в) до 64...81 км.

Система однофазного тока нормальной частоты имеет

бесспорные преимущества перед системой пониженной частоты (16²/₃ гц), так как тяговые подстанции могут непосредственно питаться от общих промышленных энергосистем. Эксплуатационные расходы при однофазном токе промышленной частоты не превышают расходов при постоянном токе, однако они несколько выше, чем при однофазном токе пониженной частоты.

Несмотря на значительное снижение стоимости системы энергоснабжения при электрификации железных дорог по системе однофазного тока нормальной частоты, электроподвижной состав в отдельных случаях (например, при применении выпрямительных электровозов с машинными преобразователями) обходится дороже, чем при си-

Таблица 1
Эксплуатационная длина электрифицированных железных дорог по странам света (без СССР)

Часть света	Протяженность железно- дорожных линий		Протяженность электр- фицированных линий, тыс. км	Относительная протяженность электрифициро- ванных линий	
	тыс. км	% от общей про- тяженности же- лезных дорог мира		% от общей про- тяженности же- лезнодорожных линий мира	% от протяжен- ности электр- фицированных железных дорог мира
Европа	327	25,8	32,7	10,0	64,1
Америка	570	45,6	9,0	1,6	17,6
Азия	240	19,1	6,2	2,6	12,1
Африка	67	5,4	2,3	3,5	4,5
Австралия	51	4,1	0,85	1,7	1,7
Всего в мире	1 255	100,0	51,1	4,05	100,0

Таблица 2
Электрифицированные линии железных дорог Европы (без СССР)

Страна	Протяжен- ность электр- фициро- ванных линий, км	Страна	Протяжен- ность электр- фициро- ванных линий, км
Италия	6 450	Австрия	1 350
Швеция	6 400	Нидерланды	1 350
Швейцария	4 950	Норвегия	1 150
Франция	4 350	Бельгия	350
Германия	2 250	Венгрия	294
Великобритания	1 800	Польша	212
Испания	1 530	Чехословакия	194
		Дания	60

Всего в Европе 32 700 км

Таблица 3
Численность тягового (локомотивного и мотор-вагонного) парка железных дорог мира (без СССР)

Часть света	Паровая тяга		Электро- тяга		Тепловоз- ная тяга		Всего	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	% об- щего числа
Европа	76 000	82	11 000	12	5 700	6	92 700	44
Америка	32 400	57	4 100	7	20 500	36	57 000	27
Азия	43 000	89	3 550	7	1 750	4	48 300	23
Африка	5 600	82	600	9	650	9	6 850	3,25
Австралия	4 250	73	1 000	17	550	10	5 800	2,75
Всего в мире	161 250	76	20 250	10	29 150	14	210 650	100,0

¹ По материалам иностранной периодики за последние 4 года.

Таблица 4

Численность тягового парка в Европе (без СССР) и США

Наименование	Общее число тяговых единиц						Электротяга				Тепловозная тяга			
	Паровая тяга		Электротяга		Тепловозная тяга		Локомотивов		Моторвагонов		Локомотивов		Моторвагонов	
	тыс. шт.	%	тыс. шт.	%	тыс. шт.	%	тыс. шт.	%	тыс. шт.	%	тыс. шт.	%	тыс. шт.	%
Европа	76	82	11	12	5,7	6	92,7	5,7	52	5,3	48	1,3	23	4,4
США	19	47	3,7	9	17,8	44	40,5	1,0	27	2,7	73	17,2	97	0,6

Таблица 5

Объем перевозок (брутто), выполненных некоторыми европейскими железными дорогами

Вид тяги	Италия		Швеция		Швейцария		Франция		Германия		Испания		Австрия	
	т.км.10 ⁶	%	т.км.10 ⁶	%	т.км.10 ⁶	%	т.км.10 ⁶	%	т.км.10 ⁶	%	т.км.10 ⁶	%	т.км.10 ⁶	%
Паровозы	16,9	27,3	3,6	10,7	0,5	2,7	109,5	66,2	152,7	88	27,5	88,6	9,4	49,8
Электровозы	40,7	65,6	28,7	85,4	17,3	94,6	48,4	29,3	15,5	8,9	2,4	7,6	9,0	47,6
Тепловозы	—	—	0,1	0,3	—	—	0,6	0,4	0,5	0,3	—	—	0,1	0,5
Электрические моторвагоны	2,4	3,9	0,6	1,8	0,5	2,7	2,8	1,7	2,3	1,3	0,8	2,5	0,1	0,5
Дизель-моторвагоны	2,0	3,2	0,6	1,8	—	—	4,0	2,4	2,6	1,5	0,4	1,3	0,3	1,6
Всего	62,0	100	33,6	100	18,3	100	165,3	100	173,6	100	31,1	100	18,9	100

стемах непосредственного питания тяговых двигателей от контактной сети.

В развитии магистральных электрических железных дорог получает распространение строительство международных линий. В настоящее время строится, например, германско-австрийская магистраль Франкфурт—Вена протяженностью 755 км, уже электрифицированная на участке Пассау—Вена протяжением 510 км. Электрификация этой магистрали обеспечит экономию 40 тыс. т топлива в год и позволит сократить время следования поезда в пути для пассажирских поездов на 20%, для грузовых на 40%. В дальнейшем предполагается связать эту линию с электрифицируемой железнодорожной магистралью Рейн—Рурская область, что обеспечит беспересадочное сообщение из Вены до бельгийской и голландской границ. На электрифицированной международной магистрали эксплуатируются новые электровозы серии Е с 6 ведущими осями, мощностью 4 000 кВт, обеспечивающие ведение поездов весом 105 т со скоростью 130 км/час.

При эксплуатации электрифицированных международных линий возникает необходимость перехода с одной системы питания на другую. Так, например, в Швейцарии применяется переменный ток 16 $\frac{2}{3}$ гц, 15 кВ; в Италии — постоянный ток 3 000 в; во Франции — постоянный ток 1 500 в; в той же Швейцарии на линии Базель используется однофазный ток нормальной частоты, а на линии Фрейбург — та же система тока, но при напряжении 20 кВ. Подача подвижного состава на пограничные узловые станции осуществляется по инерции, с пониженной скоростью или маневровыми электровозами. Для скоростного сквозного сообщения на международных линиях с различными системами тока и напряжения часто используются специальные электровозы, предназначенные для двойной системы питания. Так, например, на линии Базель—Страсбург эксплуатируются электровозы с формулой осей Во-Во мощностью 3 500 кВт, развивающие скорость 140 км/час, которые могут эксплуатироваться как на однофазном переменном токе 15 кВ при частоте 16 $\frac{2}{3}$ гц, так и 25 кВ, 50 гц.

Опыт эксплуатации со смешанными системами тока и напряжения имеется на ряде электрифицированных линий: Чинассо—Домодоссоло, Тарвис (Италия), где имеются магистрали, электрифицированные на однофазном токе 15 кВ, 16 $\frac{2}{3}$ гц и на постоянном токе 3 кВ; Бреннер, где контактная сеть питается однофазным током 15 кВ, 16 $\frac{2}{3}$ гц

и трехфазным током 3,6 кВ, 16 $\frac{2}{3}$ гц; Экс ле Бен, где имеется однофазный ток 25 кВ, 50 гц и постоянный ток 1,5 кВ.

Известный интерес представляет линия Карлсруэ—Этлинген—Бузенбах, Херенальб, на которой осуществляется смешанная эксплуатация при питании контактной сети переменным током 10 кВ, 25 и 50 гц. На ней эксплуатируются электровозы Во-Во, оборудованные коллаторными тяговыми двигателями последовательного возбуждения, работающими с повышенным межсегментным напряжением (6 в против обычных 3...4 в).

На электровозах постоянного и переменного тока в настоящее время применяется исключительно индивидуальный привод с преимущественным распространением опорно-осевой подвески тяговых двигателей. Основные технические данные по некоторым типам современных электровозов, построенных за последнее время за рубежом, приведены в сводной табл. 6.

По энерговооруженности наименьшее значение удельной мощности имеют современные электровозы-гиганты США (10,3 кВт/т), а наибольшее — современные французские электровозы (44,7 кВт/т).

За истекшие тридцать лет на швейцарских железных дорогах наблюдается резкое снижение относительного веса электровозов с 77 до 22...31 кг/кВт, тогда как мощные электровозы, построенные в последнее время в США, имеют относительный вес 92 кг/кВт. Это объясняется тем, что эксплуатация электровозов в США характеризуется наличием длинных товарных составов, длина которых достигает 1 500 м, а вес поезда зачастую превышает 8 000 т, тогда как в Европе предельный вес грузовых поездов обычно не превышает 1 500...2 000 т. Эксплуатация тяжелых поездов требует от электровоза при трогании поезда с места высоких пусковых тяговых усилий, которые могут быть реализованы лишь при наличии достаточного сцепного веса электровоза.

Целесообразность эксплуатации столь длинных поездов не является, однако, достаточно обоснованной и небезопасна, хотя на длинных поездах в США предусматривается радиосвязь на ультракоротких волнах между кабиной машиниста и хвостовым вагоном поезда, а также между машинистом и диспетчером в радиусе 133...177 км.

В Швейцарии наблюдалась раньше также тенденция к строительству сверхмощных электровозов, например, со сцепным весом 234 т при часовой мощности 8 400 кВт.

В настоящее время для ведения пассажирских поездов здесь применяются электровагоны малого веса. Например, на линии Цюрих—Берн—Лозанна курсируют облегченные электровагоны с багажным отделением типа RFe-4/4, развивающие скорость 125 км/час и обладающие сцепным весом 47 т при мощности часового режима 915 кВт.

В последнее время во Франции, где преобладала электрификация на постоянном токе, начинается осуществление электрификации магистральных дорог на однофазном токе промышленной частоты 50 Гц. Исключительный интерес представляет недавно электрифицированная магистраль Валансьенн—Тионвиль длиной 274 км с электрооборудованием контактной сети однофазным током при напряжении 25 кВ с эксплуатацией шести- и четырехосных электровагонов. Магистраль изобилует затяжными уклонами длиной до 18 км, достигающими 18‰. Электрическая тяга должна обслуживать поезда весом 1800 т на подъемах 10‰ или 2400 т на подъемах 6‰ при эксплуатационной скорости 60 км/час.

Шестиосные электровагоны сцепным весом 120 т оборудуются тяговыми двигателями постоянного или трехфазного тока с опорно-осевой подвеской и питаются от преобразователей, устанавливаемых на электровагоны и выполняемых в двух вариантах: с машинными преобразователями однофазно-постоянного тока и однофазно-трехфазного тока с преобразователем частоты. Коэффициент полезного действия таких выпрямительных электровагонов достигает 75%. Расход электроэнергии с учетом рекуперации при питании от сети 50 Гц составляет всего 15,6 Вт·час/т·км против 23,1 Вт·час/т·км при системе электрооборудования 16²/3 Гц.

Электровагоны однофазно-постоянного тока оборудуются понижающим трансформатором, питающим синхронный двигатель 2140 кВт, 3000 в, 1500 об/мин, сочлененный с двумя генераторами постоянного тока, обеспечивающими питание трех тяговых двигателей каждый. Электрическое оборудование весит 45,3 т (37,8% сцепного веса электровагона), механическое оборудование 71 т, балласт 3,7 т.

Шестиосный электровагон с однофазно-трехфазным преобразователем имеет длительную мощность 2620 кВт при скорости 50 км/час. Установка состоит из синхронного двигателя, шестиполюсного преобразователя фаз, 1000 об/мин, и восьмиполюсного преобразователя частоты, 750...1280 об/мин, обеспечивающего регулирование частоты в пределах 0...135 Гц при напряжении 0...1300 в. Вес электрооборудования составляет 55 т (45,5% сцепного веса электровагона); механическое оборудование весит 65 т.

Четырехосные электровагоны имеют сцепной вес 80 т и оборудуются двумя системами электропривода: с коллекторными двигателями однофазного тока и двигателями постоянного тока, питаемыми от инверсионных выпрямителей.

При системе с однофазными коллекторными двигателями электровагон развивает длительную мощность 2000 кВт при скорости 53 км/час (максимальная скорость 140 км/час). Тяговые двигатели имеют по 18 полюсов и питаются от одного главного трансформатора. В связи с большим током в цепи двигателей, достигающим 12 тыс. А, регулирование осуществляется с высоковольтной стороны трансформатора. Вес электрооборудования составляет 36 т (45% сцепного веса), вес механической части 44 т.

Электровагоны с инверсионными выпрямителями обладают длительной мощностью 2400 кВт при скорости 54 км/час. Они оборудуются четырьмя тяговыми двигателями постоянного тока, соединяемыми параллельно и питаемыми от двух инвертиров каждый. Регулирование напряжения на двигателях осуществляется с высоковольтной стороны трансформатора. Тяговые двигатели выполнены без компенсации. Восемь инвертиров электровагона имеют водяное охлаждение. Длительный ток двигателя составляет 475 А при 750 в. Инвертиры допускают перегрузку 300% по отношению к номинальному току в течение одной минуты. Вес электрооборудования составляет 39,5 т (47,5% сцепного веса), вес механического оборудования 43,5 т (при сцепном весе 83 т). Максимальная скорость электровагона 120 км/час.

Оба типа электровагонов предназначаются для ведения товарных составов весом 750...1300 т, а также пассажирских поездов весом 900 т со скоростью 53 км/час на уклоне, достигающем 10,8‰.

Для электрифицированных железных дорог Франции

предполагается построить 160 электровагонов однофазного переменного тока, в том числе 102 с формулой осей Со-Со, которые будут оборудованы двигатель-генераторными преобразователями и снабжены тяговыми двигателями постоянного тока; 20 электровагонов должны иметь фазорасщепители и на них найдут применение тяговые двигатели трехфазного тока; 24 электровагона с формулой осей Во-Во будут оборудованы коллекторными двигателями однофазного тока нормальной частоты и 14 — инверсионными преобразователями и тяговыми двигателями постоянного тока. Указанные электровагоны предназначаются для пассажирской и грузовой эксплуатации и будут развивать скорость 97 км/час.

Существенный интерес представляют скоростные испытания электровагонов, проведенные во Франции в 1954 и 1955 гг. 21 февраля 1954 г. на серийном электровагоне постоянного тока 1500 в с формулой осей Со-Со серии СС-7121, имеющем сцепной вес 106 т при установленной мощности тяговых двигателей 3550 кВт, следовавшим с тремя четырехосными вагонами весом 111 т, на линии Париж—Лион была достигнута скорость 243 км/час.

28 марта 1955 г. был поставлен новый своеобразный мировой рекорд скорости на электровагоне. Испытания велись одновременно на двух электровагонах постоянного тока с формулой осей Со-Со и Во-Во серий СС-7107 и ВВ-9004 на прямолинейном равнинном участке протяжением 45 км между станциями Ламот и Морсенкс с поездами, состоявшими из трех четырехосных вагонов весом 111 т. На отрезке пути протяжением 17 км была достигнута скорость 331 км/час.

К скоростному пробегу, проводимому исключительно в целях выявления надежности конструкции электровагона, была проведена специальная подготовка, заключающаяся в снижении передаточного числа привода на электровагоне СС до 1,145, а на электровагоне ВВ до 0,849 (1). Контактная сеть, выполненная из провода сечением 150 мм², имела ценную подвеску и была усилена дополнительным питающим проводом сечением 100 мм², подвешенным параллельно основному контактному проводу. Перед началом испытаний напряжение энергоснабжающей системы было повышено до 2000 в. С испытуемого участка на время скоростного пробега было снято все движение.

Во время испытаний среднее значение тока, снимаемого с контактного провода, достигало 4000 А. Максимальная мощность, зафиксированная регистрирующими ваттметрами, составила для шестиосного электровагона 12 250 кВт, а для четырехосного 11 800 кВт. На испытуемом участке были уложены стандартные рельсы весом 50 кг/м на щебеночном основании. Перед испытаниями контактная сеть на всем протяжении опытного участка была тщательно смазана. Во время испытаний один токоприемник сломался и испытания продолжались на другом. Испытания показали вполне устойчивый ход электровагонов при сверхвысоких скоростях, свидетельствующий о достаточной механической прочности конструкции.

В апреле 1955 г. французские железные дороги произвели опыт управления по радио электровагоном, следовавшим с тремя пассажирскими вагонами. Управление поездом, не имеющим обслуживающего персонала и пассажиров, осуществлялось с тяговой подстанции на ультракоротких волнах. Кроме сигналов пуска на электровагон передавались сигналы остановки, торможения и отторгивания. Указания о режиме ведения поезда передавались по радио на тяговую подстанцию с автомотрисы, следовавшей по параллельным путям рядом с поездом, управляемым по радио и достигшим скорости 120 км/час.

В современных немецких электровагонах переменного тока, например, последних серий Е-42 и Е-50, а также на товарных электровагонах Е-75 находит применение система многоступенчатого пуска Мафей-Шварцкопф. Она предусматривает лишь незначительное число ступеней регулирования на обмотке главного трансформатора (порядка 15), чем достигается возможность грубого регулирования напряжения ступенями по 30...40 в. Тонкое регулирование осуществляется при помощи вспомогательного трансформатора, имеющего 600 ступеней регулирования. Таким образом у тяговых двигателей обеспечивается регулирование ступенями по 1 в, что создает абсолютно плавное нарастание силы тяги электровагона.

В настоящее время австрийские железные дороги электрифицированы на 24,2% общей протяженности же-

лезных дорог страны. Их потребность в электроэнергии составляет 480 млн. *квт·час* в год. Электрификация железных дорог ведется в соответствии с 10-летним планом, согласно которому к 1963 г. на электрическую тягу должно быть переведено 40% всех железнодорожных линий; в результате этого электрические железные дороги обеспечат 80% всех грузовых и пассажирских перевозок. Предполагается, что оставшиеся 20% перевозок будут осуществлены тепловозной тягой; паровая тяга сохранится лишь на линиях вспомогательного значения.

Чехословацкие заводы им. Ленина в Пльзне строят шестиосные и четырехосные электропоезда. Последнее исполнение серии Е-499 (см. табл. 6) предназначается для эксплуатации на линиях, связывающих Чехословакию с СССР: Чилина—Шпис Нова и Чилина—Врутки. Линия характеризуется наличием на перевале Татра затяжных подъемов и спусков, достигающих 18‰. При испытаниях новый электропоезд развивал максимальную скорость 160 *км/час*. Он предназначается для поездов экспресс весом 240 т, скорых 480 т, пассажирских 720 т и грузовых 1 440 т, со скоростью на площадке 120 *км/час* для экспресс и скорых поездов и 90 *км/час* для пассажирских и грузовых поездов.

Электрическая тяга в США за последнее время развивается очень слабо. Электрификация железных дорог дальнего следования давно прекратилась; все работы за

последние 5 лет выразились в капитальном ремонте подвижного состава и контактной сети на отдельных дорогах, в некотором расширении мотор-вагонной тяги на пригородных железных дорогах и в пополнении Пенсильванской железной дороги несколькими мощными электропоездами. Однако в связи с удорожанием жидкого топлива в последнее время в США наблюдается некоторое оживление интереса к электрической тяге. Из построенных за последнее время в США электропоездов наибольший интерес представляют двухсекционные 12-осные электропоезда-гиганты (табл. 6), имеющие нагрузку на ось 28 т.

В Швейцарии мощность электропоездов, обслуживающих перевальные участки с большими грузопотоками, достигает 8 830 *квт*. По сравнению с паровой тягой провозная способность на этих участках повысилась на 250...300%, что свидетельствует о высокой степени эффективности электрической тяги.

В стремлении к экономии топлива ряд стран собирается полностью перейти на электрическую тягу. Так, например, Голландия в 1945 г. приняла решение об электрификации всех основных железных дорог страны. В 1953 г. в этой маленькой стране было уже электрифицировано 80% общего протяжения железнодорожной сети страны.

Сплошная электрификация железных дорог признается возможной лишь в отдельных странах мира, обладающих

Таблица 6

Сравнительные показатели современных электропоездов зарубежных стран

Страна	Назначение	Тип	Формула осей	Сцепной вес, т	Род тока и частота, гц	Напряжение контактной сети, кв	Часовая мощность, квт	Максимальная скорость, км/час	Относительный вес, кг/квт	Энерговооруженность, квт/т
Швейцария	Пассажирский	FFe-4/4	Во-Во	47	—	—	915	125	51,4	19,5
Германия	Универсальный	E-41	Во-Во	61	переменный 16 ² / ₃	15	2 100	120	30,5	32,7
Австрия	Грузовой	E11p	Во-Во	68	переменный 16 ² / ₃	15	2 640	90	25,0	37,4
Бельгийское Конго	Грузовой, Катанга	С коллекторными двигателями	Во-Во	74	переменный 50	22	1 236	70	60,0	16,7
Франция	Грузовой, пассажирский	Выпрямительный	Во-Во	79	переменный 50	1,5	2 100	120	37,5	26,5
Франция	Грузовой, пассажирский	ВВ-9С04	Во-Во	80	постоянный	1,5	2 370	120	33,7	29,5
Швейцария	Для Франции	ВВС	Во-Во	80	постоянный	1,5	3 580	160	22,3	44,7
Чехословакия	Универсальный	E-499	Во-Во	80	постоянный	3,0	2 400	120	33,2	30,0
Франция	Базель—Страсбург	—	Во-Во	80	переменный 16 ² / ₃ и переменный 50	15	3 500	140	22,8	43,7
Франция	Валансьен—Тионвиль	Выпрямительный	Во-Во	83	переменный 50 и постоянный	25	2 540	140	31,5	31,6
Франция	Валансьен—Тионвиль	Однофазно-трехфазный	Во-Во	80	переменный 50 и переменный 3ф	25	1 930	140	41,5	24,0
Франция	Валансьен—Тионвиль	С коллекторными двигателями	Во-Во	80	переменный 50	25	2 200	140	36,4	27,6
Германия	Универсальный	E-10	Во-Во	82,4	переменный 16 ² / ₃	15	3 200	100	25,8	39,0
Германия	Универсальный	E-40	Во-Во	82,4	переменный 16 ² / ₃	15	3 000	100	27,4	36,3
Германия	Хелленталь	ВВ-244	Во-Во	85	переменный 50	20	2 500	85	34,0	29,4
Франция	Универсальный	СС-7107	Со-Со	106	постоянный	1,5	2 370	140	29,8	33,5
США	Пенсильванская железная дорога	ВВ-240	Во-Во	109	переменный 25	11	2 020	104	53,8	18,5
Австрия	Вена—Пассау	E-1010	Со-Со	110	—	—	4 000	130	27,5	36,4
Франция	Универсальный	СС-6052	Со-Со	118	переменный 50	—	3 000	140	39,3	25,4
Германия	Рейнский бурогольный район	Выпрямительный	Во-Во	120	переменный 16 ² / ₃ и постоянный	6	1 760	70	68,0	14,7
Германия	Универсальный	E-94	Со-Со	120	переменный 16 ² / ₃	15	3 200	90	37,4	26,7
Чехословакия	Универсальный	—	Во-Во-Во	120	постоянный	3,0	2 344	100	51,2	19,3
Германия	Хелленталь	ВВС	Со-Со	120	переменный 50	20	2 240	90	53,5	18,6
Франция	Валансьен—Тионвиль	Выпрямительный	Со-Со	120	переменный 50 и постоянный	25	3 800	140	31,4	31,6
Франция	Валансьен—Тионвиль	Однофазно-трехфазный	Со-Со	120	переменный 50 и переменный 3ф	25	2 900	140	41,5	24,0
Франция	Валансьен—Тионвиль	С коллекторными двигателями	Со-Со	120	переменный 50	25	3 300	140	36,4	27,6
Индия	Бомбей—Калькута	СС	Со-Со	123	постоянный	1,5	2 660	120	46,7	21,4
Германия	Универсальный	E-50	Со-Со	126	переменный 16 ² / ₃	15	4 380	100	28,8	34,5
Германия	Рейнский бурогольный район	Мотор-генераторный SSW	Во-Во	120*	переменный 50 и постоянный	6	1 860	70	64,5	15,5
США	Нью-Йорк, Нью-Хевен	Выпрямительный	Со-Со	156	переменный 25	11	2 930	168	53,2	18,7
Швейцария	Универсальный	—	(Во-Во)+(Во-Во)+(Во-Во)	234	—	—	8 830	83	26,5	36,0
США	Пенсильванская железная дорога	—	(Во-Во-Во) — (Во-Во-Во)	340	переменный 25—60 и постоянный	11	3 600	102	94,0	10,6
США	Пенсильванская железная дорога	—	(Со-Со) — (Со-Со)	330	переменный 25—60 и постоянный	11	3 630	102	92,0	10,8

* В исполнении AEG двигатель-генераторный электропоезд имеет вес 129,2 т, а с ртутно-выпрямительным агрегатом 132,4 т. В исполнении ВВС ртутно-выпрямительный вариант электропоезда имеет часовую мощность 1 480 *квт* при сцепном весе 120 т.

богатými ресурсами гидроэнергии и имеющих на своих железнодорожных линиях значительный грузооборот. Степень дефицитности и стоимости твердого и жидкого топлива в данной стране играют при этом решающую роль. К числу стран, уже имеющих почти сплошную электрификацию железнодорожного транспорта, можно отнести Швейцарию.

В перспективе можно ожидать электрификации 25% общей протяженности железнодорожных линий мира, причем остальные 75% будут эксплуатироваться на паровой и главным образом на тепловозной тяге.

В промышленном транспорте в последнее время находят применение мощные электровозы, управляемые по ультракоротковолновой радиосвязи. Такие электровозы применяются, например, на Рейнских буроугольных разработках и поставляются тремя ведущими европейскими фирмами: BBC, SSW и AEG в различных исполнениях, но с сохранением единой системы первичного питания от контактной сети однофазного переменного тока нормальной частоты 50 гц, 6300 в: 1) со статическими выпрямителями, с управляемой и неуправляемой сетками и тяговыми двигателями смешанного возбуждения; 2) с двигателем-генераторными преобразователями и тяговыми двигателями последовательного возбуждения; 3) с понизительным трансформатором и двигателями однофазного тока.

Формула осей преобразовательных электровозов — Во-Во. Сцепной вес в зависимости от исполнения колеблется от 120 до 130,4 т, а часовая мощность от 1480 до 1860 квт при коэффициенте мощности от 0,8 до 1 и к. п. д. от 0,75 до 0,82. Для электровозов всех исполнений предусматривается возможность управления ими по радио при маневровой эксплуатации.

При управлении электровозами SSW по радио тяговые двигатели работают с параллельным возбуждением с питанием обмоток возбуждения от специального возбуждателя. Для питания и регулирования возбуждения главного генератора применяется машинный усилитель, обеспечивающий управление при минимальной затрате энергии. При обычном ходовом режиме цепи управления потребляют ток 5 а, 48 в. При дистанционном управлении машинный усилитель работает от импульсов, посылаемых ультракоротковолновым передатчиком, и получает для управления напряжение 6 в при токе 1,3 а, т. е. потребляет мощность всего около 8 вт.

Основные габаритные размеры выпрямительных электровозов: длина 14500 мм, база 3100 мм, ширина колеи 1435 мм, ширина кузова 3000 мм с уширением у кабин до 4000 мм, высота до крыши электровоза 4000 мм, диаметр ведущих колес 1120 мм.

В части электроснабжения отмечается значительный прогресс в развитии металлических ртутных выпрямителей. Относительный вес одноанодных отпаянных выпрямителей снизился за последние 25 лет в 3,25 раза и составляет в настоящее время всего 0,67 кг/квт.

Можно констатировать отсутствие какого-либо единообразия в выполнении преобразовательных агрегатов и в оборудовании тяговых подстанций электрических железных дорог мира.

Тенденции развития всех видов электрического транспорта за рубежом показывают общее стремление к расширению сферы действия электрического транспорта и в особенности к его модернизации. Быстрое развитие электрического транспорта обуславливается интенсивным развитием мирового баланса электроснабжения, возросшего, по данным Мировой энергетической конференции, с 791,3 млрд квтч в 1948 г. до 1139,4 млрд квтч в 1952 г., т. е. на 44%.

В темпах мирового электроснабжения СССР занимает ведущее место, давая ежегодный прирост выработки электроэнергии в 15,4% против 8,4% в США.

Кандидат техн. наук Ю. М. Галонен

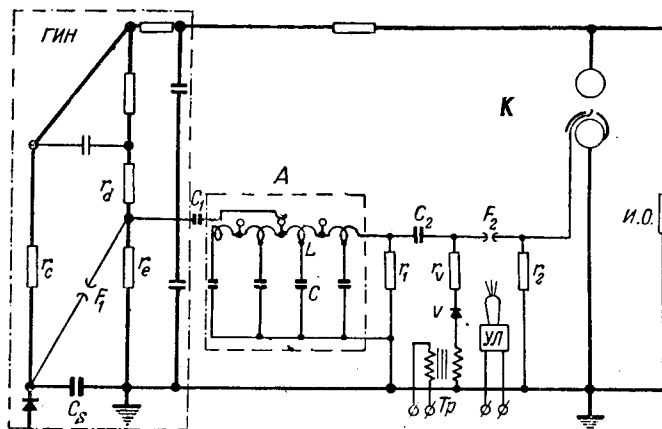
СТАБИЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ВОЛНЫ¹

В реферируемой статье описывается новый способ, позволяющий получить регулируемое в широких пределах и весьма стабильное время среза волны генератора им-

пульсов, постоянное без регулировки схемы при изменениях амплитуды волны до 25%. Рассматриваемая схема изображена на рисунке. Импульс крутого фронта, появляющийся на сопротивлении r_e при срабатывании запального разрядника генератора импульсов (ГИН), через емкость связи C_1 действует на схему замедления A , которая представляет собой цепочку из большого числа элементов C и L и поэтому допускает широкий диапазон регулировки времени замедления. Вспомогательный импульс, преобразованный схемой замедления, проходя через разделительный конденсатор C_2 , вызывает срабатывание искрового промежутка F_2 , что заставляет пробиться разрядник K , включенный параллельно испытываемому объекту $И.О.$ Емкость C_2 от трансформатора Tr через вентиль V предварительно заряжена до значения, весьма близкого к пробному напряжению разрядника F_2 — около 10 кв. Этим достигается сведение к минимуму запаздывания разряда и соответственно стабилизация времени среза, особенно при облучении промежутка F_2 ультрафиолетовыми лучами (У.Л.). Вместо цепи A можно применить обычный кабель замедления.

Для среза волны автор применил шаровой разрядник (в примере диаметром 0,5 и 0,75 м), на нижний шар которого надет шаровой сегмент, имеющий в центре прорез и изолированный вспомогательный электрод² (см. рисунок). При пробое промежутка F_2 происходит также и пробой между указанным центральным электродом и шаровым сегментом, генерирующий интенсивную ионизацию искрового промежутка шарового разрядника K , что вызывает его пробой, т. е. срез волны генератора импульсов.

Автор приводит два примера, когда при изменении амплитуды волны от 570 до 750 кв и от 400 до 520 кв, т. е. на 23...24% наибольшего значения, время среза практически оставалось без изменения равным 3,06...3,1 мксек. В данном случае замедление осуществлялось кабелем замедления длиной 8,5 м*. Срез удается осуществить и



на хвосте волны. Так, например, на волне 1/50 мксек можно произвести срез до времени около 15 мксек, когда напряжение падает до 80% амплитуды волны. Автор приводит осциллограммы среза при 16,2 мксек. Рассматриваемая схема применима и для многоступенчатых генераторов импульсов (W. Auth и H. Schindelin. ETZ-A, т. 76, стр. 386, № 11, 1955).

Кандидат техн. наук, доц. Е. В. Калинин

СУШКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В лаборатории фирмы Сименс-Шуккерт были проведены исследования характеристик изоляции, основная цель которых заключалась в обосновании критериев оценки влажности изоляции статорных обмоток генераторов. При

² Подобное устройство давно применяется в СССР для запа- ла генераторов импульсов и в качестве искровых реле в схемах электронных осциллографов И. С. Стекольников. Однако для регулировки среза основной волны генератора импульсов автор, повидимому, применил это искровое реле впервые. (Е. К.)

* Очевидно, автор использовал свойство нарастания напряжения на кабеле при многократных отражениях волны в нем, так как времени 3 мксек соответствует пробег по кабелю длиной 450...500 м.

¹ См. также «Электричество», № 3, 1955.

этом имелась в виду только гильзовая система изоляции, т. е. изоляция пазовой части обмотки в виде микафолиевой гильзы на шеллаке и изоляция лобовых частей из микаленты (на батисте), хлопчатобумажной или стеклянной ленты и лака. Витковая изоляция секций при исполнении по классу А выполняется из асфальтированной бумаги, при исполнении по классу В — из микаленты.

Исследования проводились на новых стержнях и секциях на напряжение 6 кВ; были использованы также материалы измерений, произведенных на генераторах напряжением до 11 кВ. На испытуемых стержнях и секциях характеристики изоляции измерялись отдельно для гильзы, лобовых частей и стыка, т. е. места окончания изоляции лобовой части, заходящей на гильзу. Такое раздельное измерение достигалось наложением трех отдельных электродов. Измерялись величины $\lg \delta$, емкости и токов утечки (на выпрямленном напряжении); отсчет последних производился через 5...7 мин после приложения напряжения.

Было отмечено, что ток утечки для лобовых частей и стыка значительно больше, чем для гильзы. Так, для одной из испытанных секций ток утечки при 6 кВ и температуре 73°С составлял для гильзы 0,1 мкА, для стыка 0,5 мкА, для лобовых частей 3,8 мкА. При этом зависимость тока утечки лобовых частей от напряжения имела нелинейный характер, в то время как для токов утечки гильзы и стыка она оставалась линейной во всем диапазоне применявшихся напряжений (до 10 кВ).

Исследование зависимости $\lg \delta$ от напряжения показало, что у испытуемой секции точка ионизации для гильзы лежит несколько выше фазного напряжения (3,7 кВ), а для лобовых частей и стыка — ниже него (около 3 кВ), что особенно заметно при увлажненной изоляции.

Были исследованы зависимости величин $\lg \delta$ и токов утечки от температуры и подтверждено, что эти зависимости при температурах до 100°С, вычерченные в поллогарифмическом масштабе, близки к прямым линиям. При этом можно считать, что токи утечки возрастают примерно вдвое (по опытам от 1,8 до 2,2 раза) при повышении температуры на 10°С.

Весьма тщательно исследовалось влияние сушки на характеристики изоляции. Обнаружено, что наиболее сильно в процессе сушки меняется ток утечки стыка. До сушки он почти на два порядка больше, чем ток утечки гильзы, а после сушки он у секции становится близким к току утечки гильзы, а у стержня — даже меньше него. Наиболее существенное снижение тока утечки стыка происходит в течение первых нескольких часов сушки.

Ток утечки гильзы почти не меняется в процессе сушки стержня и сравнительно немного (в 5...7 раз) уменьшается в процессе сушки секции с асфальтированной витковой изоляцией.

При сушке одного из стержней получено уменьшение тока утечки стыка в 330 раз, тока утечки лобовых частей в 3 раза, а ток утечки гильзы остался неизменным; при сушке секции получено уменьшение тока утечки стыка в 50 раз, тока утечки лобовых частей в 18 раз, тока утечки гильзы в 5 раз. Специальные опыты, проведенные на секции без гильзы, показали, что изменения тока утечки гильзы секции обусловлены изменением сопротивления витковой изоляции в процессе сушки.

Особенно интересны результаты опытов по влиянию влажности на пробивное напряжение изоляции. При пробое хорошо высушенных стержней и секций, на которых производились опыты по измерению токов утечки и $\lg \delta$, не обнаружено заметного возрастания пробивного одноминутного напряжения ни для гильзы, ни для лобовых частей по сравнению с пробивным напряжением аналогичных стержней, не проходивших сушки.

Партия секций хранилась на открытом воздухе в течение 21 суток при относительной влажности воздуха 70...95%; пробивное напряжение, замеренное после этого, мало отличалось от пробивного напряжения секций, хранившихся в сухом помещении. Аналогичные результаты были получены на секциях, которые хранились в течение 22 суток на открытом воздухе при влажности воздуха 65...100%, и на секциях, хранившихся в течение 32 дней при сухой погоде.

При длительном погружении секций в воду они остаются неповрежденными или повреждаются весьма незна-

чительно, если они хорошо покрыты лаком, а гильза имеет покров из графитированной бумаги. Если же имеются неплотности, через которые вода просачивается в толщу изоляции, то уже при напряжении 2...8 кВ изоляция загорается.

Специальные опыты, проведенные на секции, у которой с концов гильзы были соскоблены асфальт и подмазка, показали, что влага проникает только через поврежденные концы гильзы, откуда она может быть легко удалена. Средние части гильзы при этом остаются совершенно сухими, и их пробивное напряжение не изменяется. Гильзы размокают только после многочасовой выдержки в воде.

Изоляция, не имеющая дефектов, даже будучи погружена в воду, не всегда увлажняется настолько, чтобы произошел пробой. Это показывает опыт при котором к сырым секциям в течение нескольких дней было приложено номинальное напряжение. При этом пробоя не произошло, секции лишь разогрелись столь сильно, что происходило испарение влаги без какого-либо повреждения изоляции. Пробой наступает лишь в том случае, когда увлажнение столь значительно, что количество отводимого тепла меньше выделяющегося. Опыты показали, что для этого, как правило, необходимы более высокие напряжения, чем имеющие место при номинальном длительном режиме.

При номинальном напряжении повреждения изоляции происходят главным образом в тех случаях, когда механически поврежден лаковый покров и становится возможным проникновение влаги в толщу изоляции.

Таким образом, проведенные опыты еще раз подтверждают результаты многочисленных исследований, проводимых в Советском Союзе, начиная с 1949 г., которые показали, что изоляция высоковольтных электрических машин практически не увлажняется, если в ней нет повреждений.

Проведенное в статье рассмотрение вопроса о величине сопротивления изоляции электрической машины показывает, что для определения сопротивления изоляции при 75°С не следует пользоваться формулами, предложенными американскими инженерами:

$$r = \frac{100 (U + 3,6) \pi^{1/3}}{S^{3/4}}; \quad r = \frac{6 (U + 3,6) (n + 1400)}{S + 5000};$$

$$r = k \frac{(U + 3,6) (8 + n^{1/2})}{S^{1/2} - 16},$$

где r — величина сопротивления изоляции, мгом;

U — номинальное напряжение, кВ;

S — мощность, кВА;

k — коэффициент, зависящий от других факторов и определяемый по специальной таблице;

n — скорость вращения, об/мин.

Так, например, четыре генератора мощностью по 34 000 кВА, 11 кВ, 100 об/мин имели после сушки сопротивление изоляции при 75°С 1...1,5 мгом, в то время как по вышеприведенным формулам оно должно составлять 2,6...3,4 мгом. Приведены еще шесть примеров сушки машин мощностью от 1 250 до 32 000 кВА на напряжение 6 и 6,3 кВ, у которых сопротивление изоляции после сушки лежало в пределах 2...18 мгом, тогда как по формулам оно должно было составлять 2,25...75 мгом. Из этого делается вывод, что степень влажности изоляции этих машин была неодинаковой и что для сопротивления изоляции нельзя установить строгой нормы. Сопротивление изоляции может отличаться от вычисленных значений на целый порядок, и при этом еще не происходит повреждения.

Поэтому при расчете сопротивления изоляции предлагается учитывать только рабочее напряжение и число пазов машины, а все остальные факторы учитывать путем введения некоторого коэффициента, определяемого опытным путем для данной конструкции изоляции:

$$r = f \frac{U}{z},$$

где U — рабочее напряжение, в;

z — число пазов машины;

f — коэффициент, определяемый для данной конструкции изоляции путем измерений на отдельных стержнях и собранных машинах, мгом/в .

Для стержней и секций в состоянии поставки, на которых производились опыты, величина f лежала в пределах порядка $10^{-1} \dots 10^{-2} \text{ мгом/в}$; для секций, бывших в эксплуатации в течение 2 лет, эта величина была более 1 мгом/в ; для изоляции, подвергавшейся увлажнению в воде, величина f лежала в пределах $0,17 \dots 10 \text{ мгом/в}$. Поскольку изоляция имела достаточно высокие пробивные напряжения, можно считать достаточной величину $f \approx 10^{-2} \text{ мгом/в}$. Анализ данных по сушке семи электрических машин, о которых упоминалось ранее, показывает, что эта величина практически достаточна.

Наконец, опыт говорит о том, что для машин напряжением $3 \dots 15 \text{ кв}$ с числом пазов от 50 до 500 достаточным является сопротивление изоляции в пределах $5 \dots 0,5 \text{ мгом}$ при $40 \dots 60^\circ \text{C}$, что соответствует сопротивлению $1 \dots 0,1 \text{ мгом}$

при 75°C и величинам $f = 0,33 \cdot 10^{-2} \dots 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ мгом/в}$. В эксплуатацию был включен ряд машин, у которых величина f лежала в этих пределах.

Показателем сильного увлажнения, требующего особой сушки, или наличия другого дефекта изоляции является только значительное снижение ее сопротивления по сравнению с рассчитанным по предлагаемой методике или же наличие большой разницы в сопротивлении изоляции отдельных частей обмотки (например, отдельных фаз).

Для машины, которая во время перевозки была защищена от дождя, достаточным является кратковременный нагрев до 75°C , длящийся 1...2 суток.

Рекомендуется контролировать ток утечки в промежутках между пробным пуском, испытанием на нагрев и другими испытаниями, так как величина токов утечки при этом приблизится к нужному значению и необходимость специальной сушки отпадает.

(А. Wichmann. ETZ — А, № 10, 1955.)

Кандидат техн. наук В. Б. Кулаковский



Заметки и письма

О КНИГЕ А. А. КЛИМОВА „ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ“

Достаточно ознакомиться с утвержденной программой курса «Электропривод в сельском хозяйстве» для факультетов механизации сельского хозяйства, чтобы убедиться в том, что книга А. А. Климова соответствует программе.

В главе «Общие основы электропривода машин» рассматриваются основные свойства и характеристики электроприводов машин для животноводства и в связи с этим описывается свойство различных электродвигателей как источника механической энергии. Здесь же (см. § 5, стр. 48—51) машины животноводческих хозяйств по свойствам механических характеристик подразделяются на основные группы. Как показал опыт у студентов сразу складываются определенные понятия об основных свойствах механических характеристик десятков машин, применяемых в животноводстве; в дальнейшем это способствует более глубокому изучению особенностей электрификации отдельных силовых процессов. Такой обобщенный метод характеристик приводных машин и станков, введенный в теорию электроприводов М. Г. Чиликиным, является весьма удачным. Непонятно поэтому, в чем усматривает Б. З. Зильберман в своей рецензии о книге (Электричество, № 3, 1956) обособленность теоретической части от практических вопросов.

Неправлен также упрек, будто автор книги поверхностно и чрезмерно элементарно изложил ряд разделов по электрификации животноводства. Книга в основном предназначена для студентов механиков, не имеющих достаточно глубокой предварительной электротехнической подготовки. Нельзя относить простоту, ясность и доступность изложения к числу недостатков книги.

Мы не можем согласиться с Б. З. Зильберманом также и в том, что книга якобы чрезмерно загромождена второстепенными материалами в ущерб вопросам электрификации животноводства; нельзя рассматривать электрификацию животноводства без животноводства, без его конкретных и специфических особенностей, а именно: нельзя выбор электропривода производить без учета потребной производительности машин; работу электровоза рассматривать безотносительно суточного грузооборота дороги и потребных тяговых усилий; расчет и устройство вентиляторов — без учета основных зоогигиенических требований животноводческих помещений и т. д.

Размещение учебного материала в книге произведено правильно на основе энерготехнологического признака классификации применений электрической энергии в сель-

ском хозяйстве (силовые, тепловые, биологические процессы и освещение).

Говоря о недостатках книги, следует отметить, что автору нужно было бы уделить больше внимания вопросам автоматизации производственных процессов в животноводстве и рациональным приемам эксплуатации важнейших электроустановок. Однако необходимо считаться с реальными возможностями автора, обусловленными установленным размером книги.

Имеющиеся в первом издании книги недостатки не являются принципиальными; они легко устранимы в последующих изданиях. Мы разделяем оценку книги, данную Главным управлением сельскохозяйственных вузов МВО СССР, рекомендовавшим книгу в качестве учебного пособия.

Опыт пользования книгой подтверждает наше мнение о данной книге.

В. И. Ефимов, Н. В. Худяков, Л. П. Сбитнев,
В. Э. Романовский, И. Р. Холин

Кафедра применения электрической энергии в сельском хозяйстве
Сталинградского сельскохозяйственного института

* * *

Материал книги А. А. Климова был использован на IV курсе факультета электрификации сельского хозяйства. На V курсе того же факультета материал книги был использован в дипломном проектировании.

В рецензии Б. З. Зильбермана содержится ряд правильных замечаний, но наряду с ними имеются и совершенно неправильные и даже ошибочные положения. Например, никак нельзя согласиться с замечанием рецензента, что в книгу следовало поместить таблицы для выбора электродвигателей (очевидно, всех исполнений), магнитных пускателей, предохранителей, ламп и т. д., а также поместить данные о различии стоимостей электродвигателей закрытого и защищенного типов (надо полагать также открытого и взрывобезопасного типов), быстроходных и тихоходных, различных типов светильников, рубильников, магнитных пускателей, проводки в трубах, проводки на изоляторах и т. д.

Если согласиться с рецензентом и поместить в книгу все то, что он указывает, то книга в значительной степени потеряла бы свое качество, так как в этом случае она содержала бы очень много перепечаток из каталогов,

прейскурантов, сметных справочников и, кроме того, повторяла бы материал, содержащийся в других курсах («Электрические машины», «Электропривод и автоматика», «Электрическое освещение и монтаж электроустановок»).

Нельзя согласиться также с замечанием, что в книгу следовало включить рассмотрение вопросов ремонта и эксплуатации магнитных пускателей, трансформаторных подстанций, реле давления водокачки, вибрационного регулятора напряжения, электродвигателей электрической изгороди для животных и др., так как это составляет предмет самостоятельной дисциплины.

Автор книги совершенно прав, когда он при коротких пробегах электровоза, т. е. при частых пусках повторно-кратковременного режима работы, выбирает меньшее передаточное соотношение. Здесь дело не только в росте общего махового момента, о чем говорит в своих доводах Б. З. Зильберман, но и в расходе энергии на каждый пуск, который пропорционален оборотам электродвигателя во второй степени. Этого Б. З. Зильберман не учел и допустил ошибку. Книга А. А. Климова правильно рекомендована как учебное пособие.

**В. И. Попов, Г. П. Осипов, В. С. Пискарев,
Е. Ф. Агафонов, П. Г. Дороднов,
В. И. Струкачев, Ю. А. Зайцев**

Кафедра применения электроэнергии в сельском хозяйстве Саратовского института механизации сельского хозяйства им. Калинина

НЕДООЦЕНКА ВОПРОСОВ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Государственным издательством сельскохозяйственной литературы выпущено второе издание учебного пособия по механизации и электрификации сельского хозяйства, написанное кандидатами техн. наук С. А. Иофиновым, Б. Г. Турбиным и А. А. Цыриным. При значительном объеме (47 уч.-изд. листов) вопросам электрификации сельского хозяйства уделено менее 10%, что нельзя признать правильным; тем более, что с кадрами электриков в системе сельского хозяйства дело обстоит хуже, чем с кадрами механиков. Авторы проявили недооценку значения подготовки кадров электриков для сельскохозяйственного производства. Раздел электрификации сельского хозяйства в книге оказался совершенно неразвитым. Кроме того, в ней недостаточно освещены важные вопросы экономики механизации и электрификации сельского хозяйства. Во многих разделах книги следовало уделить больше внимание применению различных приборов и устройств для автоматического управления и контроля; по отзывам многих специалистов современный уровень оснащенности мастерских совхозов, колхозов и мтс дает широкие возможности для применения автоматики в сельскохозяйственном производстве.

В конце книги в виде приложений даны подробные технические характеристики тракторов и автомобилей и даже основные показатели по тракторам, только еще подготовленным к выпуску. Но в приложениях не нашлось места для основных данных силовых и осветительных трансформаторов для сельскохозяйственных установок, асинхронных короткозамкнутых электродвигателей в защищенном исполнении и др. (кстати, на эти данные имеется ссылка в тексте, стр. 151), но в приложениях соответствующая таблица отсутствует.

В курсе совершенно не затронут вопрос о техническом уходе за электродвигателями и их ремонте. Между тем, именно в сельскохозяйственных установках имеет место частое нарушение самых элементарных правил по обслуживанию электродвигателей и уходу за ними.

Раздел электрических сетей совершенно не представлен в книге. А между тем сельскохозяйственные электрические сети имеют свои характерные особенности (большая протяженность, разбросанность, малая удельная нагрузка и т. д.), с которыми каждому сельскому электротехнику приходится считаться.

В разделе «Электрифицированный молотильный ток» было бы уместным отметить успешный опыт полной автоматизации всех производственных работ на току в Красnodарском районе.

Весьма мало освещен вопрос о магнитных пускателях МП, поступающих в большом количестве в комплекте с новейшими электрифицированными машинами для животноводства, водоснабжения и др. Работа МП в условиях сельскохозяйственного производства сопряжена иногда с исключительными трудностями вследствие больших падений напряжения в низковольтных сетях 0,4/0,22 кВ при пуске электродвигателей с короткозамкнутым якорем.

В книге совершенно не освещен вопрос о применении электричества в птицеводстве. А между тем давно известны: автоматически действующие инкубаторы, используемые в больших масштабах (360 000 яиц и более одновременно); электрические брудеры для цыплят; удлинение светового дня для повышения яйценоскости кур и т. д.

Для молодых техников следовало дать хотя бы краткие сведения о новейших методах применения токов высокой частоты в сельском хозяйстве (для закалки, сушки и т. д.).

Весьма скудно освещен вопрос об электросварке, несмотря на то, что она широко применяется при ремонте самых разнообразных сельскохозяйственных машин, а также для строительства и хозяйственных нужд.

В главе о ремонте сельскохозяйственного машинного оборудования было бы уместным дать рисунок и краткое описание контрольно-испытательного стенда для проверки автотракторного электрооборудования. Такие стенды имеются во многих сельскохозяйственных мастерских и хорошо себя зарекомендовали.

В разделе механизации поливки следовало указать на применение передвижных электронасосов и электрифицированных дальнеструйных дождевателей.

Для молодых техников было бы интересно получить хотя бы краткие сведения о применении электричества для ускорения выращивания ранних овощей и повышения их урожайности в теплицах и парниках. Полезно было бы дать хотя бы ссылку на опыты Ленинградского отделения ВИЭСХ по обогащению посевного зерна азотом при помощи электрического поля.

В разделе животноводства было бы уместным кратко изложить устройство простых и дешевых электрических проволочных заграждений.

Можно выразить крайнее сожаление, что книга, изданная в целом хорошо, страдает указанными недостатками. Если недооценка разделов электрификации вызвана соответствующим содержанием программы курса, применительно к которому авторы строили свою книгу, то приходится направить серьезный упрек в связи со всем сказанным выше также и к ГУУЗ Министерства сельского хозяйства СССР.

Инж. В. Н. Коновалов
г. Днепропетровск

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ К СТАТЬЯМ Н. Ф. РАКУШЕВА

Мне хочется отметить некоторые неточности, содержащиеся в статьях Н. Ф. Ракушева [Л. 1, 2, 3], представляющих в целом большой интерес. Неточности эти относятся главным образом к электростатике. Надеюсь, что мои замечания будут восприняты автором с благодарностью.

В статье [Л. 3, стр. 10] Н. Ф. Ракушев определяет напряженность поля E_A у поверхности расщепленного провода (точка А, рис. 5) путем суммирования напряженности электрического поля от провода 1 E_1 и напряженности поля от провода 2 E_2 . Однако таким образом вычислить напряженность поля нельзя.

Задача расчета поля двух цилиндров, заряженных одинаково, значительно сложнее и может быть решена точно при $n = 2$ [Л. 4] и с любой степенью точности при любом n методом многократных отображений в круге [Л. 5]. Расчеты этим методом показывают, что при обычном шаге расщепления напряженность E_{12} в пределах первого проводника можно считать неизменной. Как хорошо известно, при внесении цилиндра в однородное поле напряженность в точке А возрастает вдвое, что и учитывается в расчете. Н. Ф. Ракушев не учел этого обстоятельства и получил неверный результат. Кроме того, формула (14) получена Н. Ф. Ракушевым в нарушение правил

рующую искру и вызовет тем самым пробой срезающего разрядника 4 напряжением ГИН U_0 .

Описанный процесс предполагает относительное постоянство напряжения U_1 на конденсаторе C_2 , хотя в действительности последний через сопротивление r_3 будет разряжаться. Поэтому необходимо, чтобы $r_3 C_2$ было соответственно больше $r_2 C_1$. Так, при соотношении $r_3 C_2 / r_2 C_1 = 10$ напряжение на C_2 за время τ упадет меньше, чем на 14%, а при соотношении $r_3 C_2 / r_2 C_1 = 100$ напряжение на C_2 за то же время упадет меньше, чем на 1,4%. По тем же соображениям должно быть соблюдено $C_2 / C_1 \approx 100$.

В тех случаях, когда ГИН имеет не один—два, а много искровых промежутков, для запаливания разрядника 1 (рис. 1) желательно использовать импульс напряжения, возникающий после того, как пробьются все искровые промежутки ГИН.

Такой импульс U_ω можно подвести к разряднику 1 либо от специального делителя напряжения C_{d1}, C_{d2} , либо от нижнего шара срезающего разрядника 4, как это сделано на рис. 2. Нижний шар 4 заземлен в этом случае не глухо, а через большое сопротивление r_{01} . Для запаливания разрядника 1 использован импульс напряжения, возникающий на этом сопротивлении. Других отличий схема рис. 2 не имеет.

Описанные схемы импульсных испытаний срезанными волнами более совершенны, чем опубликованные в зарубежной литературе¹.

Кандидат техн. наук М. Ф. Пашин

¹ См. Электричество, стр. 78, № 3, 1955, а также в настоящем номере стр. 85.

Хроника

М. Г. БАШКОВА

18 августа 1956 г. после тяжелой болезни скончалась Мария Георгиевна Башкова, заведующая редакцией журнала «Электричество».

С 1922 г. М. Г. Башкова в течение 34 лет неустанно и преданно вела большую работу по подготовке и оформлению журнала «Электричество». Все свои силы М. Г. Башкова неизменно отдавала редакционной работе, ставя превыше всего интересы журнала и его читателей.



Широкий авторский коллектив журнала всегда ценил в М. Г. Башковой глубокую внимательность к подготовке в набор и к печати рукописей и чертежей. М. Г. Башкова отличалась

большой памятью, что постоянно содействовало высокому качеству оформления материалов и их нормальному движению.

За свою хорошую работу в редакции журнала «Электричество» М. Г. Башкова неоднократно была премирована. В 1955 г. приказом Министра электростанций СССР она была награждена значком «Отличник социалистического соревнования электростанций СССР».

Коллектив государственного энергетического издательства и редакции журнала «Электричество» сохранит светлую память о М. Г. Башковой на долгие годы.

Госэнергоиздат,
Редакция журнала
«Электричество»



ДИССЕРТАЦИИ

В ученых советах институтов Украинской ССР защищены следующие диссертации¹ на соискание ученой степени кандидата технических наук (с октября 1946 г.).

Днепропетровский горный институт им. Артема.
Н. А. Киклевич защитил 16 января 1948 г. диссертацию на тему: «Влияние неравномерного воздушного зазора на основные характеристики рудничных асинхронных электродвигателей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. П. Пироцкий и кандидат техн. наук, доц. Н. Е. Куваев.

Рассмотрено магнитное поле, возникающее в неравномерном воздушном зазоре асинхронного двигателя в результате воздействия первой гармоники н. с. Предложены способы измерения и контроля зазоров у рудничных электродвигателей во время работы в лабораторной обстановке и для некоторых типов — в условиях промышленной эксплуатации.

А. М. Мирошник защитил 18 июня 1953 г. диссертацию на тему: «Исследование многодвигательного электропривода механизмов хода многочерпаковых экскаваторов и транспортно-отвальных мостов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. П. Пироцкий и кандидат техн. наук, доц. И. Т. Жердев.

Исследованы вопросы совместной работы двигателей постоянного тока применительно к условиям многодвигательных электроприводов механизмов хода многочерпаковых экскаваторов и транспортно-отвальных мостов. Установлены основные закономерности, объясняющие влияние различных факторов на режимы работы двигателей. Разработаны основные положения подбора двигателей для многодвигательных электроприводов механизмов хода и настройки схем в производственных условиях.

Донецкий индустриальный институт им. Н. С. Хрущева.
В. К. Меунов защитил 26 января 1948 г. диссертацию на тему: «Динамическое торможение шахтных подъемных машин с приводом от асинхронного двигателя». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. П. Пироцкий, доктор техн. наук, проф. Ф. Н. Шклярский и кандидат техн. наук, доц. Р. М. Лейбов.

Предложен метод аналитического расчета тормозных характеристик, применение которого может снизить максимальные ошибки. Рассмотрены вопросы динамического торможения асинхронных двигателей: о коммутационных перенапряжениях, об односторонних магнитных притяжениях, об источниках постоянного тока для возбуждения статора и др. Построены диаграммы управления асинхронным подъемным двигателем для всех систем шахтных подъемных установок.

Н. И. Колосов защитил 19 января 1953 г. диссертацию на тему: «Определение оптимального зарядного режима аккумуляторных батарей рудничных электровозов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. А. Волотковский и проф. Е. М. Скублевский.

Киевский политехнический институт. **П. Н. Малахов** защитил 26 января 1948 г. диссертацию на тему: «Технологический процесс как основа привода металлорежущих станков типа токарные». Официальные оппоненты: проф. С. С. Рудник и кандидат техн. наук, доц. С. А. Картавов.

Выведены формулы для определения увеличения производительности при переменной твердости и крепости металла с бесступенчатым приводом по сравнению со ступенчатым приводом.

А. И. Петров защитил 28 апреля 1949 г. диссертацию на тему: «Феррорезонансный контур для автоматизации управления асинхронными двигателями с кольцами». Официальные оппоненты: член-корр. АН УССР, проф. С. И. Тетельбаум и кандидат техн. наук, доц. П. Г. Городецкий.

Найдено оригинальное решение автоматизации управления асинхронного двигателя с кольцами, основанное на

использовании свойств последовательного феррорезонансного контура.

П. П. Орнатский защитил 4 июля 1949 г. диссертацию на тему: «Исследование различных схем электронно-ламповых ваттметров и детекторных фазометров». Официальные оппоненты: проф. П. В. Окулов и кандидат техн. наук, доц. П. Г. Городецкий.

Л. А. Радченко защитил 4 июля 1949 г. диссертацию на тему: «Двухдвигательный электропривод механизмов от жестко-связанных шунтовых машин постоянного тока». Официальные оппоненты: член-корр. АН УССР, проф. С. И. Тетельбаум и кандидат техн. наук, Л. Н. Дашевский.

Исследовано поведение двухдвигательного электропривода в различных режимах при наличии неидентичности характеристик, вызванной разными значениями полезных магнитных потоков и сопротивлений цепей главного тока. Исследования охватывают: ступенчатый пуск, динамическое торможение, реверсирование, режимы работы двухдвигательного электропривода в системе Леонарда.

И. М. Чиженов защитил 4 июля 1949 г. диссертацию на тему: «Компенсация реактивной мощности в сетях с ионными преобразователями». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Л. Наумов, кандидат техн. наук, доц. А. И. Вишневский и кандидат техн. наук, доц. П. Г. Городецкий.

Дан критический обзор существующих методов исследования режимов преобразования в установках, содержащих ионные преобразователи. Произведен анализ мгновенных мощностей преобразовательной установки в отношении влияния высших гармонических кривой первичного тока на величину угла сдвига фаз между первичным током и напряжением сети. Дано исследование баланса интегральных величин активных и реактивных мощностей в зависимости от угла сдвига фаз между первичным током и напряжением сети. Доказана принципиальная возможность использования преобразовательной установки в качестве генератора реактивной мощности.

М. Е. Иерусалимов защитил 23 июня 1950 г. диссертацию на тему: «Профилактические испытания аппаратов изоляторов в энергосистемах методом рентгенодефектоскопии». Официальные оппоненты: проф. П. В. Окулов и кандидат техн. наук, доц. П. Г. Городецкий.

Дан обзор процессов разрушения и старения изоляции, а также изменений в связи с этим электрических характеристик ее. Рассмотрены методы испытаний, основанные на фиксации внутренних разрядов в изоляции при наличии в ней дефектов. Исследован метод испытаний мастико-наполненных вводов — рентгенодефектоскопия.

М. Я. Броун защитил 13 октября 1950 г. диссертацию на тему: «Термическая теория дугового разряда электросварочного режима». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. К. К. Хренов и кандидат техн. наук, доц. А. И. Вишневский.

Определена температура сварочной дуги при различных электрических режимах, а также установлено влияние стабилизирующих присадок на температуру дуги.

С. А. Ребров защитил 16 марта 1951 г. диссертацию на тему: «Исследование рекуперативного режима электродвигателей смешанного возбуждения на городском транспорте». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. М. Постников и кандидат техн. наук Н. Г. Остапенко.

Проведенные исследования позволяют разработать мероприятия по наиболее полному использованию рекуперации на троллейбусах и решить вопрос о целесообразности применения электродвигателей смешанного возбуждения на трамвайных вагонах.

И. П. Филь защитил 1 июня 1952 г. диссертацию на тему: «Исследование вопроса о снижении веса и увеличении мощности шахтных электросверл путем их перевода на ток повышенной частоты». Официальные оппоненты:

¹ С диссертациями можно ознакомиться в Государственной библиотеке имени Ленина в Москве и в библиотеках институтов по месту защиты.

доктор техн. наук, проф. И. М. Постников и доктор техн. наук В. Л. Иносов.

П. Ф. Рыбченко защитил 29 декабря 1952 г. диссертацию на тему: «Авторегулирование напряжения в шахтных электрических сетях». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. М. Постников и доц. Д. П. Костенко.

Автором предложен метод регулирования напряжения шахтных электрических сетей. Метод основан на известном принципе изменения параметров питающего трансформатора путем подмагничивания его сердечника постоянным током, получаемым от сети переменного тока через селективные выпрямители.

Л. А. Рахманов защитил 9 февраля 1953 г. диссертацию на тему: «Исследование электрических схем приборов, применяемых для контроля влажности материалов». Официальные оппоненты: член-корр. АН УССР, проф. А. Д. Нестеренко и кандидат техн. наук И. В. Акаловский.

М. Г. Ахматов защитил 30 декабря 1953 г. диссертацию на тему: «Исследование способов уменьшения колебаний синхронного двигателя при пульсирующей нагрузке». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. Я. Иванченко и доц. Д. П. Костенко.

А. М. Воинов защитил 30 декабря 1953 г. диссертацию на тему: «Обобщенный анализ уравновешивания мостовых схем переменного тока». Официальные оппоненты: проф. П. В. Окулов и кандидат техн. наук Ф. А. Катков.

Е. П. Красовский защитил 30 декабря 1953 г. диссертацию на тему: «Разработка способа получения устойчивых малых скоростей в электроприводах с асинхронным двигателем». Официальные оппоненты: член-корр. АН УССР Б. Е. Патон и кандидат техн. наук А. Г. Ивахненко.

Предложены системы регулирования, связанные с изменением сопротивления в роторной цепи. Эти системы регулирования позволяют получить жесткие механические характеристики при низких скоростях двигателя, а также в режиме торможения двигателя противовключением.

А. В. Новиков защитил 30 декабря 1953 г. диссертацию на тему: «Асинхронные моменты синхронных машин с динамической емкостью в цепи возбуждения». Официальные оппоненты: доктор техн. наук В. Л. Иносов и кандидат техн. наук С. И. Иноземцев.

Рассмотрен один из методов увеличения демпферного момента, создаваемого обмоткой возбуждения. Метод основан на уменьшении индуктивности обмотки возбуждения путем применения динамической емкости подобно тому, как это было осуществлено в асинхронных двигателях с целью повышения их коэффициента мощности.

К. К. Балашов защитил 1 марта 1954 г. диссертацию на тему: «О возможности разработки универсального метода расчета трансформаторов и улучшения отечественных серий трансформаторов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. М. Постников и кандидат техн. наук, доц. Д. П. Костенко.

Львовский политехнический институт. В. А. Волохова защитила 1 декабря 1948 г. диссертацию на тему: «Некоторые вопросы проверки трансформаторов на напряжение». Официальные оппоненты: проф. К. Б. Карандеев, кандидат техн. наук, доц. Ю. Е. Неболюбов и кандидат техн. наук, доц. Н. Н. Шумиловский.

Предложен метод и выполнена установка, обеспечивающая проверку с погрешностью: по напряжению $\pm 0,02\%$ и по фазовому углу $\pm 0,3$ минуты.

М. А. Митин защитил 1 декабря 1948 г. диссертацию на тему: «Исследование технологии изготовления купроксных выпрямителей измерительного типа». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Н. Кияница и инж. А. К. Михайлов.

Е. М. Иоффе защитил 4 апреля 1949 г. диссертацию на тему: «К вопросам конструирования и расчета основных элементов стрелочных электроизмерительных приборов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Н. Кия-

ница, инж. П. Ф. Ардашев и инж. А. К. Михайлов.

Рассмотрены следующие вопросы: 1) технические условия на электроизмерительные приборы и их элементы; 2) конструирование и расчет элементов, общих для большинства систем электроизмерительных приборов; 3) конструкция и расчет добавочных сопротивлений и шунтов; 4) характеристики приборов в отношении надежности их работы.

Н. Н. Карелин защитил 29 июня 1944 г. диссертацию на тему: «Получение однородного магнитного поля внутри цилиндрических катушек методом шунтирования витков». Официальные оппоненты: проф. К. Б. Карандеев и инж. А. К. Михайлов.

Предложенный новый вариант решения задачи получения однородного поля в средней части цилиндрической катушки может найти практическое приложение в электроизмерительной технике и в других областях электротехники.

Л. З. Тылевич защитил 29 июня 1949 г. диссертацию на тему: «Исследование системы Леонарда со смягчающей машинной методом электро-механических аналогий». Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники Т. П. Губенко и кандидат техн. наук Л. Р. Карнюшин.

Рассмотрены способы ограничения пика тока в цепи якорей главных машин системы Леонарда в переходных режимах, в частности, основанные на применении для этих целей демпфирования обмотки возбуждения генератора посредством «смягчающей машины».

П. В. Сергеев защитил 29 июня 1949 г. диссертацию на тему: «Исследование работы трехфазного индукционного двигателя при некоторых случаях искусственной несимметрии напряжения». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Н. Кияница и кандидат техн. наук, доц. В. С. Рахита.

Н. А. Николаев защитил 29 июня 1949 г. диссертацию на тему: «О методах профилактических испытаний подстанционных изоляторов». Официальные оппоненты: проф. Г. З. Сокольниковский, доктор техн. наук Н. Н. Шумиловский и инж. Н. Л. Сахновский.

Предложен оригинальный метод дифференциального неуравновешенного моста для измерения диэлектрических потерь. Схема позволяет производить измерения не только при испытательном напряжении в 10 кВ, но и при рабочих напряжениях в 35 и 110 кВ.

С. Р. Буачидзе защитил 24 февраля 1950 г. диссертацию на тему: «Проблема регулирования электрических станций и систем при наличии звена-линии постоянного тока». Официальные оппоненты: проф. Г. З. Сокольниковский и инж. А. Р. Нейман.

Б. С. Синицын защитил 24 мая 1950 г. диссертацию на тему: «Дифференциальные электроизмерительные приборы с меднозакисными выпрямителями». Официальные оппоненты: доктор техн. наук Н. Н. Шумиловский и инж. П. Ф. Ардашев.

И. А. Захария защитил 5 июля 1950 г. диссертацию на тему: «Методика экспериментального исследования погрешностей выпрямительных приборов по форме кривой». Официальные оппоненты: доктор техн. наук Н. Н. Шумиловский и инж. Л. А. Синицкий.

Предложенная методика исследования с помощью генератора несинусоидальных колебаний может быть применена для выяснения влияния несинусоидальных токов и напряжений на работу других цепей, содержащих в своей схеме нелинейные элементы.

С. И. Кирпатовский защитил 30 мая 1951 г. диссертацию на тему: «Некоторые вопросы теории электрических датчиков». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Н. Шумиловский, инж. А. М. Ракович и инж. Л. А. Синицкий.

Предложен ряд оригинальных классификационных схем, построенных по разным признакам. Разработан метод анализа и учета динамических погрешностей.

В. Л. Анхимюк защитил 20 июня 1951 г. диссертацию на тему: «Исследование работы асинхронно-

синхронного каскада в двухзонном регулировании». Официальные оппоненты: проф. Г. З. Сокольников и кандидат техн. наук, доц. Л. В. Карнюшин.

Б. И. Швецкий защитил 20 июня 1951 г. диссертацию на тему: «Раздельное усовершенствование мостов переменного тока». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Н. Шумиловский, инж. Л. А. Синицкий и инж. В. К. Днепровский.

Разработаны и исследованы два метода раздельного уравнивания — фазовый и амплитудный. Разработаны схемы индикаторов для раздельного уравнивания. Приведен анализ некоторых многоплечных мостов с точки зрения пригодности их для раздельного уравнивания.

В. А. Кочан защитил 24 сентября 1952 г. диссертацию на тему: «Дифференциальные амперметры и вольтметры с меднозакисными выпрямителями». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Н. Шумиловский и кандидат техн. наук В. Н. Михайловский.

В. И. Лукин защитил 23 апреля 1953 г. диссертацию на тему: «Метод электромеханического моделирования установок вращательного бурения (роторного и погруженного двигателя) и исследование некоторых вопросов работы их электропривода». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Н. Шумиловский и кандидат техн. наук, доц. Е. М. Тирман.

Б. В. Мочалов защитил 30 июля 1953 г. диссертацию на тему: «Анализ некоторых свойств комплексных компенсаторов переменного тока». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Н. Шумиловский и инж. Г. Г. Зубов.

Л. Я. Мизюк защитил 3 июля 1953 г. диссертацию на тему: «Электронные фазочувствительные и дифференциальные нулевые указатели переменного тока и их применение». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. Ф. Куликовский и кандидат техн. наук, доц. Ю. Т. Величко.

Предложено несколько новых схем, исследование которых показало их практическую ценность. Разработаны основные положения выбора схем указателей.

И. Ф. Клиторин защитил 3 июля 1953 г. диссертацию на тему: «Некоторые вопросы автоматизации градуировки и поверки приборов электромагнитной системы». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Н. Шумиловский и инж. Г. Г. Зубов.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что возможно создать аппаратуру для полуавтоматической градуировки и поверки приборов кл. 1,5 электромагнитной системы на конвейере завода-изготовителя. Разработана методика расчета основных параметров и погрешностей схемы.

В. А. Петровский защитил 10 июля 1953 г. диссертацию на тему: «Теория и расчет неуравновешенных мостов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. Ф. Куликовский и инж. В. М. Помпеев.

Л. П. Попко защитил 26 декабря 1953 г. диссертацию на тему: «Расчет и проектирование компенсаторов постоянного тока». Официальные оппоненты: член-корр. АН УССР, проф. А. Д. Нестеренко и инж. Г. Г. Зубов.

Г. И. Денисенко защитил 25 февраля 1954 г. диссертацию на тему: «Исследование совместной работы сети переменного и передачи постоянного тока при нормальных режимах». Официальные оппоненты: проф. А. В. Орловский и инж. А. Р. Нейман.

Выведены аналитические зависимости, определяющие основные характеристики электропередачи постоянного тока в системе переменного тока и предложен оригинальный графоаналитический метод их построения.

Метод позволяет определить характеристики электропередачи постоянного тока при различных условиях ее работы совместно с сетью переменного тока.

М. Г. Люков защитил 25 февраля 1954 г. диссертацию на тему: «Некоторые вопросы автоматиче-

ского регулирования дуговых сталеплавильных печей». Официальные оппоненты: проф. Т. П. Губенко и инж. Л. А. Синицкий.

Р. Л. Полосухина-Краевская защитила 25 февраля 1954 г. диссертацию на тему: «Управление двигателем постоянного тока от генератора с тремя обмотками возбуждения». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. М. Постников и кандидат техн. наук, доц. Л. В. Карнюшин.

Разработана условно-экспериментальная методика анализа механических характеристик исследуемого электропривода и переходных процессов в нем при пуске, реверсе и торможении, а также при коротком замыкании в главной цепи. Дан анализ влияния рассеяния магнитных потоков реакции якоря и расстройств коммутации на протекание переходных процессов.

В. И. Стульников защитил 25 марта 1954 г. диссертацию на тему: «Некоторые вопросы теории и расчета динамического торможения асинхронных двигателей в применении к шахтным подъемным установкам». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. В. Горохов, кандидат техн. наук, доц. В. С. Ракита и кандидат техн. наук Н. В. Власенко.

М. А. Чернык защитил 25 марта 1954 г. диссертацию на тему: «К вопросу расчета переходных процессов в машинах постоянного тока с насыщенной магнитной системой». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. В. Горохов, кандидат техн. наук В. Т. Бардачевский и инж. Н. Л. Сахновский.

Показана целесообразность применения метода кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания при расчете переходных процессов в системе генератор—двигатель с учетом насыщения магнитной системы генератора. Произведено исследование переходных процессов в каскадной схеме возбуждения с использованием в качестве возбуждателя машины постоянного тока смешанного возбуждения с насыщенной магнитной системой.

Одесский политехнический институт. **Л. Г. Живов** защитил 28 июня 1947 г. диссертацию на тему: «Электрический регулятор замедления рудиничной подъемной машины». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. А. Добровольский и кандидат техн. наук, доц. Л. Б. Эрлих.

Приведен анализ работы аппарата, автоматически останавливающего подъемную систему.

Выявлен оптимальный диапазон нагрузок, при котором регулятор замедления нормально работает.

Объединенный совет институтов теплотехники и электротехники АН УССР. **Д. С. Колобков** защитил 23 октября 1946 г. диссертацию на тему: «Автоматическое повторное включение транзитных линий электропередачи». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. И. Гребень и кандидат техн. наук, доц. Л. В. Цукерник.

Предложен не требующий большой затраты времени графический метод расчета АПВ.

Г. И. Шерман защитил 16 апреля 1947 г. диссертацию на тему: «Эксплуатационные характеристики синхронных генераторов с учетом насыщения». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. И. Гребень и кандидат техн. наук, доц. Л. М. Петрова.

Рассмотрены методы определения эксплуатационных характеристик установившегося режима синхронных генераторов и предложены новые методы, проще учитывающие асимметрию и насыщение магнитной цепи.

В. К. Лебедев защитил 28 июня 1948 г. диссертацию на тему: «Электромагнитные расчеты некоторых типов трансформаторов и дросселей для дуговой сварки». Официальные оппоненты: действительный член АН УССР К. К. Хренов и кандидат техн. наук, доц. П. Г. Городецкий.

Разработан способ расчета индуктивности трансформаторов, учитывающий кривизну обмоток и основанный на методе наложения обмоток с гармоническим законом распределения плотности тока в осевом направлении. Рассмотрена регулировочная характеристика трансформатора с подвижной обмоткой. Предложен новый способ расчета

дросселя, основанный на его замене эквивалентным трансформатором.

Ф. А. Катков защитил 24 декабря 1949 г. диссертацию на тему: «Регистрация, контроль и эталонирование промышленной частоты переменного тока». Официальные оппоненты: проф. П. В. Окулов и кандидат техн. наук В. Л. Иносов.

Приведены результаты разработки высокочувствительного регистрирующего частотомера на узкий диапазон измерения промышленной частоты переменного тока. Выведены выражения для чувствительности и температурной погрешности частотомера. Изложены результаты разработки высокочувствительного реле частоты вибрационной системы. Рассмотрены требования, предъявляемые к реле частоты и условия их выполнения.

К. С. Ройстачер защитил 25 марта 1950 г. диссертацию на тему: «Способы уменьшения погрешности однопроводных трансформаторов тока, встроенных в масляные выключатели». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Д. Нестеренко и кандидат техн. наук И. М. Сибота.

Даны анализ погрешностей трансформаторов тока и обзор существующих методов уменьшения погрешностей этих трансформаторов. Рассмотрены способы уменьшения погрешностей однопроводных трансформаторов тока путем включения в одну цепь двух трансформаторов тока с последовательным и параллельным соединением вторичных обмоток трансформаторов. Рассмотрен способ уменьшения погрешностей однопроводных трансформаторов тока путем подмагничивания их сердечников.

В. Л. Бенин защитил 1 июля 1950 г. диссертацию на тему: «Выпрямительно-дроссельная система автоматического регулирования активной мощности генераторов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук И. И. Гребень и инж. А. С. Тулин.

Н. А. Качанова защитила 24 февраля 1953 г. диссертацию на тему: «Исследование устойчивости дальних электропередач при различных способах повышения эффективности промежуточных синхронных компенсаторов». Официальные оппоненты: действ. член АН УССР С. А. Лебедев и кандидат техн. наук А. Б. Будницкий.

Рассмотрены: увеличение механической инерции, уменьшение реактивного сопротивления цепи, искусственное демпфирование, автоматическое регулирование возбуждения и ударная форсировка возбуждения промежуточных синхронных компенсаторов.

В. Е. Крутикова защитила 6 июня 1953 г. диссертацию на тему: «Влияние регуляторов скорости первичных двигателей на устойчивость дальних электропередач». Официальные оппоненты: действ. член АН УССР С. А. Лебедев и кандидат техн. наук А. И. Кухтенко.

Б. Е. Куйбышин защитил 24 июня 1953 г. диссертацию на тему: «Исследование магнитных устройств, подмагничиваемых переменным током». Официальные оппоненты: доктор техн. наук В. Л. Иносов и кандидат техн. наук, доц. Л. Л. Рожанский.

На основе обнаруженного релейного эффекта создан ряд новых бесконтактных реле: максимального тока, максимального и минимального напряжений, максимальной и минимальной частоты; промежуточное реле в одно- и двухкаскадном исполнении и реле защиты линий питания от замыкания на землю. Показано, что устройства, подмагничиваемые переменным током, могут применяться не только в качестве реле или трансформаторов тока, но и для выполнения ряда других функций.

А. В. Федоров защитил 22 апреля 1954 г. диссертацию на тему: «Измерения петле гистерезиса магнитомягких материалов при больших скоростях перемагничивания пятидесяти-перiodным переменным током». Официальные оппоненты: проф. П. В. Окулов и кандидат техн. наук Б. Е. Куйбышин.

Рассмотрены вопросы, касающиеся возможности измерения петле гистерезиса при питании образцов током промышленной частоты с временами перемагничивания в мсек и доли мсек при помощи вибраторного и электронного осциллографов, прибора с механическим прерывателем и прибора с тиристорным прерывателем.

Харьковский политехнический институт имени В. И. Ленина. **Л. А. Гельбух** защитил 7 февраля 1948 г. диссертацию на тему: «Анализ параметров индукционного реле с цилиндрическим ротором». Официальные оппоненты: проф. А. Л. Матвеев, кандидат техн. наук, доц. А. П. Сукачев и инж. И. Ю. Готлибович.

На основе решения уравнений Максвелла выведены формулы для движущего, а также тормозящего электро-механических моментов. Формулы дают возможность установить зависимость характеристик реле от конструктивных параметров и определить оптимальные значения последних.

В. С. Борисоглебский защитил 9 апреля 1949 г. диссертацию на тему: «Исследование гашения электрической дуги в продольных щелях». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Р. Л. Аронов и кандидат техн. наук, доц. Ф. Т. Прокопюк.

Выведены количественные связи, позволяющие найти оптимальные конструктивные размеры камер для заданных условий.

С. Н. Баженов защитил 28 июня 1949 г. диссертацию на тему: «Компандированный синхронный генератор с возбуждением от механического выпрямителя». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. А. Городский, доктор техн. наук, проф. Г. И. Штурман и кандидат техн. наук, доц. П. В. Цукерник.

Предложенная схема возбуждения синхронного генератора через механический выпрямитель может быть применена для генераторов мощностью до 100 кВА.

А. И. Тупицын защитил 19 июня 1953 г. диссертацию на тему: «Частотные методы расчетов систем автоматического регулирования». Официальные оппоненты: проф. Б. Ф. Васьур и кандидат техн. наук, доц. И. Я. Соколинский.

Рассмотрены вопросы расчета переходных процессов и качественной оценки динамических свойств систем автоматического регулирования по частотным характеристикам и устанавливаются связи между частотными характеристиками и интегральными оценками переходных процессов.

В. Ф. Гайдамак защитил 12 марта 1954 г. диссертацию на тему: «Работа гидроэлектромеханического привода подъема груза мостового электрического крана». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Б. П. Давыдов и кандидат техн. наук, доц. Д. Я. Алексапольский.

На основе опыта доказана целесообразность применения гидромфты в приводе механизма подъема крана.

Д. В. Столяров защитил 12 марта 1954 г. диссертацию на тему: «Автоматическое регулирование напряжения генераторов угольными регуляторами». Официальные оппоненты: доктор техн. наук М. В. Мееров и кандидат техн. наук, доц. Ф. А. Ступель.

Л. И. Абрамова защитила 21 мая 1954 г. диссертацию на тему: «Исследование некоторых переходных процессов в электрической системе с дальней линией передачи 400 кВ». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. А. Веников и кандидат техн. наук Л. И. Лизунов.

Автором предложено уравнение для определения динамических перенапряжений в системе, содержащей участок продольно-компенсированной линии передачи.

Доцент А. С. Сергеев



К. В. ЕГОРОВ. ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. Стр. 456, ц. 11 руб. 10 коп. Госэнергониздат, 1955. Допущено Главным управлением политехнических и машиностроительных вузов Министерства высшего образования СССР в качестве учебного пособия для электротехнических и энергетических высших учебных заведений и факультетов.

В отличие от многих других изданных за последнее время книг по автоматическому регулированию, рассматриваемая книга не претендует быть монографией. В ней почти нет изложения результатов собственных работ автора. Путем тщательной обработки огромного количества разнообразных сведений и критической оценки различных взглядов в области автоматического регулирования автор пытался создать краткое учебное пособие.

В книге в равной мере рассмотрены как методы дифференциальных уравнений, так и частотные методы. Автору не удалось устранить некоторые серьезные недостатки. Объем рассматриваемых в книге систем не соответствует их практическому значению. На практике распространяются главным образом нелинейные системы с постоянной скоростью сервомотора с электронными усилителями и устройством форсировки — изодромом (регуляторы ВТИ, ЦЛА и др.). К сожалению, это важное устройство — изодром — не рассмотрено в книге.

Главными же недостатками книги являются следующие: 1) не рассмотрены ни системы регулирования по возмущению (нагрузке), ни комбинированные системы; 2) упущена из виду основная задача статического регулирования — о компромиссной настройке.

Как указывалось, учебное пособие предназначено для электриков и энергетиков. Вспомним, какие системы регулирования применяются на современной электростанции. В котельной электростанции нет ни одного регулятора, который не был бы компаундирован по нагрузке. В электрической части электростанции нет ни одного регулятора напряжения, в котором не предусмотрена измерительная связь по реактивному току нагрузки. Повсеместно распространенная система компаундирования генераторов по току представляет классический пример регулирования по нагрузке, по так называемому принципу Понселе. Этот принцип является вполне пригодным в случае наличия саморегулирования объекта. За весьма редкими исключениями, все системы, применяемые на электростанциях, являются системами комбинированными, с воздействием по нагрузке. Заметим, что речь идет не о каком-то второстепенном факторе, а о весьма существенном и принципиальном качестве современных систем регулирования. Тем не менее уже на 18-й странице автор ограничился «только регуляторами с замкнутой цепью воздействия», т. е. системами без компаундирующих связей по нагрузке. На стр. 20 автор без всяких оговорок утверждает, что система компаундирования «работает с замкнутой цепью воздействия». Известно, что при допущении, что нагрузка генератора не изменяется при малых колебаниях напряжения, данная система является образцом разомкнутой системы регулирования, в которой автоколебания невозможны. Наличие замкнутой цепи в начертании схемы еще не означает наличия замкнутой цепи передачи воздействия. И вот, в книге упущены все основные положения теории комбинированных систем регулирования. В частности, не показано влияние выбора коэффициентов компаундирующих связей на начальные условия движений, не рассмотрены условия инвариантности регулируемой величины (работа академика В. С. Кулебакина и др.), не указано, что применение регулирования по нагрузке не освобождает исследователя от необходимости выбора так называемой компромиссной настройки системы и т. д.

Следуя, повидимому, своим предшественникам по пособиям в области автоматического регулирования, автор книги почти не уделил внимания важному вопросу о точности систем в установившемся и динамическом режиме. В связи с этим упущена из виду основная задача настройки статических систем, сформулированная И. А. Вышнеградским так: «без статизма нет регулятора». При повышении точности установившегося режима ухудшаются динамические качества системы. При настройке подавляющего большинства систем приходится искать так называемую компромиссную настройку, при которой точность установившегося режима и точность динамических режимов достаточны.

Повидимому, принципиально неправильно исследовать динамику систем в отрыве от статики (т. е. так, как это делается во многих местах книги). Понятие точности систем не анализируется. В книге не указаны условия, при которых снимается необходимость в компромиссной настройке, не рассмотрены основные показатели точности системы при действии на нее нескольких возмущений (что всегда имеет место). Ясно, что коэффициент статизма по одному возмущению не может быть достаточной характеристикой точности. То же можно сказать и о квадратичной ошибке, значения которой для различных возмущений будут совершенно различными.

Указанные недостатки весьма значительны, они отразились на всем содержании рецензируемой книги. Правда, такие же недостатки свойственны почти всем другим имеющимся учебным пособиям по автоматическому регулированию.

Перейдем к более мелким замечаниям.

В процессе изложения автор использует термины, ранее не поясненные. Например, на стр. 11 появляется термин «регулируемый параметр», фактически не определенный ранее, и др. Для учебного пособия это недопустимо.

Следящая система не изменяет регулируемую величину по определенному закону (стр. 15). Наоборот, она заставляет ее следовать за изменением величин, изменение которых нельзя заранее предусмотреть, т. е. по неопределенному закону.

Под термином «компенсационная система» обычно понимают систему, действующую по принципу Ползунова — Уатта. На странице же 20 система компаундирования именуется «компенсирующей системой», что вносит путаницу.

Регулятор фиг. 2-23 практически не работоспособен, так как втяжной электромагнит не может создать пропорционального перемещения при наличии трения. Пример искусственный и потому неудачный.

Неясно, что понимает автор под термином «статическая точность» (стр. 44). Повидимому, либо коэффициент статизма, либо зону нечувствительности. Как уже указывалось, ни то, ни другое не характеризует достаточно полно точность установившегося режима. Коэффициент статизма по основному возмущению может быть равным нулю, и система тем не менее может быть при этом маложесткой, т. е. недостаточно точной.

На стр. 46 излагается линеаризация уравнений, в то же время не указывается цель этого преобразования. Напомним, что линеаризация получила широкое применение только в связи с тем, что приближенные линеаризованные уравнения дают точный ответ на вопрос об устойчивости (теорема Ляпунова).

Вряд ли следует относить механический дифференциал к чувствительным элементам (стр. 56).

Применение терминов «регуляторы постоянного параметра», «программные регуляторы» и «регуляторы следования» (стр. 145 и далее) вместо обычных «система стабилизации», «система программного регулирования» и «следящая система» вряд ли можно признать удачным.

В схемах регуляторов (стр. 129—173) автор изображает связи по нагрузке (фиг. 4-14, 4-18, 4-21 и др.), но не дает ни должного объяснения. Без достаточного объяснения упомянут и регулятор шага винта самолета (стр. 173). Это типичная система так называемого экстремального регулирования, которое в данной книге даже не упоминается, что также следует отнести к упущениям.

Разделы «Связь между операторами замкнутой и разомкнутой системы» и «Статизм регулирования» (стр. 211—212) написаны неудовлетворительно. Приведенные здесь выражения действительны только для одноконтурных систем без внутренней обратной и без компаундирующих связей по нагрузке, т. е. практически почти никогда не могут быть использованы, так как столь простые системы встречаются на практике редко (чаще всего в области простых следящих систем).

Следовало бы пояснить разницу между усредненным и местным значениями коэффициента статизма.

Изображение статистических характеристик на структурной схеме (стр. 214, 216 и далее) обязательно следует дополнить изображением на них предельных положений рабочей точки (расчетом пределов регулирования).

Материал, относящийся к D -разбиению, можно было бы сократить или вообще не помещать в учебном пособии. Достаточно, если этот материал будет опубликован в журнальных статьях и монографиях. D -разбиение эффективно только для сложных систем, которые в учебном пособии не могут рассматриваться. Кстати, К. В. Егоров в качестве примера производит D -разбиение в комплексной плоскости параметра A , который никогда не бывает комплексным (стр. 276). Это по крайней мере нелогично.

Аппарат D -разбиения не учитывает показателей, не связанных с устойчивостью (коэффициенты связей по возмущениям, установившаяся ошибка и др.). Потому он не должен использоваться для исследования качества и тем более для выбора настройки и синтеза систем (стр. 370).

Глава седьмая, относящаяся к исследованию качества процессов, требует переработки в связи с тем, что здесь опущена задача компромиссной настройки с учетом установившейся ошибки (статическая ошибка для систем стабилизации и ошибка следования для следящих систем). Особенно неудовлетворительно написан раздел «Определение начальных условий». Этот вопрос обязательно должен быть связан с теорией комбинированного регулирования.

Следует указать, что при преобразовании уравнения к безразмерному виду Вышнеградского (стр. 304) степень устойчивости изменяет размерность, а следовательно, и величину. Неучет этого обстоятельства приводит к ошибкам.

Раздел, посвященный интегральным оценкам (стр. 305), следует расширить, и, в частности, дать формулы и примеры определения квадратичных ошибок. Этот раздел заслуживает значительно большего внимания.

Важный раздел «Синтез систем автоматического регулирования по логарифмическим частотным характеристикам» следовало бы расширить и дать более наглядные примеры (один пример, помещенный в конце книги, недостаточен).

В главе девятой сделана попытка изложить элементы экспериментального исследования систем автоматического регулирования. Приведенный здесь материал полезен, но весьма односторонен (выбран в значительной мере произвольно и, кроме того, требует обновления). Повидимому главное внимание следовало бы уделить только способам

снятия амплитудно-фазовых характеристик (в том числе способом трех векторов).

Материал, помещенный в главе десятой, вряд ли можно назвать «примерами расчетов систем автоматического регулирования». Действительно, первый пример «Расчет регулятора температуры» содержит только проверку устойчивости. А где же статистические характеристики элементов, где согласование положения на них рабочей точки (пределов регулирования)? Нет ни исследования качества процессов, ни определения показателей точности установившегося режима. Конструктивный расчет элементов не производится. Почти те же замечания можно сделать в части других примеров. Здесь можно найти и кривые D -разбиения по коэффициенту усиления (для системы 3-го порядка, что абсурдно) и в некоторых примерах частотные и трапециoidalные характеристики, но нет того, что называется расчетом систем. Особенно наглядно это можно показать на примере расчета регулятора напряжения (стр. 427), если сравнить текст книги с примерным расчетом систем регулирования напряжения, утвержденным Министерством электростанций СССР, применяемым на практике. Почти ничего общего в них нет.

В книге уделено недостаточное внимание следящим системам. Некоторые сведения о теории следящих систем несколько неожиданно даются в примере расчета следящей системы, который, правда, разработан более тщательно, чем другие примеры. Здесь (мелким шрифтом) даются такие важные определения, как определение добротности следящей системы (называемой почему-то коэффициентом усиления) и способ ее нахождения (стр. 436). Главные сведения о следящих системах должны быть помещены в основном тексте книги и значительно расширены.

Книга тщательно отредактирована и хорошо издана. Ряд вопросов (разделение звеньев, критерии устойчивости, сведения о векторах и др.) изложены в ней точно и кратко.

В целом рецензируемая книга удовлетворяет требованиям, предъявляемым к учебным пособиям. И если бы автор критически отнесся к выбору материала, то рецензируемая книга была бы действительно наилучшим учебным пособием в области автоматического регулирования. Будем надеяться, что в следующем издании этой книги должное место будет отведено теории комбинированных систем, выбору оценок точности и решению задачи компромиссной настройки систем.

Доктор техн. наук А. Г. Ивахненко

*Лаборатория автоматического регулирования
Института электротехники АН УССР*



НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Комиссаров В. И., Янгель Г. А. ОПЫТ РЕВИЗИЙ И РЕМОНТА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ БЕЗ СНЯТИЯ НАПРЯЖЕНИЯ. 26 стр., ц. 3 руб. 50 коп. Академиздат.

Крикунович А. В. ЭНЕРГЕТИКА ШВЕЦИИ. 32 стр., ц. 1 руб 95 коп. Госэнергоиздат.

Мамиконян Л. Г., Молоканов С. П. ОБ ЭНЕРГЕТИКЕ ВЕЛИКОБРИТАНИИ И БЕЛГИИ. 19 стр., ц. 1 руб. 25 коп. Госэнергоиздат. РАБОТЫ В ОБЛАСТИ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ И СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ. Под общ. ред. С. М. Горюхиного, Л. Г. Мамиконяна. 231 стр., ц. 8 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

Серков В. В. РЕМОНТ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. 108 стр., ц. 3 руб. 75 коп. Гослесбуиздат.

Уксусников Н. А. ПОЛЯРИЗОВАННОЕ ДВУХОБОМОТНОЕ РЕЛЕ ДЛЯ БЛОКИРОВКИ АПВ ЛИНИЙ. ц. 2 руб. Академиздат. УСИЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ ПРИ ПОМОЩИ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ. 26 стр., ц. 8 руб. Академиздат.

Файнбойм П. Б. БОРИС ЕВГЕНЬЕВИЧ ВЕДЕНЕВ. Под ред. А. В. Винтера. 72 стр., ц. 2 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

Филимончук П. П. СВАЙНЫЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ФУНДАМЕНТЫ ДЛЯ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ. 24 стр., ц. 1 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

Фокс А. Л., Миллер С. Е. и Вейс М. Т. СВОЙСТВА ФЕРРИТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ. Пер. с англ. Л. Г. Ломаяе. Под ред. Р. Г. Мириманова. 99 стр., ц. 4 руб. 10 коп. «Сов. радио».

Цыпкин Я. З. ТЕОРИЯ РЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. 456 стр., ц. 15 руб. 40 коп. Гостехиздат.

Шнольский Э. В. ВЫДАЮЩИЙСЯ СОВЕТСКИЙ УЧЕНЫЙ С. И. ВАВИЛОВ (1891—1951). 40 стр., ц. 60 коп. Изд. «Знание».

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ. Обработка А. Д. Герром. 24 стр., ц. 85 коп. ОРГРЭС, Госэнергоиздат.

ПОПРАВКА

В № 7, стр. 82, подпись И. А. Сыромятникова относится к исключенному из номера материалу; в наборе данной типографской полосы она осталась ошибочно.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. А. Андрианов, Н. И. Борисенко, Г. В. Бутневич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова, Н. Г. Дроздов (главный редактор), **Е. Г. Комар, М. П. Костенко, Л. Р. Нейман, И. И. Петров, В. И. Попков, И. А. Сыромятников** (зам. главного редактора), **А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, М. А. Шателен**

Сдано в набор 16/VII 1956 г.
Бумага 60×92¹/₈

Объем 12 печ. л.

Подписано к печати 4/IX 1956 г.
Уч.-изд. л. 16,5

Тираж 20 145 экз.

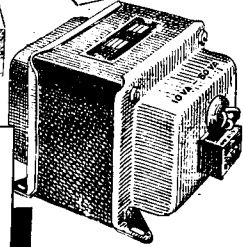
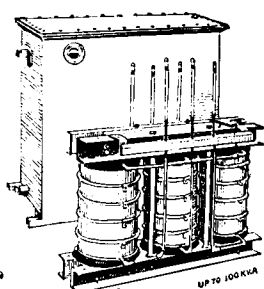
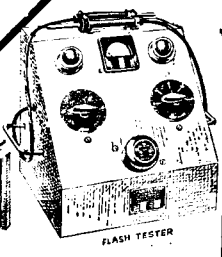
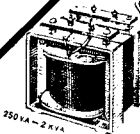
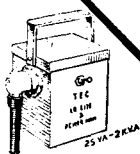
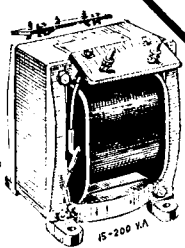
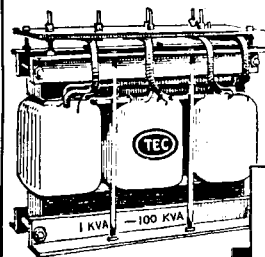
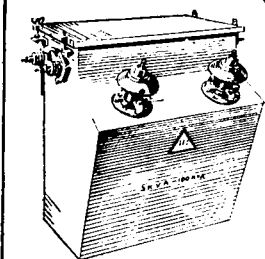
T-08251
Заказ 1411

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

для распределительных сетей

заказывайте

T.E.C.



THE TRANSFORMER & ELECTRICAL CO., LTD.

ПРОИЗВОДСТВО СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДО 100 КВА И ДРУГОЙ АППАРАТУРЫ

EASTERN WORKS, EASTERN RD., WALTHAMSTOW, LONDON, E.17 · АНГЛИЯ

Телефон: Keystone 5031-2 · Каталог по запросу · Поставщики Британского Правительства

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ

на журналы на 1957 г.

„Электричество“

„Электрические станции“

с приложением —

„Энергохозяйство за рубежом“

„Гидротехническое строительство“

„Теплоэнергетика“

„Энергетик“

„Торфяная промышленность“

„Промышленная энергетика“

„Светотехника“

„Вестник электропромышленности“

Реферативный журнал — „Электротехника“

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ

городскими и районными отделами Союзпечати,
во всех конторах, отделениях и агентствах связи
и общественными уполномоченными по подписке
на предприятиях, в учебных заведениях
и учреждениях.