

БУЛЕТИНУЛ
АКАДЕМИЕЙ ДЕ ШТИИНЦЕ
А РСС МОЛДОВЕНЕШТЬ

ИЗВЕСТИЯ
АКАДЕМИИ НАУК МОЛДАВСКОЙ ССР

Журнал



АКАДЕМИЯ НАУК МОЛДАВСКОЙ ССР

БУЛЕТИНУЛ

АКАДЕМИЕЙ ДЕ ШТИИНЦЕ
А РСС МОЛДОВЕНЕШТЬ

*

ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК
МОЛДАВСКОЙ ССР

№ 3

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
„КАРТА МОЛДОВЕНЯСКЭ“ КИШИНЕВ № 1933

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Академики Академии наук МССР: Я. С. Гросул (главный редактор), А. В. Аблов (зам. главного редактора), Б. Р. Лазаренко; член-корреспондент Академии наук МССР Г. В. Чалый; кандидаты технических наук: Г. М. Федорищенко, Г. М. Левин, В. Г. Журавлев, С. П. Фурсов.

п46221
Центральная на-
у
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Киргизской ССР

Б. Р. ЛАЗАРЕНКО

НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

...недостаточно понимать, что такое электричество: надо знать, как технически приложить его и к промышленности, и к земледелию... Надо научиться этому самим, надо научить этому всё подрастающее трудящееся поколение.

В. И. Ленин.

В отличие от всех других видов энергии, электричество обладает целым рядом весьма ценных и присущих лишь ему свойств: электрическую энергию можно передавать на большие расстояния с очень небольшими потерями; подводить весьма большие мощности непосредственно к месту потребления энергии, наконец, с помощью сравнительно простых устройств превращать электричество практически во все другие виды энергии — тепло, свет, механическое движение и пр. Именно эти замечательные свойства электрической энергии делают ее в наш век незаменимой. Сейчас она является не только основным промышленным видом энергии, но ее повсеместное проникновение столь велико, что трудно представить жизнь современного человека, в том числе его быт, без электрической энергии. По этой причине в электричество перерабатывается громадное количество горючих ископаемых — уголь, нефтепродукты, газы; энергия ветра и движущейся воды; лучистая энергия солнца. Для этой же цели изыскиваются новые виды топлив, создаются новые типы химических источников электрического тока. Больше того, сейчас совершенно определенно можно утверждать, что в ближайшие годы это превосходство электрической энергии над всеми другими видами энергий не изменится, поскольку уже достоверно известно, что использование ядерных реакций в энергетике сможет быть осуществлено только через электрическую энергию. Наиболее полно исключительная роль электрической энергии в жизни нашего общества отмечена в Программе Коммунистической партии Советского Союза, где сказано, что электрификация, являющаяся стержнем строительства экономики коммунистического общества, играет ведущую роль в развитии всех отраслей народного хозяйства, в осуществлении всего современного технического прогресса.

Для выполнения намеченной генеральной перспективы электрификации страны выработка электрической энергии с 292,5 млрд. кВтч в 1960 г. достигнет значений 520—1000 и 3000 млрд. кВтч соответственно для 1965, 1970 и 1980 гг. и, следовательно, по выработке электрической энергии Советский Союз в 1980 г. выйдет на первое место в мире.

Этим будут созданы все необходимые предпосылки для осуществления идеи великого Ленина о сплошной электрификации страны. Но он же обращал наше внимание на то, что нужно еще научиться применять электричество и в промышленности, и в сельском хозяйстве. Характерно, что на это В. И. Ленин указывал тогда, когда уровень развития электротехники был уже весьма высок и в промышленности сильно развивались такие области электротехники, как радиотехника, электроника, рентгенотехника и другие.

Вопрос заключается в том, что электрификацию страны нужно рассматривать не только с точки зрения получения электрической энергии, что среди других вопросов сейчас является, пожалуй, самым простым, а одновременно рассматривать, сколь разумно она используется. И вот если проблему сплошной электрификации подвергнуть такому комплексному рассмотрению, то вскроется целый ряд задач, требующих к себе особого внимания.

Необходимость рассмотрения электрификации не только со стороны получения электрической энергии, но и со стороны потребления ее диктуется следующими тремя причинами:

1. Производство электрической энергии не является самоцелью. Ее ценность проявляется только в результате трансформации в другие виды энергии или в появлении полезных процессов, сопровождающих непосредственное освобождение электрической энергии. Таким образом, в понятие «энерговооруженность страны» должно входить не только количество производимой электрической энергии, но и учитываться совершенство способов использования ее.

2. Электрическая энергия представляет собой особый вид продукции, которую в промышленных масштабах нельзя сохранять во времени, то есть в данном случае процессы производства и потребления должны совпадать во времени. Это свойство электричества вызывает необходимость соответствующим образом подбирать состав потребителей энергии.

3. Большинство открытий в области электричества было сделано еще в прошлом столетии. На их использовании основано громадное количество самых различных процессов. Однако, если посмотреть, на что же расходуется получаемая сейчас в громадных количествах электрическая энергия, то окажется, что, начиная со второй половины прошлого столетия и по настоящее время, подавляющая часть ее используется на электропривод бесчисленных станков и механизмов, транспорта, подъемных сооружений и т. п. Таким образом, от весьма высокоорганизованного вида энергии — электричества взяты и используются только наиболее простые его свойства — способность превращаться в один из простейших видов энергии (видимое, механическое движение) и этим заменять мускульную силу человека.

В то же время стало появляться множество разрозненных и все возрастающих по количеству экспериментальных данных, дающих все основания утверждать, что, вопреки утвердившемуся мнению, мы только начинаем познавать возможности электрической энергии и используем только некоторые формы ее проявления. Многие из этих данных уже не могут быть объяснены с точки зрения существующих теоретических положений классической электрофизики. Появились качественно новые высокоэффективные процессы, основанные на использовании явлений, сопровождающих освобождение электрической энергии; появились электрические машины, способные перерабатывать информацию и выдавать

продукцию, на которую ранее был способен только мозг человека, причем это делается во много раз быстрее и точнее, нежели это сделал бы сам человек.

Таким образом, если еще совсем недавно электричество в основном применялось лишь как источник силы, способной заменять мускульную силу человека, то теперь наступил качественно новый этап: электричество как высокоорганизованный вид энергии начинает проявлять свои наиболее существенные свойства. Теперь оно уже не только источник силы. Оно само — сила. Человек научился отпочковывать от электродов ступки электрической энергии и получать четвертое состояние вещества, свойства которого «бросают вызов всей математической и экспериментальной изобретательности современной физики и вводят нас в мир неожиданных и волнующих явлений» [1]; электрические машины вторглись в сферу умственной деятельности человека, настолько усилив его мозг, что возникла проблема разумного взаимодействия между человеком и этими «думающими» машинами.

Таким образом, оказывается, что электрическая энергия обладает еще очень большим числом неиспользованных возможностей. При осуществлении электрификации они должны быть вскрыты и поставлены на службу нашему народному хозяйству. И если границы применения электрической энергии будут многократно расширены, причем главным образом за счет включения в действие вновь создаваемых, качественно новых процессов, то сплошная электрификация даст результаты, о которых сейчас можно только мечтать.

В короткой статье трудно рассмотреть современный уровень работ по новым применениям электрической энергии даже в двух отраслях — промышленности и сельском хозяйстве. Поэтому автор ее, не претендуя на полноту изложения, ограничивает свою задачу избирательным рассмотрением лишь некоторых оригинальных работ этого направления, которые, по мнению автора, должны в ближайшие несколько лет дать очень крупные практические результаты.

1. Электрическое фотографирование объектов основано на использовании свойств фотополупроводниковых материалов быть изоляторами в темноте и проводниками электрического тока при освещении. К числу таких материалов принадлежат: антрацен, антрахинон, селен, окись цинка и др.

Процесс регистрации информации состоит из четырех последовательно выполняемых операций [2]:

1. Равномерная электризация фотополупроводниковой поверхности сообщением ей отрицательного заряда. Обычно это осуществляется в темноте с помощью коронной формы электрического разряда. В результате такого облучения поверхность становится фоточувствительной.

2. Экспонирование электризованного слоя любым из известных способов (с помощью фотокамеры, контактным способом через прозрачную поверхность оригинала и др.). Под действием света электрические заряды стекают с покрытия пропорционально интенсивности падающего света. Таким образом, появляется скрытое изображение объекта.

3. Проявление скрытого изображения пульверизацией поверхности положительно заряженными частицами порошка, окрашенного в заданный цвет. Частицы порошка притягиваются к поверхности, причем густота оседания их пропорциональна плотности зарядов на отдельных частях пластины. Таким образом, получается изображение с необходимыми полутонями.

4. Закрепление полученного изображения слабым нагреванием поверхности. В процессе рассматриваемой фиксации изображения частицы легкоплавкого вещества, находящегося в порошке (обычно смолы), расплавляются и тем самым закрепляют частицы порошка на поверхности. В результате получается отчетливое и светостойкое изображение. Рассматриваемый процесс электрофотографирования (его часто называют «ксерографией» или «электрофаксом») имеет ряд существенных преимуществ перед общезвестным фотохимическим способом фотографирования:

1. Длительность всего процесса электрического фотографирования, вплоть до получения окончательно готового снимка, не превышает одной минуты.

2. Устраняются сложные мокрые процессы проявления и печатания.

3. Одна пластина с нанесенным на нее фотополупроводниковым слоем может быть многократно использована. С этой целью с нее достаточно снять имеющееся изображение и вновь наэлектризовать действующий слой.

4. Возможность быстрого получения многих оттисков. В этом случае пластинка с изображением вновь электризуется, на нее наносится слой порошка, который затем в свою очередь переносится на прикладываемую к поверхности бумагу, материю и прочее. Требуется лишь несколько секунд для получения высококачественного оттиска.

5. Быстрота регистрации изображений, достигаемая с помощью электрофотографирования, выдвигает его на первое место для регистрации показаний счетно-решающих устройств. В этом случае изображение проектируется из фотонаборных установок, работающих на электронных трубках.

6. Особое место занимает электрофотография при получении рентгенограмм. Это преимущество состоит не только в более высокой чувствительности электрофотографических пластин по сравнению с рентгеновской пленкой, но и в получении большей фотографической широты, т. е. хорошей передаче деталей как в толстых, так и тонких участках объекта. Рисунок 1 наглядно демонстрирует сказанное.

II. Трудно точно установить дату, когда именно началось использование электрической энергии для проведения химических процессов. Вероятнее всего это относится к 1800 году, когда Карлейль и Никольсон впервые произвели разложение воды электрическим током. С тех пор количество химических процессов, осуществляемых с помощью электрической энергии, непрерывно растет. Тем не менее, рассматривая эти процессы, в том числе процессы, выделенные в специальный класс под названием электрохимических, нетрудно усмотреть, что химики взяли от электрической энергии самые простые возможности ее — создавать поле или сравнительно низкую (несколько тысяч градусов) температуру — и оставили неиспользованными мощные нестационарные электрические процессы, при протекании которых возникающие плотности тока, давления и температуры достигают громадных значений и появляются вторичные явления, специфические только для названного вида процессов.

Эти неиспользованные в химии самые замечательные возможности электрической энергии сейчас начинают вводиться в действие, и как следствие этого, электрики совместно с химиками создадут целую серию новых реакций электрического синтеза и распада, крекинга и полимеризации веществ — реакций, не осуществимых никакими другими способами.

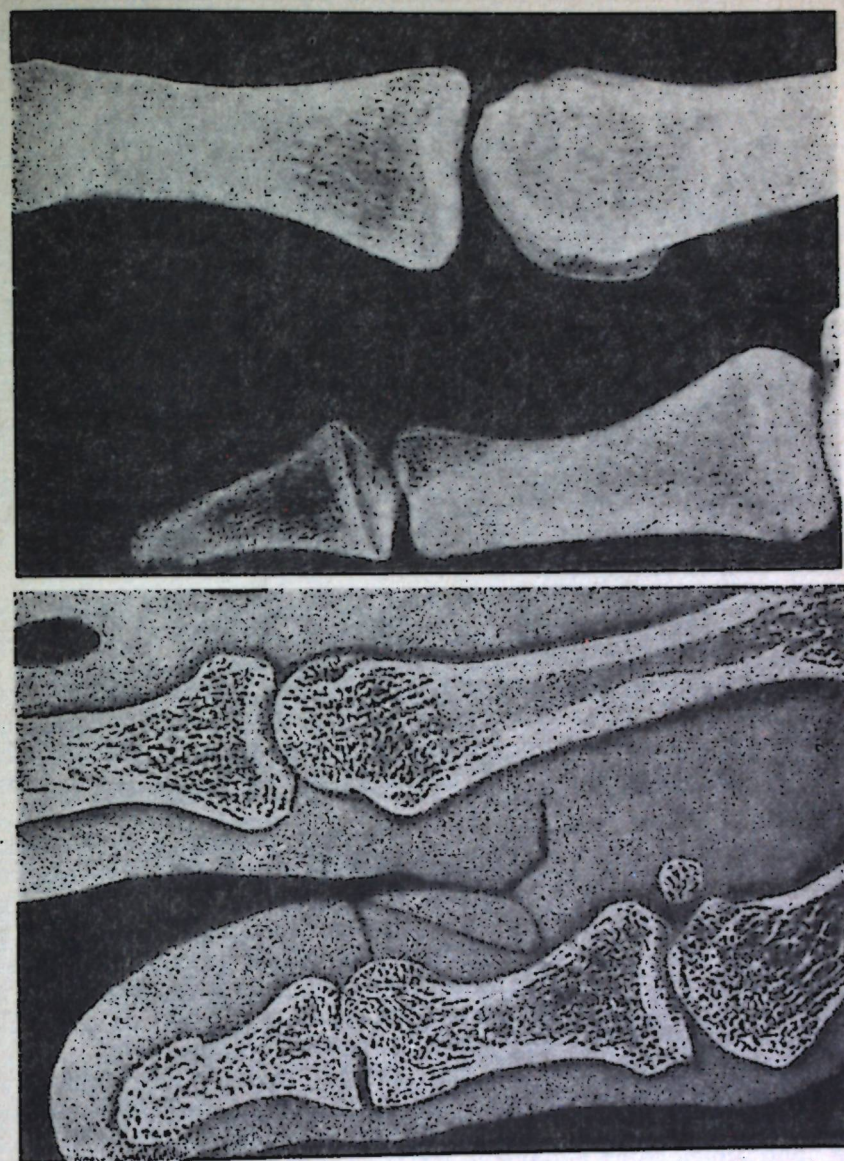


Рис. 1. Рентгеновский снимок, изготовленный обычным способом, и электрофоторентгенограмма того же объекта.

Из числа этих процессов, в качестве примера, рассмотрим наиболее простой случай — электрическое разложение жидких углеводородов с целью получения ацетилена.

Общезвестна исключительная роль этого газа как сырья для органического синтеза. Однако до сих пор единственным промышленным способом производства ацетилена является получение его через карбид кальция. Для проведения этого процесса расходуются высококачественные угли, известь, электродная масса; сам технологический процесс весьма энергоемок, многостадийен, требует сложной и очень громоздкой аппаратуры, дает многотоннажные малоупотребительные отходы.

Несколько лет назад исследователям удалось доказать, что и эта проблема может быть легко решена с помощью непосредственного воздействия электрической энергии [3]. С этой целью, используя нестационарные

онарные формы электрических разрядов даже со сравнительно небольшими амплитудными значениями токов (600—800а), производили электрокрекинг нефтепродуктов ($H_K=140^\circ$, $K_K=250^\circ$). В результате рассматриваемого воздействия электрических импульсов происходил глубокий распад нефтепродукта с выходом газа приблизительно следующего состава: C_2H_2 + гомологи... — 29—32%; C_nH_{2n} ... 8—11%; C_nH_{2n+2} ... 2—6% и H_2 ... 52—58%. Было установлено, что для получения 1 м³ ацетилена требуется около 2,5 кг исходного нефтепродукта.

Отходами рассматриваемого и очень простого в осуществлении процесса являются два твердых вещества, заслуживающие внимания. Одно из них — высококачественная сажа как результат полного распада углеводородных молекул; второе — вещество состава $C=95\%$; $H_2=5\%$.

III. Уже около 200 лет человек стремится использовать электрическую энергию для активизации роста растений. Однако пока она применяется только для нагрева грунта и освещения растений с целью усиления отдельных частей спектра света.

До последнего времени в качестве основных факторов, определяющих развитие растения, учитывались только наличие необходимых питательных веществ, влага в почве и атмосфере, количество тепла и света, получаемых растением.

В то же время биологам хорошо известно, что всякая живая клетка растительного или животного происхождения обладает электрическим потенциалом, появляющимся в клетке в результате химического взаимодействия веществ. Поскольку расположение клеток симметрично, то в растении появляется электрический ток, а следовательно, и магнитное поле. Однако растение в целом, как организм, представляет собой электрически разомкнутую систему и, как следствие этого, — систему полярную.

Одновременно известно, что Земля имеет мощное электромагнитное поле, электрическое поле, ионизированную атмосферу. Следовательно, во всех случаях растение, являясь электрической системой, не может не реагировать на электрические явления, происходящие как в земле, так и атмосфере. Замечательные подтверждения этому проявились в последнее время, когда специально поставленными и многократно повторенными (до 50 раз) экспериментами было доказано взаимодействие всегда полярной живой материи с внешними полями [4].

С этой целью сухие семена различных растений (пшеницы, кукурузы, хлопчатника, гороха и др.) клались на влажную бумагу и размещались между полюсами магнита таким образом, что часть семян корешками зародышей была обращена к южному полюсу магнита, а другая — к северному. Проращивание производили в темноте при $T=20-25^\circ$. Во всех случаях было установлено, что семена, которые были обращены корешком зародыша к южному полюсу, прорастали раньше семян, обращенных корешком зародыша к северному полюсу; корни проростков этих семян и стебель развивались более интенсивно, нежели семян, ориентированных на северный полюс. Таблица 1 наглядно демонстрирует сказанное для случая проращивания семян пшеницы сорта «Московка».

Таблица 1

Ориентация корешка зародыша семян относительно полюсов магнита	Средняя длина, мм	
	Стебли	Корни (суммарная длина корней одного проростка)
К северному полюсу	11,8	50,4
К южному полюсу	55,0	140,4

Наряду со сказанным, следует отметить еще два замечательных факта: во-первых, оказывается, что растения, ориентированные на северный полюс, не только хуже развивались, но природа «исправляла» допущенную ошибку в ориентации семян — корни проростков в процессе их образования изгибались и начинали также расти в направлении южного полюса (см. рис. 2). Во-вторых, когда несколько изменяли постановку эксперимента и брали не сухие, а намоченные или «наклонувшиеся» семена, то рассмотренное влияние полярности или значительно ослабевало, или не проявлялось вовсе. Это, видимо, объясняется тем, что с момента набухания в семенах начинают развиваться биохимические процессы, в соответствии с которыми устанавливается и определенная полярность.

Поскольку избирательное прорастание семян и дальнейшее развитие стебля и корневой системы наблюдалось не только в искусственно создаваемых магнитных полях, но полностью подтвердилось и для случая ориентации семян по существующим магнитным полюсам Земли, то очевидно, что количество факторов, с помощью которых мы пытаемся управлять жизнедеятельностью растений (тепло, свет, влага и др.), является явно недостаточным, и поэтому так часто мы не достигаем в этом направлении желаемых результатов. Полярность живой клетки, ионные, т. е. направленные процессы, происходящие в ней, неотделимы от полярных процессов, происходящих в почве и окружающей атмосфере. В этих электрических системах происходит непрерывное взаимодействие полей, происходит непрерывное изменение величины их напряженности.

Таким образом, биологи получают возможность с помощью электротехнических средств активно вмешиваться в жизнедеятельность организмов и уверенно управлять их развитием. Вполне вероятно, что с помощью этих средств можно заставить растение перерабатывать в единицу времени значительно большее количество питательных веществ, нежели это делается сейчас, и этим выращивать растения небывалых размеров.

IV. Химики создают большое количество новых материалов, обладающих замечательными физико-химическими свойствами. Несмотря на это, сейчас совершенно очевидно, что во всяком случае до конца XX века металл будет иметь доминирующее значение. Поэтому все более совершенствуются свойства металлических сплавов, увеличивается абсолютное количество выплавляемого металла, ищутся все более прогрессивные способы его обработки.



Рис. 2. Проростки кукурузы, выросшие из семян, корешки зародышей которых были по-разному ориентированы к магнитным полюсам земли: к северному и к южному.

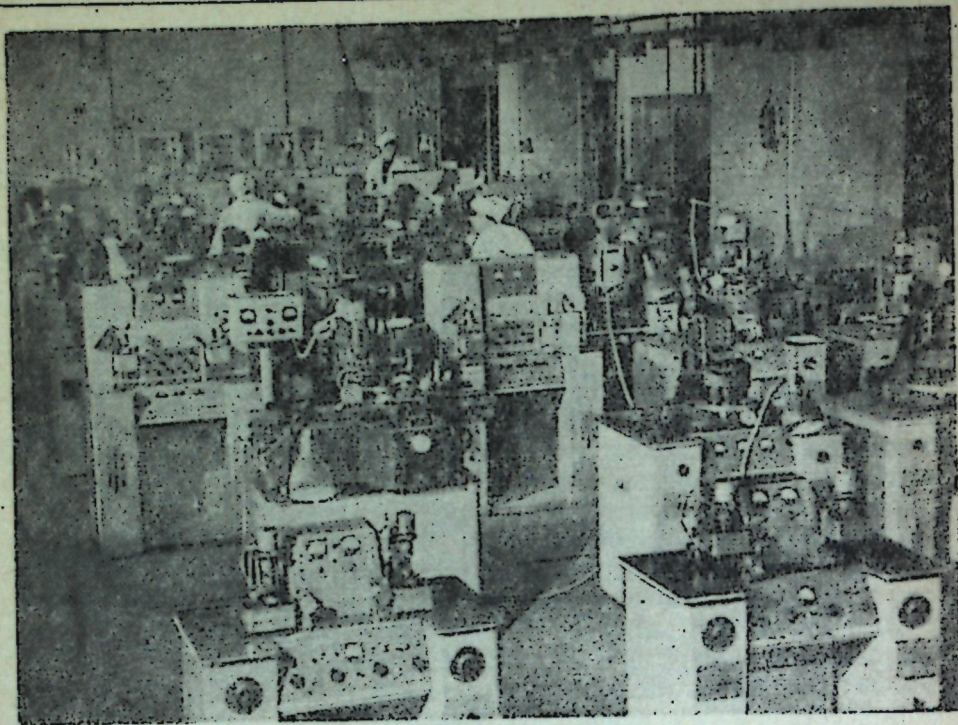


Рис. 3. Цех электронской обработки металлических деталей.

Среди других, очень интенсивно развивающихся способов обработки металлов одно из первых мест занимает способ обработки его электрическими импульсами, так называемая электронская — или менее точно — электроэрозионная обработка металлов. Как известно, с помощью этого способа, не применяя каких-либо режущих инструментов или абразивов, можно с величайшей точностью обрабатывать металлы и сплавы любой твердости, вязкости и хрупкости; он дал возможность выполнять целый ряд технологических процессов, вообще не осуществимых никакими другими способами. Больше того, поскольку при электронной обработке «режущим инструментом» является поток электронов, то, следовательно, отпадает необходимость в создании машин с бесчисленным количеством шестерен, валов, рычагов, ползунов, приводимых в движение мощными электродвигателями, то есть всего того, с чем связано у нас представление об обычном металлорежущем станке. На смену им идут компактные автоматически действующие электрические установки, резко повышающие производительность труда, удешевляющие стоимость продукции; значительно расширяющие возможности металлообработки, улучшающие санитарно-гигиенические условия труда рабочих. Вспомните картину современного цеха по обработке металлов механическими приемами и сравните эту картину с цехом, производящим аналогичную продукцию, но изготавливаемую электронным способом (см. рис. 3). Обратите внимание, сколь миниатюрны установки для обработки металлов этим способом и как мало людей их обслуживает.

Однако существенным недостатком электронного способа являлось то, что с помощью его можно обрабатывать только металлы и их сплавы, т. е. материалы, проводящие электрический ток. В последние годы удалось эту грань перейти и начать обрабатывать не только проводники электрического тока, но также полупроводники и изоляторы.

Нашими работами достаточно ясно установлено [5, 6, 7], что искро-

вой электрический импульс представляет собой поток электронов с большой скоростью перемещающийся от катода к аноду, и что в зависимости от величины напряжения, приложенного к электродам, этот поток углубляется в поверхность анода на различную глубину. Если анодом является достаточно толстая пластина (хотя бы несколько миллиметров), то поток летящих электронов будет резко и полностью остановлен твердой металлической поверхностью. При этом вся энергия торможения электронов выделится в поверхностных слоях анода. Как следствие — происходит направленный взрыв участка анода, воспринявшего импульс, и выброс металла из чаши, вмещающей пораженный объем металла.

Если же анодом является очень тонкий проводник, например, металлическая фольга, то поток электронов, ударившись о его поверхность, легко пробивает ее и продолжает свой путь в заанодной области. В этом случае анод выполняет роль своеобразной ускоряющей сетки. Поскольку анод был тонок, то на его пробой было затрачено весьма небольшое количество энергии; следовательно, поток электронов, двигаясь в заанодной области, еще обладает большим запасом энергии. И если и на его пути находится какой-либо предмет, то он, ударившись в него, произведет значительную работу.

Этот схематически описанный процесс и был нами использован для обработки материалов, не проводящих электрический ток [8]. Совершенно очевидно, что если при только что рассмотренной постановке эксперимента под тонкой фольгой расположить какое-то вещество (например, алмаз), то поток электронов, ударившись об его поверхность, испарит часть ее. Для продолжения этого процесса пробитая электрическим импульсом поверхность анода должна быть как-то восстановлена. Это оказалось легко выполнимым, если в качестве анода брать токопроводящую жидкость, которая тонким слоем покрывает поверхность обрабатываемого диэлектрика. После пробоя отверстие, образовавшееся в жидкости, захлопнется, и система будет вновь подготовлена для образования следующего импульса.

Эти процессы оказались очень эффективными. Например, если до применения этого процесса изготовление отверстия в алмазе (при изготовлении алмазных фильер) производилось за 106—170 часов, то теперь на него тратится не более 8 часов.

В заключение отметим, что само слово «алмаз» по-арабски и по-гречески означает «неукротимый», «твердейший». Ныне алмаз, несмотря на такое громкое название, абсолютно «укошен» и, даже будучи очень хорошим диэлектриком, послушно подчиняется едва видимой, но «сверхтвердой» электрической искре.

V. До недавних пор поток электронов в вакууме в основном использовался для выпрямления электрического тока, генерации колебаний, усиления слабых сигналов, излучения частиц, развертки изображений и т. д. Однако в последние несколько лет картина начала резко изменяться.

Поток частиц, выбрасываемых электронной пушкой, стал использоваться для осуществления целого ряда технологических процессов и особенно для получения сверхчистых металлов, сварки различных материалов, размерной обработки материалов [9].

Принципиальная схема установки для плавления металлов пучком электронов представлена на рис. 4. Этот способ получения металлических слитков имеет перед всеми другими способами ряд крупных преимуществ. Во-первых, сам процесс плавления осуществляется только за счет торможения потока электронов, следовательно, исключается вся-

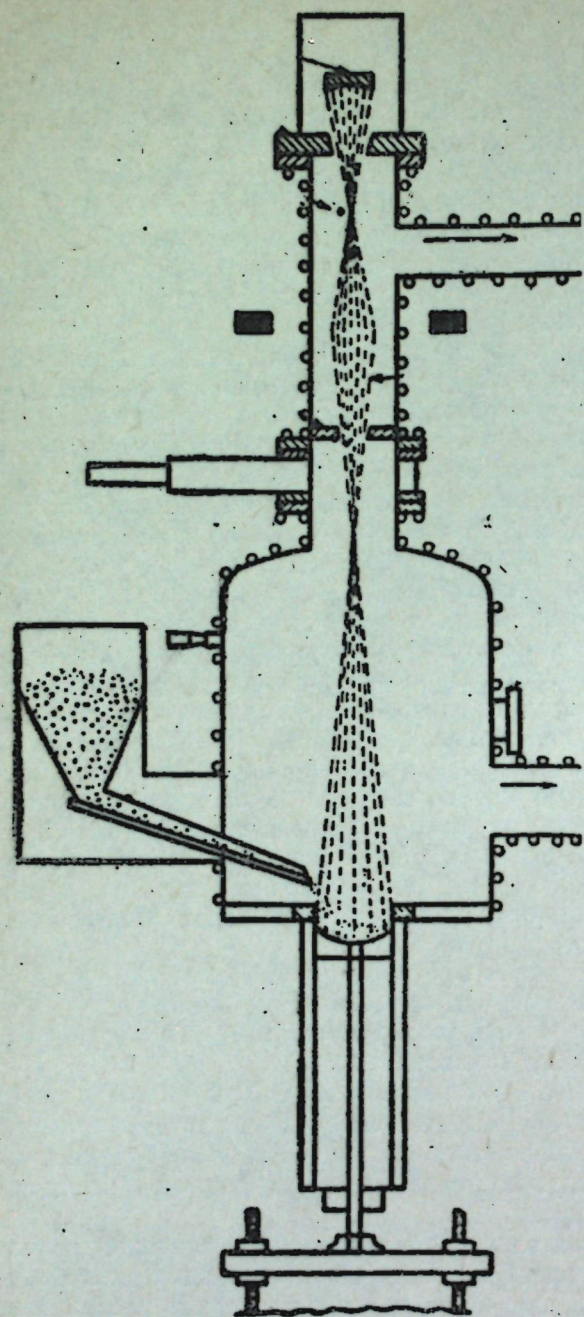


Рис. 4. Принципиальная схема установки для плавки металла пучком электронов.

дыдущем случае. Одна из них представлена на рис. 5. Деталь, подлежащая сварке, закрепляется на тележке, которая по мере расплавления металла перемещается в заданном направлении. Поскольку процесс сварки происходит в вакууме и, следовательно, процессы окисления и загрязнения отсутствуют, то швы получаются очень однородными. Этот вид сварки имеет ряд преимуществ перед всеми другими видами сварки, поскольку позволяет сваривать между собой самые разнородные ме-

кая возможность внесения в металл загрязнений от источника тепла. Во-вторых, регулируя в процессе плавления ширину луча, можно достигнуть условий, при которых слиток не будет загрязняться и от материалов, с которыми он соприкасается в процессе образования. Наконец, температуру ванны можно поддерживать столь высокой и так долго, что металл полностью обезгаживается, а все находящиеся в нем низкокипящие примеси испаряются. Всё это дает возможность очень быстро получать сверхчистые металлы, обладающие очень высокими свойствами. Например, ниобий и вольфрам, полученные рассмотренным способом, оказываются материалами, обладающими большой пластичностью.

Не менее интересно применение пучка электронов для сварки самых разнородных материалов. В этом случае используются уже более точные электронные системы, нежели в пре-

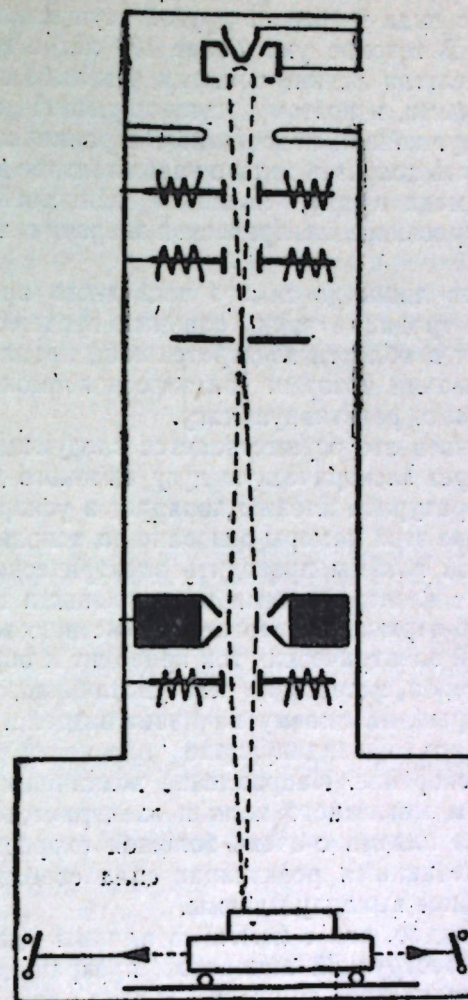


Рис. 5. Принципиальная схема установки для сварки и обработки материалов пучком электронов.

таллы — от молибдена с танталом и вольфрамом вплоть до сварки металлов с керамикой.

Для того, чтобы осуществить с помощью пучка электронов размерную обработку металлов, нужно заставить электронный луч испарять металл только в заданных точках, причем так, чтобы не произошло оплавление окружающей поверхности. По этой причине уже нельзя применять, как это было в двух предшествующих случаях, непрерывный поток электронов. Размерную обработку металлов осуществляют прерывистым пучком электронов с частотой следования отдельных импульсов до 2000 *имп/сек*. Рассматриваемый способ обработки имеет по сравнению с другими способами обработки металлов два весьма существенных преимущества: во-первых, возможность изготавливать отверстия диаметром от 2 *мк*, во-вторых, с помощью его легко обрабатываются как металлы, так и минералы.

VI. В начале статьи обращалось внимание на то, что даже сейчас значительно больше половины производимой электрической энергии используется для получения механических усилий. Во всех случаях это превращение одного вида энергии в другой осуществляется с помощью электродвигателей. В течение уже более 100 лет с момента создания первого электродвигателя всякие попытки чем-либо его заменить оказывались безуспешными, и поэтому существующий электродвигатель, несмотря на ряд крупнейших недостатков, ограничивающих его развитие (дает возможность получать только вращательное движение, требует большого расхода меди и пр.), является единственным промышленным средством превращения электрической энергии в механическое движение.

Однако так было лишь до самого последнего времени. Советские ученые, продолжая традиции своих славных предшественников быть первооткрывателями в области электротехники, предложили ряд принципов, на использовании которых оказалось возможным с помощью электричества получать реактивную тягу.

В одном из случаев это осуществляется следующим способом [10]: газ продувается через электрическую дугу высокого давления и затем в виде высокотемпературной плазмы попадает в ускорительную камеру (см. рис. 6). Действие этой камеры основано на использовании свойства высокотемпературной плазмы проводить электрический ток и поэтому взаимодействовать с электрическими и магнитными полями. Поступив в камеру, плазма, во-первых, подвергается действию электрического поля. Возникший в ней электрический ток приводит к образованию омического (джоулева) тепла, вследствие чего увеличивается тепловая энергия плазмы. Во-вторых, на плазму начинает воздействовать магнитное поле (направление его перпендикулярно плоскости рисунка), которое сообщает плазме ускорение. Направление возникших сил перпендикулярно направлению магнитного поля и электрического тока. Таким образом, ускоренная плазма с очень большой скоростью будет выброшена из сопла, а возникшая реактивная сила сообщит камере тягу в направлении, обратном выхлопу плазмы.

Совершенно очевидно, что с помощью плазмы удастся создать ряд очень интересных конструкций аппаратов, превращающих электрическую энергию в механическое движение. В этих аппаратах не будет никаких вращающихся частей и сложных коллекторных устройств. Они будут легки и очень рациональны.

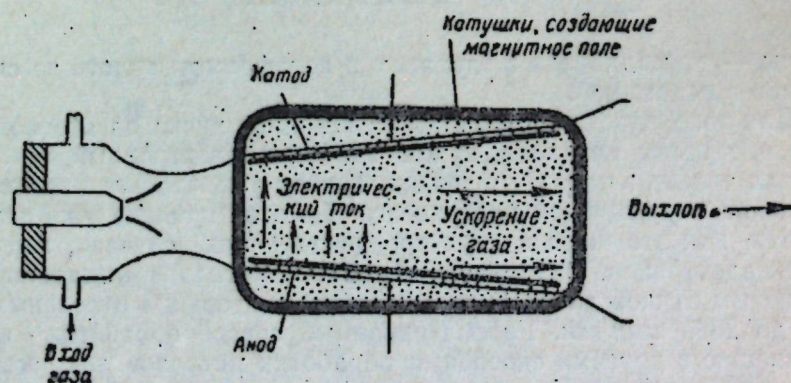


Рис. 6. Принципиальная схема магнитогидродинамического ускорителя.

* * *

В настоящей статье мы рассмотрели лишь несколько весьма существенных, но малоизвестных новых применений электрической энергии, оставив вне её уже широко описанные такие новые мощные средства, как электронные вычислительные машины, применение электричества в медицине, использование постоянных электрических полей для изготовления новых материалов, обработки пищевых продуктов и прочее.

Поскольку сейчас во всех странах мира вновь начинает уделяться очень большое внимание изучению электрических явлений, то за последние два десятилетия динамика новых открытий в области электричества характеризуется кривой, очень круто идущей вверх. Сейчас имеются все основания полагать, что в этой области в самое ближайшее время будет сделано открытий не меньше, чем в прошлом столетии, которое, как известно, отличалось очень бурным развитием науки об электричестве.

ЛИТЕРАТУРА

1. У. Бостик. Плазмонды. «Проблемы современной физики», 1958, № 3.
2. Вопросы электрографии. Сборник переводов. Изд-во иностр. лит., 1960.
3. Н. С. Печуро, А. Н. Меркурьев. Исследование разложения жидких органических продуктов в нестационарных электрических разрядах. В кн.: Проблемы электрической обработки материалов. Изд-во АН СССР, 1962.
4. А. В. Крылов и Г. А. Тараканова. Явление магнитотропизма у растений и его природа. «Физиология растений», том 7, вып. 2. Изд-во АН СССР, 1960.
5. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Физика электронского способа обработки металлов, М., 1946.
6. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Электронская обработка металлов, М.—Л., Госэнергоиздат, 1950.
7. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Электродинамическая теория искровой электрической эрозии металлов. В кн.: Проблемы электрической обработки материалов. Изд-во АН СССР, 1962.
8. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Электронской способ изготовления отверстий в алмазах. В кн.: Проблемы электрической обработки материалов. Изд-во АН СССР, 1960.
9. Leporatti Sirio. Le sorprendenti applicazioni del "ful elettronico" nelle lavorazioni meccaniche. «Rivista di Ingegneria», Aprile 1961, v. XI, № 4.
10. Камак, Кантровиц и Петчек. Плазменные двигатели для космических кораблей. В кн.: Движущаяся плазма (сборник переводов). Изд-во иностр. литер., 1961.

Б. Р. ЛАЗАРЕНКО

НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Резюме

В статье рассмотрены некоторые новые, но малоизвестные применения электрической энергии, оставив вне её уже широко описанные такие новые мощные средства, как электронные вычислительные машины, применение электричества в медицине, использование постоянных электрических полей для изготовления новых материалов, обработки пищевых продуктов и прочее. Поскольку сейчас во всех странах мира вновь начинает уделяться очень большое внимание изучению электрических явлений, то за последние два десятилетия динамика новых открытий в области электричества характеризуется кривой, очень круто идущей вверх. Сейчас имеются все основания полагать, что в этой области в самое ближайшее время будет сделано открытий не меньше, чем в прошлом столетии, которое, как известно, отличалось очень бурным развитием науки об электричестве.

О. К. БАЗИЛЕНКО

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ ВЕРОЯТНОСТНЫМИ КОНЕЧНЫМИ АВТОМАТАМИ

ВВЕДЕНИЕ

С момента своего возникновения теория информации развивалась по двум основным направлениям.

Первое направление, связанное с абстрактной математической теорией информации, развитой работами Шеннона [8], Хинчина [1, 2], Файнштейна и других, рассматривает асимптотическое поведение каналов связи и систем кодирования, не предлагая конструктивных методов для достижения предельных характеристик.

Второе направление связано с применением методов теории информации для повышения эффективности средств связи. При этом рассматриваются два основных круга вопросов: методы повышения эффективности передачи сигнала через среду в присутствии помех (здесь сравниваются способы модуляции и выделения полезного сигнала) и методы построения помехозащищенных кодов. Другими словами, с одной стороны, рассматриваются методы повышения надежности передачи одного элементарного символа, с другой стороны, методы обеспечения надежной передачи сообщения, состоящего из группы элементарных символов.

Существует большое число методов построения помехозащищенных кодов, однако не существует единого критерия оценки их эффективности. Часто для оценки системы кодирования используется эффективность кода, определяемая как отношение числа элементов кода, необходимого для передачи данного числа сообщений в отсутствии помех, к действительно используемому числу элементов кода [9, 12], или избыточность, определяемая как величина, обратная эффективности [5]. При одинаковых условиях передачи, фиксированном числе сообщений и одинаковых защитных свойствах кодовых систем эти критерии являются достаточными. Однако они не позволяют эффективно сравнивать системы при разных защитных свойствах в зависимости от числа сообщений и условий передачи.

После работы Элаеса [10] получили распространение оценки методов кодирования, учитывающие скорость передачи информации и вероятность появления необнаруженной ошибки в передаваемом сообщении. Однако формулы, полученные самим Элаесом, являются асимптотическими и непосредственно к анализу конкретных кодов не применимы.

В. И. Сифоров [3] предложил группу критериев, пригодных для сравнения конкретных кодовых систем при очень малой вероятности искажения передаваемого по каналу элементарного символа, то есть в условиях, когда практически вся информация от источника передается

потребителю. В работе [4] была предпринята попытка обобщить результаты Сифорова на случай канала с заметными помехами, но примененное авторами понятие количества правильно принятой информации вряд ли можно считать обоснованным, так как оно не учитывает уменьшение среднего количества информации при существовании положительной вероятности ложного сообщения. В других работах упомянутые критерии оценки систем кодирования используются либо в виде, предложенном авторами, либо в незначительно измененном виде.

Во всех работах по теории передачи информации канал рассматривается как устройство, непосредственно связывающее источник с потребителем информации. Сложная структура такого рода канала, состоящего, в простейшем случае, из кодирующего и декодирующего устройств и собственно канала, либо не учитывается вовсе (учитываются лишь характеристики собственно канала), либо учитывается путем задания общей характеристики всех входящих в канал (в широком смысле) устройств. Насколько известно автору, в настоящее время не существует методов, позволяющих по частным характеристикам составных частей определить общую характеристику канала от источника до потребителя информации. Автор считает, что представление компонентов систем передачи информации в виде вероятностных конечных автоматов позволит хотя бы частично восполнить этот пробел и даст возможность получить способы оценки систем кодирования, способы расчета информационных характеристик всего канала на основании характеристик его составных частей и на основании этого позволит рационально подбирать составные части.

1. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ КОНЕЧНЫЕ АВТОМАТЫ. НЕКОТОРЫЕ ИХ ТИПЫ

Вероятностный конечный автомат может быть определен двумя способами.

А. Вероятностный конечный автомат — это устройство с конечным множеством внутренних состояний $S = \{s_i\}$, конечным множеством входов $A = \{a_j\}$ и конечным множеством выходов $B = \{b_k\}$. В каждый дискретный момент времени, соответствующий одному такту, может быть возбужден только один вход и один выход. Каждому внутреннему состоянию соответствует единственная матрица преобразования возбуждения входов и возбуждения выходов. Задержка может быть равна целому конечному числу тактов, в том числе нулю. Последовательность внутренних состояний вероятностного конечного автомата является цепью случайных событий.

Б. Вероятностный конечный автомат — устройство с конечным множеством внутренних состояний $S = \{s_i\}$, одним входом и одним выходом, каждый дискретный момент времени, соответствующий одному такту, на вход вероятностного конечного автомата подается одно слово (или буква) a_j , принадлежащее конечному множеству различных слов (или букв) $A = \{a_j\}$, составляющему входной словарь (алфавит) автомата. Слово (буква) a_j преобразуется в слово (букву) b_k , принадлежащее выходному словарю (алфавиту) $B = \{b_k\}$ с вероятностью $p(b_k | a_j)$, определяемой единственной для данного состояния матрицей вероятностей преобразования. Задержка преобразования может быть равна целому конечному числу тактов, в том числе нулю. Последовательность внутренних состояний автомата является случайной цепью событий.

В смысле преобразования поступающей на вход информации оба типа автоматов эквивалентны. Действительно, пусть имеются автоматы типа А и Б с одинаковым числом состояний, образующих одинако-

вые цепи событий, и с совпадающими для каждого состояния матрицами вероятностей преобразования. Если теперь каждое j -тое входное слово автомата типа Б заменить j -тым входом, а k -тое выходное слово k -тым выходом, то автомат типа Б превратится в эквивалентный ему автомат типа А. В этой статье мы будем пользоваться вторым определением и рассматривать автоматы с нулевой задержкой.

По типу цепи внутренних состояний вероятностные конечные автоматы могут быть разделены на две группы, у которых: цепь состояний не зависит от входных и выходных сигналов автомата, то есть, вероятности перехода из состояния s_i зависят только от его предыстории в цепи состояний;

цепь состояний зависит или от входных, или от выходных, или от тех и других сигналов автомата, то есть вероятности перехода из состояния s_i зависят не только от его предыстории в цепи состояний, но и от значения или предыстории входного, выходного или обоих вместе сигналов. В дальнейшем мы будем рассматривать лишь некоторые типы автоматов, принадлежащих первой группе.

Назовем простым автомат с единственным внутренним состоянием. Такой автомат характеризуется множествами (словарями) A и B и матрицей вероятностей преобразования.

Автомат, у которого последовательность внутренних состояний является цепью независимых событий, будем называть независимым. Этот автомат характеризуется множествами A, B, S , матрицами преобразования в каждом из состояний и вероятностями $p(s_i)$ появления каждого из состояний.

Назовем автомат марковским, если цепь его внутренних состояний представляет собой однородную марковскую цепь первого порядка. Для описания такого автомата, помимо входного словаря A , выходного словаря B , множества состояний S и соответствующих матриц преобразования, необходимо задать также и матрицу переходов состояний. Если физическое устройство, соответствующее марковскому автомату, не может постоянно находиться в одном из состояний, то матрица будет неприводимой, все состояния цепи будут эргодическими и вероятности появления состояний s_i в момент времени T при $T \rightarrow \infty$ (или при $T \gg t_0$, где t_0 — время такта автомата) будут стремиться к пределу $p^*(s_i)$, определяемому из следующей системы линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_s p^*(s_i) &= 1 \\ p^*(s_i) &= \sum_{v=1}^{v=z} p^*(s_v) p(s_i | s_v) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

Здесь z — число состояний автомата;

$p(s_i | s_v)$ — элементы матрицы перехода.

Суммирование ведется по всему i — тому столбцу матрицы.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРОЯТНОСТНЫХ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ.

Вычислим количество информации на выходе автомата относительно его входа для простого, независимого и марковского автоматов в случае, когда последовательность подаваемых на вход слов представляет собой цепь независимых событий.

Среднее количество информации на выходе простого автомата может быть найдено непосредственно на формуле Шеннона [8]:

$$\begin{aligned} I &= \sum_A \sum_B p(a_j, b_k) \log \frac{p(a_j, b_k)}{p(a_j)p(b_k)} = \\ &= \sum_A \sum_B p(a_j) p(b_k | a_j) \log \frac{p(b_k | a_j)}{p(b_k)}. \end{aligned} \quad (2-1)$$

Здесь $p(a_j)$ — вероятность подачи на вход слова a_j ;

$p(b_k | a_j)$ — элемент матрицы преобразования (условная вероятность появления на выходе слова b_k при подаче на вход слова a_j);

$p(a_j, b_k)$ — вероятность совместного появления слов a_j и b_k ;

$p(b_k)$ — вероятность появления слова b_k .

$$p(b_k) = \sum_A p(a_j) p(b_k | a_j). \quad (2-2)$$

Выражая количество информации только через характеристики источника и автомата, получим:

$$I = \sum_A \sum_B p(a_j) p(b_k | a_j) \log \frac{p(b_k | a_j)}{\sum_A p(a_j) p(b_k | a_j)} \quad (2-3)$$

Рассмотрим теперь независимый автомат. Количество информации на его выходе относительно входа также определяется формулой (2-1), но в этом случае:

$$p(a_j, b_k) = \sum_S p(s_i) p(a_j) p(b_k | a_j) s_i = p(a_j) \sum_S p(s_i) p(b_k | a_j) s_i;$$

$$p(b_k) = \sum_A p(a_j) \sum_S p(s_i) p(b_k | a_j) s_i.$$

Здесь $p(s_i)$ — вероятность появления состояния s_i ;

$p(b_k | a_j) s_i$ — элемент матрицы преобразования для состояния s_i (условная вероятность появления b_k при подаче на вход слова a_j в состоянии s_i).

Переходя к характеристикам автомата и источника, получим:

$$I = \sum_A \sum_B p(a_j) \sum_S p(s_i) p(b_k | a_j) s_i \log \frac{p(a_j) \sum_S p(s_i) p(b_k | a_j) s_i}{\sum_A p(a_j) \sum_S p(s_i) p(b_k | a_j) s_i} \quad (2-4)$$

Вычислим теперь количество информации на выходе простого автомата с матрицей преобразования, определяемой как:

$$\|p(b_k | a_j)_{cp}\| = Mo \|p(b_k | a_j) s_i\| = \left\| \sum_S p(s_i) p(b_k | a_j) s_i \right\| \quad (2-5)$$

Для такого автомата получим:

$$I = \sum_A \sum_B p(a_j) \sum_S p(s_i) p(b_k | a_j) s_i \log \frac{p(a_j) \sum_S p(s_i) p(b_k | a_j) s_i}{\sum_A p(a_j) \sum_S p(s_i) p(b_k | a_j) s_i}$$

Следовательно, количество информации на выходе независимого автомата относительно его входа равно количеству информации на выходе простого автомата, имеющего матрицу преобразования, равную математическому ожиданию матриц преобразования независимого автомата. Другими словами, независимый автомат может быть заменен эквивалентным ему в смысле передачи информации простым автоматом.

Через длительное время после начала работы марковский автомат может рассматриваться как независимый с вероятностями $p^*(s_i)$ появления состояния s_i , определяемыми по (1—1). Формулу для определения количества информации на выходе получим из (2—4), заменив $p(s_i)$ на $p^*(s_i)$.

$$I = \sum_A \sum_B p(a_j) \sum_S p^*(s_i) p(b_k | a_j) s_i \log \frac{p(a_j) \sum_S p^*(s_i) p(b_k | a_j) s_i}{\sum_A p(a_j) \sum_S p^*(s_i) p(b_k | a_j) s_i} \quad (2-6)$$

Очевидно, что через длительное время после начала работы марковский автомат может быть заменен эквивалентным ему в смысле передачи информации простым автоматом с матрицей преобразования, определенной аналогично (2—5).

$$\|p(b_k | a_j)_{cp}^*\| = Mo^* \|p(b_k | a_j) s_i\| = \left\| \sum_S p^*(s_i) p(b_k | a_j) s_i \right\| \quad (2-7)$$

В качестве одной из основных информационных характеристик вероятностного конечного автомата представляется целесообразным использовать коэффициент полезного действия автомата по информации, определяемый как отношение количества информации на выходе автомата относительно его входа к энтропии его входа, то есть к наибольшему количеству информации, содержащемуся в связанном со входом автомата источнике e .

$$\eta = \frac{I}{H} = \frac{I}{\sum_A p(a_j) \log p(a_j)} \quad (2-8)$$

Скорость передачи информации автоматом может измеряться в различных единицах. Если входные (выходные) слова имеют одинаковую длительность, скорость передачи информации в единицах на слово совпадает с количеством информации, определенным выражениями (2—3), (2—4), (2—6). Для многобуквенных слов можно определить скорость в единицах на букву.

Если буквы и слова имеют одинаковую длительность, то скорость передачи в единицах на букву равна:

$$R_b = \frac{I}{T}. \quad (2-9a)$$

Здесь I — количество информации на слово;

T — количество букв в слове.

Если слова имеют разное число букв одинаковой длины:

$$R_b = \frac{I}{\sum_A p(a_j) l_j} \quad (2-9b)$$

Здесь l_j — длина (в буквах) слова a_j .

Если слова имеют одинаковое количество букв разной длительности:

$$R_b = \frac{I}{l \sum_A p(a_j) t_j} \quad (2-9b)$$

Здесь l — число букв в слове;

t_j — длительность слова a_j .

Если же слова состоят из разного числа букв и буквы имеют разную длительность, то:

$$R_b = \frac{I}{\sum_A p(a_j) n_j \sum_A p(a_j) t_j} \quad (2-9c)$$

Здесь n_j — число букв в слове a_j .

Рассмотрим матрицу простого автомата. Выделим подматрицу, число строк которой совпадает с числом строк матрицы преобразования таким образом, чтобы в подматрицу вошли столбцы матрицы преобразования с элементами, удовлетворяющими следующим условиям:

$$\left. \begin{aligned} p(a_\alpha | b_\beta) &= \max_k [p(a_\alpha | b_k)] \\ p(a_\alpha | b_\beta) &> p(b_\beta) \\ p(a_\alpha | b_k)_{k \neq \beta} &< p(b_k)_{k \neq \beta} \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

Пусть в каждой строке существует только один элемент, удовлетворяющий условиям (2—10). Будем считать, что слово b_β соответствует слову a_α и автомат правильно преобразовывает информацию, если имеет место

$$a_\alpha \wedge b_\beta = 1, \quad (2-11)$$

то есть если осуществляется совместное появление a_α и b_β . Пусть слова из B , имеющие положительную (ненулевую) вероятность появления при правильном преобразовании, образуют подмножество B_β . Очевидно, что число слов в B_β не может превышать числа слов в A . Будем говорить, что имеет место ложное преобразование, если при любом γ :

$$\left. \begin{aligned} B_\gamma &\subset B_\beta \\ a_\alpha \wedge b_\beta &= 0 \\ a_\alpha \wedge b_\gamma &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2-12)$$

то есть, если появляется выходное слово из множества возможных при правильном преобразовании, несоответствующее данному входному.

В остальных случаях будем говорить, что входное сообщение подавляется. Условия подавления:

$$\left. \begin{aligned} a_\alpha \wedge b_\beta &= 0 \\ a_\alpha \wedge b_\delta &= 1 \\ b_\delta &< B_\delta \\ B_\beta \cup B_\delta &= B \\ B_\beta \wedge B_\delta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-13)$$

Множество слов B_δ назовем особым.

В дальнейшем в статье будут рассматриваться автоматы, у которых $n_b \geq n_a$ и каждому входному слову соответствует в точности одно выходное. Поэтому соответствующие слова будем обозначать буквами с одинаковыми индексами.

Вероятность правильного преобразования слова a_j .

$$p_{\text{пр}}(a_j) = p(b_j | a_j).$$

Средняя вероятность правильного преобразования:

$$p_{\text{пр}} = \sum_A p(a_j) p(b_j | a_j). \quad (2-14)$$

Вероятность ложного преобразования слова a_j :

$$P_{\text{л}}(a_j) = \sum_{B_{\beta}} p(b_k | a_j) p(b_k \in B_{\beta}).$$

Средняя вероятность ложного преобразования:

$$P_{\text{л}} = \sum_A p(a_j) \sum_{B_{\beta}} p(b_k | a_j) p(b_k \in B_{\beta}). \quad (2-15)$$

Вероятность подавления слова a_j :

$$P_{\text{по}}(a_j) = \sum p(b_k | a_j) p(b_k \in B_0).$$

Средняя вероятность подавления:

$$P_{\text{по}} = \sum_A p(a_j) \sum_{B_0} p(b_k | a_j) p(b_k \in B_0). \quad (2-16)$$

Итак, вероятностный конечный автомат, рассматриваемый как устройство для преобразования информации, может быть охарактеризован следующими параметрами:

коэффициентом полезного действия по информации;
скоростью передачи информации, выраженной в тех или иных единицах;

вероятностью правильного преобразования;

вероятностью искажения и

вероятностью подавления входного сообщения.

Для оценки качества автомата как преобразователя информации представляется целесообразным использовать все упомянутые выше параметры, учитывая большее или меньшее значение каждого из них в конкретных условиях.

Представим формулу для определения количества информации в следующем виде:

$$\begin{aligned} I = & \sum_A \sum_{B_{\beta}} p(a_j) p(b_j | a_j) \log \frac{p(b_j | a_j)}{p(b_j)} + \\ & + \sum_A \sum_{B_{\beta}} p(a_j) p(b_k | a_j) p(b_k \in B_{\beta}) \log \frac{p(b_k | a_j) p(b_k \in B_{\beta})}{p(b_k)} + \\ & + \sum_A \sum_{B_0} p(a_j) p(b_k | a_j) \log \frac{p(b_k | a_j)}{p(b_k)}. \end{aligned} \quad (2-17)$$

В этой формуле каждый член имеет вполне определенный смысл. Первый член показывает среднее количество информации при только правильном преобразовании и поэтому (2—10) всегда положителен; второй характеризует увеличение неопределенности на выходе относительно входа при искажениях и всегда отрицателен; третий показывает количество информации при подавлении сообщения и может быть положительным, отрицательным или равным нулю, причем величина и знак его зависят от характеристик источника информации и матрицы преобразования.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ АВТОМАТОВ

Рассмотрим последовательное соединение двух простых автоматов. При этом множество $B = \{b_k\}$ выходных слов первого автомата является множеством входных слов второго. Очевидно, что эквивалентный автомат также будет простым. Оба автомата характеризуются соответствующими матрицами преобразования:

$$\| p(b_k | a_j) \| \quad \text{и} \quad \| p(c_l | b_k) \|.$$

Условная вероятность появления на выходе второго автомата слова c_l при подаче на вход первого слова a_j равна:

$$\begin{aligned} p(c_l | a_j) &= p(b_1 | a_j) p(c_l | b_1) + p(b_2 | a_j) p(c_l | b_2) + \dots = \\ &= \sum_B p(b_k | a_j) p(c_l | b_k). \end{aligned}$$

Аналогично:

$$p(c_l | a_j) = \sum_B p(b_k | a_j) p(c_l | b_k). \quad (3-1)$$

Матрица преобразования, характеризующая автомат, эквивалентный двум последовательно соединенным, состоит из элементов, определяемых по (3—1) и имеет размерность $n_a \times n_c$, где n_a — число слов во входном словаре A первого автомата и n_c — число слов в выходном словаре C второго автомата. Эта матрица представляет собой не что иное, как произведение матриц преобразования соединяемых автоматов, то есть:

$$\| p(c_l | a_j) \| = \left\| \sum_B p(b_k | a_j) p(c_l | b_k) \right\| = \| p(b_k | a_j) \| \cdot \| p(c_l | b_k) \|. \quad (3-2)$$

Как было показано раньше, независимый и марковский автоматы могут быть заменены эквивалентными простыми. Поэтому для автомата, эквивалентного соединению непростых автоматов, будет справедливо следующее равенство:

$$\| (p(c_l | a_j))_{cp} \| = Mo \| p(c_l | a_j) \| = Mo \| p(b_k | a_j) \| \cdot Mo \| p(c_l | b_k) \|. \quad (3-3)$$

Рассмотрим теперь случай, когда второй автомат разбивает выходное множество первого на подмножества неразличимых (с точки зрения второго автомата) слов и затем преобразовывает эти подмножества

в свои выходные слова. При этом подмножества должны удовлетворять следующим условиям:

$$\bigcup_B B_m = B \quad \left\{ \begin{array}{l} B_1 \wedge B_2 = B_1 \wedge B_3 = \dots = B_1 \wedge B_j = \dots = 0, \end{array} \right. \quad (3-4)$$

то есть совокупность подмножеств должна быть полной (охватывать все члены множества B) и подмножества должны быть попарно непересекающимися.

Поскольку слова в каждом из подмножеств неразличимы, то признаком появления подмножества может считаться появление любого из принадлежащих данному подмножеству слов.

Условная вероятность появления подмножества B_m при подаче на вход первого автомата слова a_j равна:

$$p(B_m | a_j) = \sum_{B_m} p(b_k | a_j). \quad (3-5)$$

Заменяем первый автомат с матрицей преобразования

$$\| p(b_k | a_j) \|$$

автоматом с матрицей

$$\| p(B_m | a_j) \| = \left\| \sum_{B_m} p(b_k | a_j) \right\|. \quad (3-6)$$

Матрица (3-6) характеризует преобразование входных слов a_j в подмножества B_m . Но в этом случае:

$$\| p(c_i | a_j) \| = \| p(B_m | a_j) \| \cdot \| p(c_i | B_m) \| = \left\| \sum_{B_m} p(b_k | a_j) \right\| \cdot \| p(c_i | B_m) \|. \quad (3-7)$$

Таким образом, матрица преобразования автомата, эквивалентного двум соединяемым при условии, что выходное множество слов первого разбивается на подмножества и эти подмножества преобразуются вторым в выходные слова, равна произведению матрицы преобразования слов из входного множества первого автомата в подмножества на его выходе (матрица определяется по 3-6) на матрицу преобразования второго автомата.

Формулы (3-3) и (3-7) легко обобщить на случай расчета матрицы преобразования автомата, эквивалентного сколь угодно большому числу последовательно соединяемых вероятностных конечных автоматов.

Качество системы передачи дискретной информации можно определить теми же параметрами, которыми определялось качество вероятностного конечного автомата как устройства преобразования информации. При этом система передачи дискретной информации, не имеющая обратной связи, может быть представлена в виде последовательного соединения трех вероятностных конечных автоматов, соответствующих кодирующему устройству, каналу связи и декодирующему устройству. При этом, в общем случае, выходное множество слов второго автомата, соответствующего каналу связи, разбивается на подмножества, которые затем преобразуются в выходные слова системы.

В работе содержатся лишь начальные результаты применения методов теории вероятностных конечных автоматов к анализу систем передачи информации, однако уже эти результаты показывают практическую применимость метода (пока к частному случаю — системе без обратной связи).

Возникает целый ряд новых вопросов, решение которых, по-видимому, представляет практический и теоретический интерес. Вот некоторые из этих вопросов:

исследование марковских автоматов с целью внутренних состояний порядка выше первого;

исследование марковских автоматов вблизи начала цепи состояний, когда сильно сказывается влияние начального состояния автомата;

исследование информационных характеристик автоматов с целью состояний, зависимой от входных (выходных) сигналов автомата. Подобные автоматы соответствуют системам передачи информации, имеющим решающую обратную связь и ограниченное число повторений;

анализ методами теории вероятностных конечных автоматов некоторых конкретных систем кодирования информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Хинчин. Понятие энтропии в теории вероятностей. УМН, 8, вып. 3 (55), 1953.
2. А. Я. Хинчин. Об основных теоремах теории информации. УМН, 11, вып. 1 (67), 1956.
3. В. И. Сифоров. Параметры систем бинарного кодирования. «Электросвязь», 11, № 1, 1957.
4. Л. Ф. Бородин, Е. Н. Зотова. Параметры систем передачи дискретных сообщений. Научные доклады высшей школы. Серия: «Радиотехника и электроника», № 1, 1958.
5. Р. И. Юргенсон. Синтез кодирующих и декодирующих устройств телемеханики дискретного действия. ЛЭТИ, Л., 1959.
6. Феллер. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. ИЛ, М., 1952.
7. Р. Р. Васильев, Г. А. Шастова. Передача телемеханической информации. ГЭИ, М.—Л., 1960.
8. С. Е. Shannon. A Mathematical Theory of Communication. BSTJ, vol. 27, 1948.
9. F. Wood. Optimum blok length for data transmission with error checking. Communication and Electr., N 1 (40), 1959.
10. P. Elias. Coding for noisy channels. IRE National Convention Records, pt. 4, 1955.
11. G. S. Glinski. Information Theory Problems of Unreliable Finite Automata Presented at Symposium on Relay Systems Theory and Finite Automata. Moscow, 1962.
12. W. R. Bennett, P. E. Froehlich. Some results on the effectiveness of error-control procedures in digital data transmission IRE Trans., CS—9, № (86), 1961.
13. O. Onicescu. Calculul probabilităților. București, 1956.

О. К. БАЗИЛЕНКО

ТРАНСФОРМАЦИЯ ИНФОРМАЦИИ ДЕ КЭТРЕ АУТОМАТЕЛЕ ФИНИТЕ ПРОБАБИЛИСТИЧЕ

Резюме

Се фаче анализа унор партикуларитэць але системелор пентру транс-
мисия информации, каре фак парте дин системеле телеаутоматизате,
кынд еле сынт фолосите ымпреунэ ку машиниле де калкул.

Система де информации се анализэзэ ка ун ансамблу де аутомате фи-
нале посибиле.

Г. В. ЧАЛЫП

К ВОПРОСУ О ТЕНДЕНЦИЯХ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И КОМПЕНСАТОРОВ

XXII съезд КПСС поставил перед энергетиками и электромашиностроителями страны грандиозную задачу — обеспечить к 1980 г. производство электроэнергии на уровне 3-х триллионов *квтч* в год. Это требует увеличения установленной мощности на наших электростанциях с 66,7 млн. *квт* в 1960 г. до 600—640 млн. *квт* к 1980 г.

Такое колоссальное приращение мощностей можно осуществить, естественно, только путем сооружения соответствующего количества сверхмощных гидравлических и тепловых электрических станций — тепловых по 1200—2400—3000 *мвт* и гидравлических по 4000—8000 *мвт*. Определяющими факторами, в связи с этим, неизбежно будут огромные мощности агрегатов (200—1000 и даже 1500 *мвт* в единице) и необходимость расположения многих из этих электростанций вблизи источников энергии — вдали от центра нагрузки, то есть появление длинных (1000—1500 и больше километров) линий передач, рассчитанных на передачу огромного количества электроэнергии; значительная часть этих электропередач будет выполнена на переменном токе.

Указанные обстоятельства определили, в свою очередь, необходимость создания для мощных синхронных генераторов — как гидрогенераторов, предназначенных для работы через длинные линии передачи, так и для турбогенераторов и синхронных компенсаторов — принципиально новых возбуждателей, так как «обычные» — вращающиеся — возбуждители не только не могут обеспечить для таких синхронных машин требуемые параметры, но и в ряде случаев уже просто не могут быть выполнены.

Следует также иметь в виду и еще одно обстоятельство: необходимость сооружения мощных турбогенераторов (200 *мвт* и выше) и невозможность, по соображениям механики, увеличить размеры ротора турбогенератора сверх размеров ротора машины примерно в 150 *мвт* вызывает необходимость применения резко повышенных плотностей тока в обмотках. Такое повышение плотности тока достигается возможным благодаря применению непосредственного охлаждения каждого из стержней статора и ротора водородом с давлением в 1—5 *атм* или жидкостью. Из-за большой, двух-трехкратной плотности тока, по сравнению с применявшейся до сих пор, потери мощности на возбуждение у новых турбогенераторов увеличиваются в 2—2,5 раза и достигают 0,4—0,5% мощности агрегата.

Действительно, уже турбогенераторы мощностью в 200—300 *мвт* требуют возбуждателей в 800—1500 *квт*, то есть возбуждателей на ток в 2000—3000 ампер при напряжении 400—500 *в*. Для генераторов же по

500—1000 *мвт* эти параметры могут оцениваться, соответственно, в 5000—10 000 *а* при напряжении порядка 500 *в*. Решение такой задачи с помощью «нормальных» машинных возбуждателей, то есть вращающихся генераторов постоянного тока, размещаемых на одном валу с возбуждаемым генератором, при номинальной скорости вращения в 3000 *об/мин*, естественно, становится как конструктивно, так и по условиям работы коллектора либо весьма трудным (для турбогенераторов в 200 *мвт*), либо вовсе невозможным (для турбогенераторов в 300 *мвт* и выше).

Современные горизонтальные синхронные компенсаторы мощностью 75 *мва* на 1000 *об/мин*, предназначенные для оконечных подстанций, должны длительно допускать ток возбуждения порядка 1400 *а* (при «перевозбуждении») при напряжении 220 *в*. Желательная кратность форсировки напряжения возбуждения — 2,5÷3. Вращающиеся возбуждители требуемых параметров для таких компенсаторов получаются весьма громоздкими. К возбуждителям же компенсаторов, предназначенных для установки на промежуточных подстанциях, предъявляются еще более жесткие требования, в частности, более высокие кратности напряжения возбуждения и возможность реверсирования тока в обмотке возбуждения.

Успехи машиностроения в области охлаждения обмоток крупных синхронных машин, о чем говорилось выше, приведут, вероятно, к возможности существенного увеличения мощности горизонтальных синхронных компенсаторов в тех же — предельных — габаритах. Увеличение плотности тока в обмотках возбуждения приведет, в свою очередь, к такому увеличению мощностей возбуждения, что его будет уже невозможно (или весьма трудно) осуществлять с помощью вращающихся возбуждателей, особенно в случае компенсаторов для промежуточных подстанций, о чем указывалось выше.

Гидрогенераторы Волжской ГЭС им. В. И. Ленина, мощностью по 105 *мвт* при 68,2 *об/мин*, имеют номинальные параметры возбуждения — 1880 *а*, 380 *в*. Гидрогенераторы Братской ГЭС по 225 *мвт* при 125 *об/мин*, соответственно, имеют 1600 *а*, 430 *в*; Красноярской ГЭС, мощностью по 500 *мвт* при 107 *об/мин*, — 3500 *а*, 650 *в*.

Гидрогенераторы мощностью в 1000 *мвт* в единице должны иметь номинальный ток возбуждения порядка 5000—7000 ампер при напряжении около 500 *в*. Естественно, что тихоходные вращающиеся возбуждители, располагаемые на валу гидрогенератора, должны иметь чрезмерные габариты; выполнить их было бы, в лучшем случае, очень трудно.

Дополнительные и весьма существенные трудности в создании возбуждателей для мощных синхронных машин, особенно гидрогенераторов, возникают в случае работы их на нагрузку через длинные линии передач.

Известно, что пропускная способность линии передачи переменного тока, например, напряжением 400 *кв*; длиной около 1000 *км* в нормальном режиме, без каких-либо специальных мер по повышению устойчивости передачи, составляет всего около 350 *мвт*, при коэффициенте запаса 1,15 [1]. Такая пропускная способность, естественно, совершенно недостаточна, и для обеспечения устойчивой передачи по длинным линиям переменного тока мощности, достаточной по технико-экономическим соображениям (1000—1200 *мвт* для линии Куйбышев — Москва, например), необходим комплекс специальных мероприятий.

Повышение динамической устойчивости может быть, как известно, достигнуто различными мероприятиями: максимальным увеличением

скорости отключения поврежденного участка энергосистемы, уменьшением реактивного сопротивления линии передачи и введением различного рода устройств, компенсирующих реактивное сопротивление линии передачи — статических и вращающихся, быстрым введением в сеть или в нуль генератора значительных активных сопротивлений, применением демпферных обмоток у генераторов, увеличением механической инерции агрегатов, аварийным регулированием первичных двигателей — турбин (механическое торможение агрегатов) и, наконец, аварийным электрическим торможением ротора путем увеличения магнитного тормозного момента — с помощью возбудителей, обладающих высокой форсировочной способностью.

Мероприятия, дающие наиболее значительный эффект, — такие, как уменьшение реактивного сопротивления собственно элементов системы — линии (расщепление проводов, например), трансформаторов и генераторов, а также применение всякого рода компенсаторов связаны со значительными материальными затратами. Из мероприятий, позволяющих существенно повысить динамическую устойчивость, своей эффективностью и отсутствием специальных материальных затрат выгодно выделяется применение возбудителей, обладающих высокой форсировочной способностью — высокими «потолками» напряжения (кратностью напряжения на обмотке возбуждения генератора при форсировке по отношению к номинальному) и большой скоростью нарастания его. Это справедливо как для генераторов, так и для синхронных компенсаторов, включаемых вдоль линии передачи [2, 3, 4, 5].

Форсировка возбуждения оказывает благотворное влияние не только на устойчивость работы собственно генераторов при динамических нарушениях, при массовом внедрении форсировки повышается устойчивость работы всей энергосистемы [1, 2, 3, 5].

В комплекс мероприятий по повышению статической устойчивости, прежде всего, входят мероприятия по компенсации параметров линии передачи и, как весьма эффективные, мероприятия по соответствующему регулированию возбуждения генераторов. Величина передаваемой мощности может быть доведена до величины, равной предельной мощности линии за счет автоматического регулирования возбуждения генераторов — регулированием быстродействующими регуляторами, не имеющими зоны нечувствительности и осуществляющими так называемое «сильное» регулирование — то есть регулирование не только по отклонению параметра, но и по его производным. При этом задача максимального повышения статической устойчивости существенно облегчается, если и сам регулятор и вся система возбуждения генератора обладают минимальным запаздыванием и минимальной постоянной времени [6, 7, 8, 9, 11].

Ряд работ советских ученых [2, 3, 5, 7, 10, 11, 13, 12 и др.] показал большую роль системы возбуждения (и регуляторов возбуждения) и в повышении динамической устойчивости.

Для наибольшего эффекта в повышении динамической устойчивости, при резком нарушении работы линии передачи, необходимо возможно быстрее полностью локализовать действия избыточных моментов на роторе, появляющихся при динамическом переходе. Для того, чтобы в возможно большей степени противодействовать с помощью системы возбуждения генератора избыточному моменту на роторе, появляющемуся, например, при коротком замыкании в линии, необходимо, по возможности мгновенно, приложить возможно больший противодействующий тормозной электромагнитный момент, который нужно создать за счет максимального повышения тока возбуждения генератора (за счет мак-

симального повышения вынужденного тока ротора). Так как избыточный момент при коротком замыкании появляется непосредственно в момент возникновения короткого замыкания, то, естественно, для наиболее успешной его локализации добавочный электромагнитный тормозной момент следует принудительно создать по возможности сразу же по возникновении короткого замыкания. Также естественно, что чем быстрее будет создан этот добавочный момент и чем он будет большим, тем меньше будет первый «вылет» ротора генератора (то есть увеличение угла между векторами ЭДС генератора и напряжения приемного конца линии) — тем выше будет запас динамической устойчивости генератора (и передачи).

Увеличение угла окажется тем меньшим, чем быстрее будет начата форсировка возбуждения генератора в первый период качания ротора при динамическом переходе и чем большей будет скорость нарастания вынужденного тока возбуждения генератора. (При применении неправильного закона регулирования в последующие циклы качаний ротора генератор также, естественно, может выпасть из синхронизма, но все же основное влияние на удержание генератора в синхронизме — со стороны системы возбуждения — оказывает поведение системы возбуждения в первом полупериоде — сразу же после возникновения нарушения.)

Таким образом, повышение динамической устойчивости за счет системы возбуждения будет тем большим, чем быстрее и мощнее окажется форсировка возбуждения генераторов. При этом существенный эффект может быть получен только при значительном увеличении форсировочной способности возбудителей. Если обычный возбудитель имел «потолок» напряжения порядка 1,7—1,9, то для получения заметного эффекта потолок должен быть повышен не менее чем до 3—4, при скорости нарастания не меньшей 5—7-кратного номинального напряжения в секунду.

Исследования [13, 8, 11] показали, что, хотя динамическая устойчивость повышается и в случае повышения кратности потолочного напряжения возбудителя и в случае повышения скорости его нарастания, повышение кратности потолка, при относительно высоких скоростях подъема напряжения на обмотке ротора, сказывается резко, чем повышение скорости нарастания. Однако следует иметь в виду, что повышение кратности потолочного напряжения ограничено трудностью осуществления должной изоляции обмотки ротора (особенно у турбогенераторов). Повышение же скорости нарастания напряжения, при ограниченной конечной величине этого напряжения, относительно безопасно, ибо скорость нарастания тока в обмотке ротора, а следовательно и магнитного потока в роторе и ЭДС на других обмотках машины, остается все же относительно небольшой.

Таким образом, для максимального повышения запаса динамической устойчивости дальнейшей передачи энергии на переменном токе желательно, чтобы скорость изменения напряжения на обмотке ротора генератора была максимальной, а кратность потолочного напряжения, при номинальном напряжении порядка 300—500 в, была 4—5.

Повышение запаса устойчивости передачи за счет применения возбудителей с высокой форсировочной способностью может быть использовано самым различным образом — либо просто для повышения мощности, передаваемой по некоторой линии, либо для уменьшения затрат на другие мероприятия по компенсации параметров линии передачи («удешевление» линии), либо, наконец, для уменьшения размеров генераторов (в частности — гидрогенераторов) и снижения их стоимости.

До недавнего времени считалось, как уже говорилось, что одним из наиболее эффективных средств повышения статической и динамической устойчивости передачи является снижение синхронной и переходной реактивности генератора, а также увеличение махового момента ротора. Исследования, проведенные в последнее время, показали, что такой же эффект может быть достигнут применением быстродействующего возбуждения и регуляторов сильного действия.

Таким образом, имеется возможность отказаться от искусственного снижения реактивностей и увеличения махового момента. При этом следует иметь в виду, что вес и стоимость гидрогенератора обратно пропорциональны корню квадратному из переходной реактивности. Ориентировочно можно считать, что система возбуждения с пятикратным потолком и со скоростью нарастания напряжения при форсировке до 150—200 номинальных напряжений в секунду, при прочих равных условиях, дает такой же эффект, что и снижение переходной реактивности на 40—50%. Снижение же переходной реактивности генератора на такую величину могло быть получено, в конечном счете, только за счет увеличения веса (и стоимости) генератора на 18—22%, не считая увеличения габаритных размеров генератора.

Так, например, для гидрогенераторов Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС, спроектированных в расчете на быстродействующее ионное возбуждение, инерционная постоянная ротора составляет около 12 сек, а у ранее созданных гидрогенераторов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина, спроектированных в расчете на «обычное» машинное возбуждение, — 16 сек, при той же мощности и скорости вращения. Только одно это обстоятельство дало возможность снизить вес ротора примерно на 100 т.

Следует также иметь в виду, что наличие быстродействующей системы возбуждения весьма существенно улучшает электродинамические характеристики генераторов, во много раз убыстряя и облегчая протекание любых переходных процессов в генераторах (рис. 6, 7, 8), чем значительно увеличивается надежность работы всей электростанции и энергосистемы при различных внезапных изменениях режима.

Резюмируя все сказанное выше, можно сформулировать основные требования к возбудителям мощных и сверхмощных генераторов, в том числе и генераторов, предназначенных для работы через длинные линии передач, следующим образом:

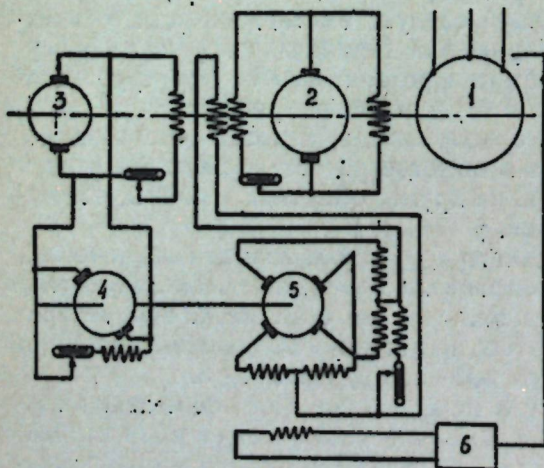


Рис. 1. Система машинного возбуждения с тихоходным возбудителем.

1 — главный (возбуждаемый) генератор; 2 — главный возбудитель; 3 — подвозбудитель; 4 — приводной двигатель электромашинного усилителя; 5 — электромашинный усилитель; 6 — устройство автоматического регулирования.

1. Кратность форсировки напряжения возбуждения гидрогенераторов — 4—6; турбогенераторов — 2—3.

2. Скорость нарастания напряжения на кольцах ротора не менее 5—7 номинального напряжения в секунду. Желательно — максимально возможная.

3. Возможность как можно более быстрого развозбуждения и гашения магнитного поля генератора.

4. Гибкость, малая мощность управления и возможность применения любых ав-

томатических регуляторов возбуждения.

5. Возможность полной автоматизации.

6. Простота конструкции, надежность.

Выполнение, в частности, требования по кратности форсировки предполагает получение тока в обмотке ротора сверхмощных гидрогенераторов во время форсировок до 6000—6500 а, при напряжении на кольцах ротора около 3000—3200 в для машин мощностью 500 мвт (Красноярская ГЭС) и, соответственно, 12000—15000 а для гидрогенераторов мощностью 1000 мвт.

Для сверхмощных турбогенераторов это составит около 4500—5000 а (турбогенераторы 300 мвт) и 15000—18000 а (турбогенераторы 1000 мвт).

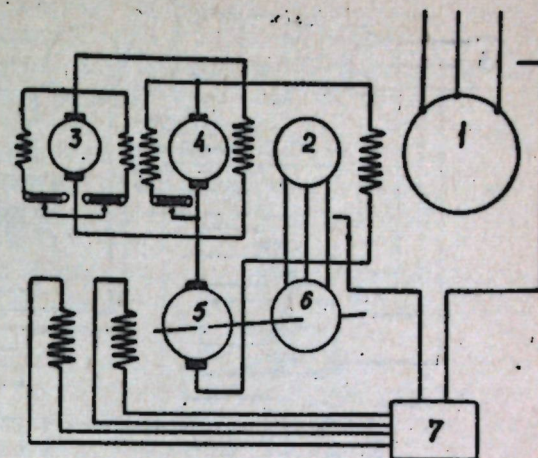


Рис. 2. Быстродействующая машина — «бустерная» — система возбуждения:

1 — главный (возбуждаемый) генератор; 2 — вспомогательный генератор; 3 — возбудитель вспомогательного генератора; 4 — главный возбудитель главного генератора; 5 — вольтодобавочный генератор постоянного тока (бустер-возбудитель); 6 — приводной двигатель бустер-возбудителя; 7 — устройство автоматического регулирования.

* * *

Исходя из приведенных выше требований, уже для гидрогенераторов по 105 мвт Волжской ГЭС им. В. И. Ленина и для турбогенераторов мощностью 200 мвт были разработаны принципиально новые системы возбуждения, в той или иной степени удовлетворявшие основные положения требований.

Для гидрогенераторов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина заводом «Электросила» были разработаны две системы возбуждения: 1. Система машинного возбуждения с тихоходным возбудителем (располагаемым на одном валу с возбуждаемым генератором) и с двухступенчатым быстроходным электромашинным усилителем (рис. 1 и 2). Быстродействующая система машинного возбуждения с тихоходным основным возбудителем и быстроходным вспомогательным бустер-возбудителем (рис. 2). Заводом «Электросила» разработаны [14, 16] также системы возбуждения с полупроводниковыми выпрямителями для турбогенераторов завода «Электросила» мощностью в 200—300 мвт (рис. 3).

ЦНИЛ б. ЦКБ «Электропривод» (входящим в настоящее время во ВНИИЭМ) и заводом «Уралэлектроаппарат» были разработаны [15] системы ионного возбуждения с применением ртутных выпрямителей для гидрогенераторов 105 мвт Волжской ГЭС им. В. И. Ленина (рис. 4), гидрогенераторов 115 мвт Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС, гидрогенераторов 225 мвт Братской ГЭС и гидрогенераторов 500 мвт Красноярской ГЭС и др., а также для турбогенераторов Харьковского завода «Электротяжмаш» мощностью по 200 и 300 мвт.

Первая из названных систем — с тихоходным возбудителем и двухступенчатым электромашинным усилителем, хоть и представляла собой попытку решить поставленные задачи по-новому, оказалась недостаточно быстродействующей (потолок около 3,5; скорость нарастания напряжения на кольцах ротора около 1400 в/сек.), и в производство не пошла.

Быстродействующая машинная — бустерная — система возбужде-

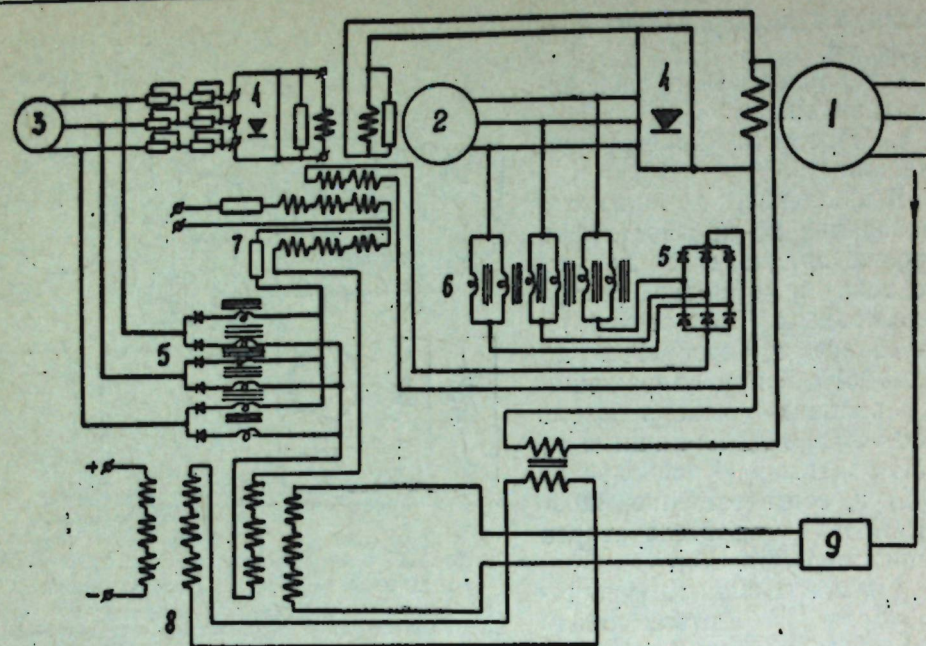


Рис. 3. Система возбуждения турбогенератора с полупроводниковыми выпрямителями:

1 — главный (возбуждаемый) генератор; 2 — вспомогательный генератор (повышенной частоты); 3 — возбудитель вспомогательного генератора; 4, 5 — полупроводниковые выпрямители; 6 — дроссели насыщения; 7, 8 — магнитные усилители; 9 — устройство автоматического регулирования.

ния, осуществленная на первых 11-ти гидрогенераторах Волжской ГЭС им. В. И. Ленина, состоит (рис. 2) из пяти вращающихся машин: главного возбудителя 1600 квт, 800 в, 68,2 об/мин, вспомогательного генератора переменного тока мощностью 3125 кВА, 3150 в, 68,2 об/мин, бустер-возбудителя 800 квт, ± 800 в, 740 об/мин, асинхронного двигателя бустер-возбудителя — 900 квт, 3000 в. Общий вес всей системы — около 6000 т.

В номинальном режиме генератора главный возбудитель дает напряжение, равное двухкратному положительному напряжению ротора главного генератора, а бустер-возбудитель дает отрицательное напряжение, равное по величине номинальному напряжению на роторе (таким образом, на роторе генератора оказывается номинальное положительное напряжение). Для форсировки возбуждения генератора напряжение бустер-возбудителя реверсируется до двухкратного положительного, вследствие чего на ротор главного (возбуждаемого) генератора подается четырехкратное положительное напряжение.

Управление бустер-возбудителем осуществляется электронно-тиatronным регулятором мощностью около 160 квт при напряжении ± 2000 в. В целях уменьшения постоянной времени бустер-возбудителя, в обмотку его возбуждения введено значительное активное сопротивление. Полученная постоянная времени нарастания напряжения на роторе главного генератора — около 0,12 сек. Скорость нарастания напряжения — около 4300 в/сек. Аварийное гашение поля осуществляется с помощью быстродействующего автомата, разрывающего цепь возбуждения главного генератора.

Система возбуждения с полупроводниковыми выпрямителями для турбогенераторов завода «Электросила» (рис. 3, 4) состоит из трехфазного генератора повышенной частоты (400—500 гц) индукторного типа, питающего обмотку возбуждения главного генератора через се-

леновый выпрямитель. Параллельно входу выпрямителя к обмотке статора возбудителя подключены силовые дроссели с подмагничиванием, являющиеся основным регулирующим органом силовой части системы. Регулирование возбуждения турбогенератора осуществляется путем регулирования падения напряжения в обмотке статора возбудителя от тока отсоса силовых дросселей. Степень подмагничивания дросселей изменяется с помощью системы магнитных усилителей.

Скорость нарастания напряжения на кольцах ротора турбогенератора при форсировке относительно невелика — до 8—9-кратного исходного напряжения в секунду.

Аварийное гашение поля турбогенератора осуществляется автоматом гашения поля, производящим коммутацию в цепях возбуждения турбогенератора.

В системах ионного возбуждения (рис. 5) питание обмотки ротора генератора (или компенсатора) производится не от вращающихся машин постоянного тока, а от статических аппаратов — управляемых ионных преобразователей (ртутных выпрямителей).

Выпрямители питаются либо от вспомогательного генератора, расположенного, как правило, на одном валу с главным (возбуждаемым) генератором (так называемое «независимое ионное возбуждение»), либо от шин самого возбуждаемого генератора через «выпрямительный» или «анодный» трансформатор (так называемое «ионное самовозбуждение») [16].

Так, система ионного возбуждения для второй половины гидрогенераторов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина (начиная с генератора № 12) выполнена по схеме независимого возбуждения (рис. 4); аналогичная схема применена, в частности, и для гидрогенераторов Братской ГЭС. Система состоит из вспомогательного генератора переменного тока мощностью 2675 кВА, 1385 в (с отпайкой от 460 в), 68,2 об/мин с возбудителем 84 квт, 210 в, 68,2 об/мин и двух выпрямителей типа РМНВ х 6.

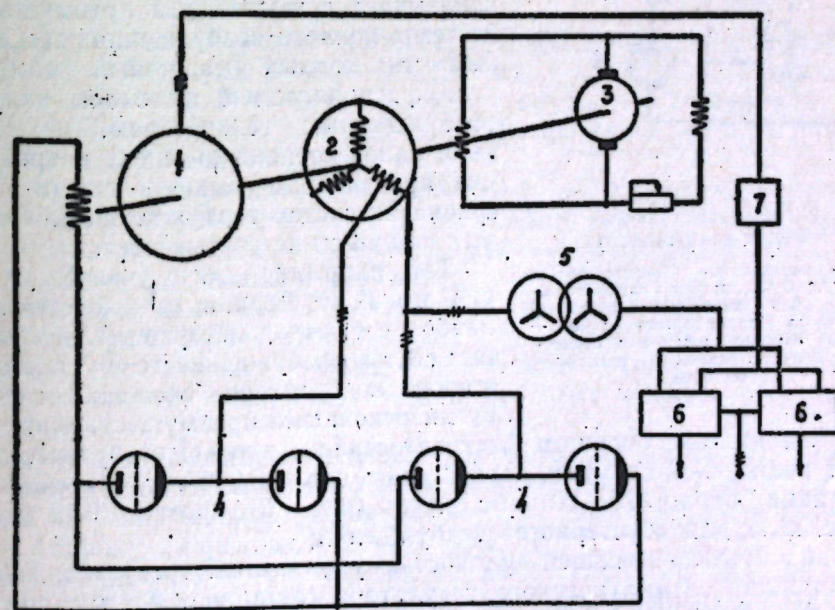


Рис. 4. Принципиальная схема независимого ионного возбуждения мощного гидрогенератора:

1 — главный (возбуждаемый) генератор; 2 — вспомогательный генератор; 3 — возбудитель вспомогательного генератора; 4 — ртутные выпрямители; 5 — трансформатор; 6 — устройство управления ртутными выпрямителями; 7 — устройство автоматического регулирования.

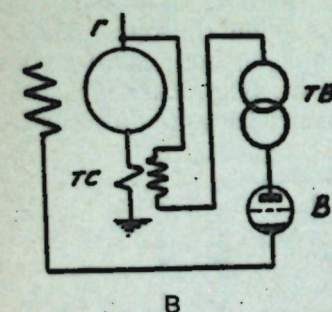
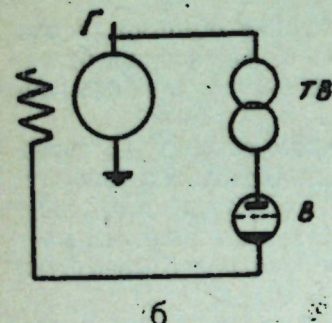
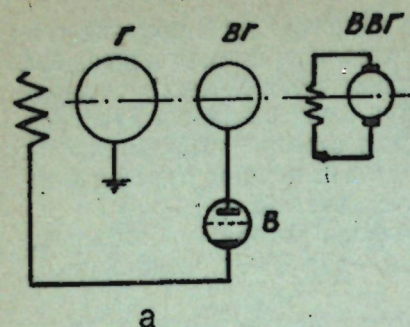


Рис. 5. Скелетные схемы ионного возбуждения:

а — независимое ионное возбуждение; б — ионное самовозбуждение без сериесного вольтодобавочного трансформатора; в — ионное самовозбуждение с сериесным вольтодобавочным трансформатором.

а) значительно большим быстродействием: ионный возбудитель обладает постоянной времени, равной всего около 0,005 сек, при скорости нарастания около 75—80 тыс. в/сек (рис. 6), против 0,12 сек и 4,3 тыс. в/сек для «бустерного» возбуждения;

б) значительно меньшей мощностью управления: требуемая выходная мощность автоматического регулятора составляет 0,5 кВт при напряжении 150 в против 160 кВт при напряжении 2000 в для «бустерной» системы (а в настоящее время во ВНИИЭМ разработана и выпускается система сеточного управления, требующая от автоматического регулятора возбуждения выходную — пиковую — мощность всего около ± 5 вт на весь диапазон нормальных и аварийных режимов генератора);

Один из выпрямителей, цилиндры которого питаются от отпаек обмоток статора вспомогательного генератора (от 460 в), обеспечивает возбуждение генератора во всех нормальных режимах, а второй, питаемый от полного напряжения статора, обеспечивает форсировку напряжения.

Управление выпрямителями производится с помощью системы сеточного управления. Регулирование осуществляется с помощью автоматического регулятора мощностью 0,5 кВт, при напряжении 150 в.

Постоянная времени ионного возбудителя — около 0,005 сек, кратность форсировки (по напряжению) — 5, скорость нарастания напряжения на кольцах ротора — около 75—80 тыс. в/сек.

Аварийное гашение поля производится переводом выпрямителей в инверторный режим, без разрыва цепей возбуждения (воздействием на цепи сеточного управления выпрямителей).

Сравнение новых систем возбуждения, разработанных для мощных гидрогенераторов, предназначенных для работы через длинные линии передачи (для гидрогенераторов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина) — бустерной машинной системы и системы ионного возбуждения, показывает существенные преимущества системы ионного возбуждения. («Обычный» тихоходный машинный возбудитель, располагаемый на одном валу с возбуждаемым генератором, не может ни в какой степени обеспечить требования, приведенные выше, и поэтому при сравнении систем возбуждения для мощных машин он не учитывается.

Так, например, для случая Волжской ГЭС им. В. И. Ленина, по сравнению с наиболее быстродействующей из машинных систем возбуждения (с «бустерной»), ионные возбудители обладают следующими основными преимуществами:

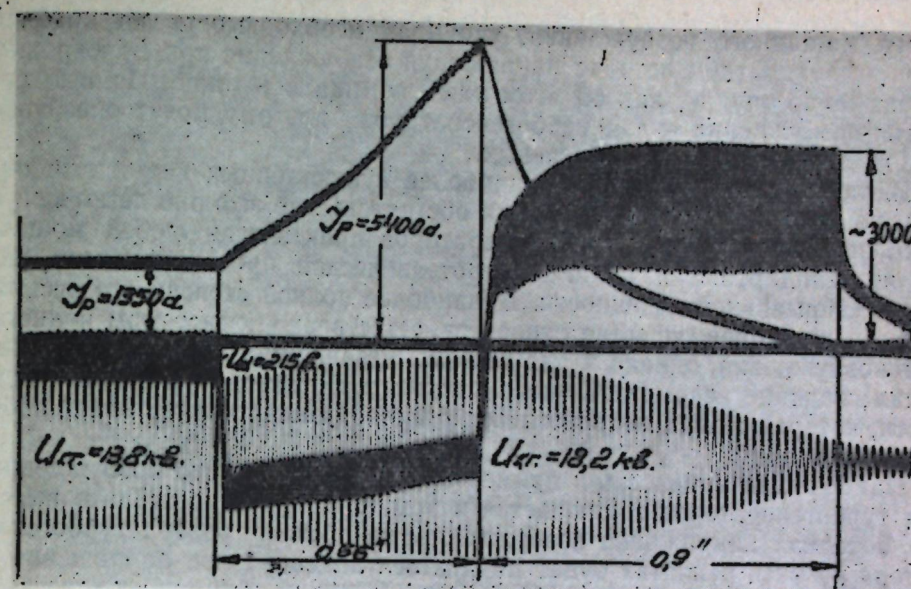


Рис. 6. Оциллограмма форсировки и гашения поля гидрогенератора Волжской ГЭС им. В. И. Ленина:

U_d — выпрямленное напряжение ионного возбудителя (положительное направление — вниз); I_p — ток обмотки ротора гидрогенератора; $U_{гг}$ — напряжение статора гидрогенератора.

в) возможностью производить весьма быстрое гашение магнитного поля генератора с помощью переключений в маломощных (1 а, 100 в) цепях сеточного управления выпрямителей, без каких-либо переключений в силовых роторных цепях генератора (с силой тока в 1900—5000 а) при напряжении до 1600—2000 в, что необходимо в случае машинного возбуждения;

г) существенно меньшей стоимостью, меньшим весом оборудования, меньшими габаритами и весом генератора. Так, стоимость комплекта ионного возбуждения для одного генератора Волжской ГЭС им. В. И. Ленина примерно на 90 тыс. руб. дешевле комплекта «бустерного» машинного возбуждения;

д) большей надежностью и удобствами эксплуатации. Ремонт поврежденного выпрямителя или другого элемента ионного возбудителя (кроме вспомогательного генератора, возможность повреждения которого, практически, исключается), требует во много раз меньшего времени и труда, чем ремонт машинной системы возбуждения. При рациональной компоновке элементов ионного возбудителя полная замена любого из них занимает не более 2—3 часов. Изготовление ионных возбудителей требует также значительно меньшего труда и дефицитных материалов.

В силу приведенных преимуществ, в настоящее время все крупнейшие гидростанции Советского Союза проектируются с ионным возбуждением гидрогенераторов*. Ионными возбудителями снабжаются и наиболее мощные синхронные компенсаторы.

Для мощных турбогенераторов, не работающих на дальние линии передачи, быстродействие системы возбуждения не является столь важным, как для гидрогенераторов, однако и для этих машин выполнить син-

* В работе приводятся данные только о системах ионного возбуждения, уже нашедших применение для крупных машин. В настоящее время существует большое число различных модификаций систем ионного возбуждения, все они не отличаются коренным образом от описанного [16].

стему машинного возбуждения, учитывая необходимость по крайней мере в двухкратном потолке напряжения возбуждения при форсировке, чрезвычайно трудно, как об этом уже упоминалось выше. Ионные системы возбуждения и для турбогенераторов поэтому могут оказаться одними из наиболее перспективных.

В данном случае одним из наиболее существенных достоинств систем ионного возбуждения будет то обстоятельство, что они легко могут быть осуществлены для турбогенераторов практически любой мощности из стандартных изделий электротехнической промышленности, изделий «нормальной» мощности. В наиболее полной степени это весьма существенное преимущество относится, естественно, к системам ионного самовозбуждения, однако и для системы независимого ионного возбуждения создание вспомогательного синхронного генератора любой мощности, которая может потребоваться реально, не составляет какой-либо проблемы.

Наибольшая трудность в применении систем ионного возбуждения для турбогенераторов заключается в том, что, при относительно высоких потолках напряжения возбуждения, на обмотку ротора турбогенератора во всех режимах будет подаваться пикообразное напряжение с относительно большой амплитудой. Это обстоятельство является весьма нежелательным, учитывая большие конструктивные затруднения в выполнении достаточно надежной изоляции полых стержней обмотки ротора мощных турбогенераторов при весьма ограниченных геометрических размерах. Однако, так как для подавляющей части сверхмощных турбогенераторов, в силу особенностей их работы, целесообразная кратность форсировки напряжения будет, видимо, ограничена до 2—2,5, — системы ионного возбуждения и в этих случаях будут одними из наиболее перспективных. Для большинства мощных турбогенераторов целесообразными, по всей вероятности, окажутся модификации наиболее простых схем ионного самовозбуждения (рис. 5, б), с применением токовых стабилизаторов напряжения собственных нужд системы возбуждения, поддерживающих это напряжение практически неизменным при глубоких посадках напряжения на шинах возбуждаемого генератора во время коротких замыканий, либо с применением весьма небольших генераторов собственных нужд, располагаемых на одном валу с турбогенератором.

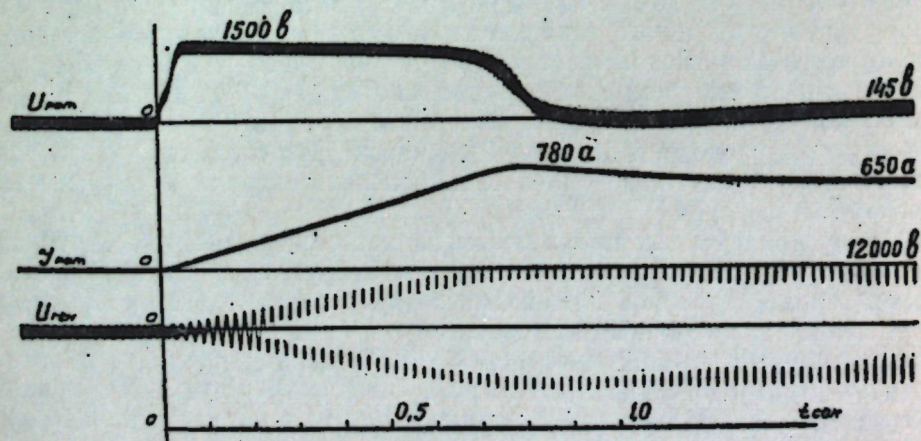
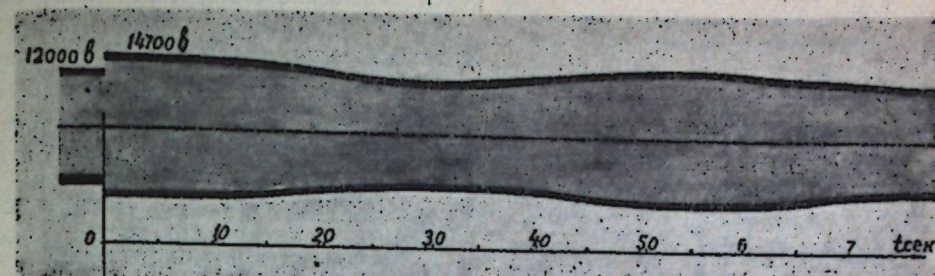
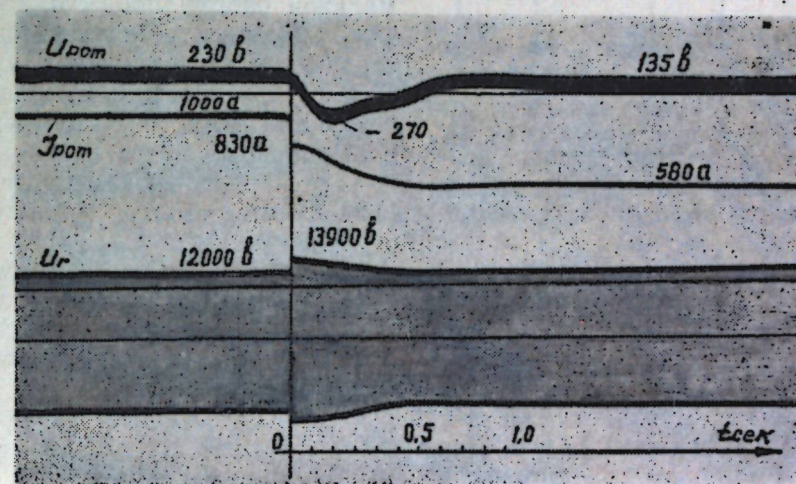


Рис. 7. Осциллограмма ударного возбуждения гидрогенератора мощностью 55 мвт. Ионное возбуждение:

$U_{рот}$ — напряжение на кольцах ротора гидрогенератора (выпрямленное напряжение ионного возбудителя); $I_{рот}$ — ток обмотки ротора; $U_{ген}$ — напряжение статора генератора.



а



б

Рис. 8. Осциллограммы внезапного сброса нагрузки гидрогенератора мощностью 55 мвт (начальная нагрузка: активная 18 мвт, реактивная — 35 мвар; конечная нагрузка равна нулю):

а — с машинным возбудителем; б — с ионным возбудителем.

К настоящему времени ионное возбуждение имеют генераторы Волжских ГЭС им. Ленина и им. XXII съезда КПСС. Ионными возбудителями будут снабжены также генераторы Братской, Красноярской, Нурекской и других крупнейших гидроэлектростанций Союза. Изготовлены и изготавливаются ионные возбудители для крупнейших горизонтальных синхронных компенсаторов мощностью 75 мва и для ряда турбогенераторов мощностью по 200 и 300 мвт. Ионное возбуждение имеют также несколько опытных гидро- и турбогенераторов, на которых отрабатываются отдельные элементы систем возбуждения.

Наладочные работы и эксплуатация ионных возбудителей подтвердили высокие основные достоинства их, однако и вскрыли ряд недостатков, присущих схемам с ионными преобразователями.

В настоящее время на электростанциях эксплуатируются три типа ионных преобразователей: разборные—откатные—ртутные выпрямители типа РМНВ—1000×6 завода «Уралэлектроаппарат» (на Волжской ГЭС им. В. И. Ленина), игнитроны типа ИВС-500 (Волжская ГЭС им. XXII съезда, главные генераторы) и экситроны РМВ-200 (ГЭС им. XXII съезда, вспомогательные генераторы). Все преобразователи — с водяным охлаждением.

Эксплуатация ионных возбудителей на Волжской ГЭС им. В. И. Ленина показала, что почти все нарушения нормальной работы преобразователей происходили по вине вспомогательного оборудования, в

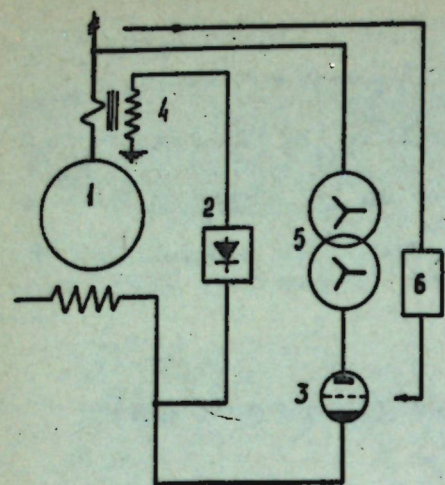


Рис. 9. Скелетная схема комбинированной ионно-полупроводниковой системы:

1 — возбуждаемый генератор; 2 — полупроводниковые выпрямители (неуправляемые); 3 — ионные выпрямители (управляемые); 4, 5 — силовые, питающие трансформаторы; 6 — устройство автоматического регулирования.

Надежность ионных возбуждителей могла бы быть еще более высокой, если бы электротехническая промышленность освоила, наконец, выпуск мощных запаянных экситронов с воздушным охлаждением. Это позволило бы отказаться от недостаточно совершенного вспомогательного оборудования и резко упростило бы схему возбуждения.

Следует полагать, что начавшееся интенсивное развитие выпрямительной отрасли промышленности и работ по созданию новых ионных преобразователей (в частности — в НИИПТ'е и на заводе «Уралэлектраппарат»), позволит уже в ближайшее время иметь в достаточном количестве нужные серийные выпрямители высокого качества, в том числе и запаянные ртутные выпрямители с воздушным охлаждением на 350, 500 и больше ампер в цилиндре. В этом случае полностью сможет быть использовано приведенное выше чрезвычайно существенное достоинство систем ионного возбуждения, заключающееся в возможности осуществления систем возбуждения из стандартных, серийных изделий для генераторов любой практически мощности.

Совершенно необходимым является резкая интенсификация работ у нас в Союзе по созданию мощных неуправляемых и управляемых твердых выпрямителей — германиевых и, особенно, кремниевых. Это позволило бы уже в ближайшие годы осуществить весьма целесообразные системы возбуждения, в частности, — схемы, представляющие собой комбинацию из неуправляемых твердых выпрямителей и управляемых — ртутных (рис. 9), [18].

Такая комбинированная система, у которой основную нагрузку (до номинальной мощности генератора) будут обеспечивать неуправляемые полупроводниковые выпрямители, а дополнительную (позволяющие обеспечить все режимы генератора) — управляемые ионные преобразователи, может оказаться гибкой, малогабаритной и весьма надежной, при сохранении практически всех преимуществ, свойственных системам ионного возбуждения. Системы такого рода в настоящее время разрабатываются рядом иностранных фирм и союзных организаций.

частности — систем охлаждения вентиля и, частично, систем откачки воздуха, как правило, вследствие недостатков конструктивного порядка. Отдельные конструктивные недостатки и недостатки исполнения других элементов вспомогательного оборудования были устранены в период наладки и первых месяцев эксплуатации. Следует при этом подчеркнуть, что все нарушения нормальной работы произошли в начальный период эксплуатации. В последующий период, начиная с конца 1958 г., благодаря выполнению работниками ГЭС ряда мероприятий и накоплению опыта эксплуатации, случаев нарушения нормальной работы из-за системы ионного возбуждения не было [17]. Необходимо также отметить, что все имевшие место нарушения, в силу особенностей систем ионного возбуждения, изложенных выше, ликвидировались весьма быстро.

В последние годы иностранными фирмами разрабатываются и другие, весьма различные новые схемы, в том числе схемы возбуждителей с использованием 3-й гармонической составляющей магнитного потока (США), схемы с управляемыми полупроводниковыми вентилями (Франция, для машин около 2000 кВт). Разрабатываются различные комбинации «ионно-полупроводниковых» систем, с ионными преобразователями, питаемыми от высокочастотного генератора (индукторного и неиндукторного типа — Швейцария, Англия); генераторы до 500 мвт, «бесщелочные» системы возбуждения (с твердыми выпрямителями, укрепленными непосредственно на роторе — США) выполнены для турбогенераторов 50 мвт и 75 мвт, запроектированы для генераторов мощностью до 500 мвт)*.

Некоторое распространение для мощных турбогенераторов получают также относительно тихоходные машинные возбудители, получающие вращение от главного вала через специальный редуктор и отдельные возбудительные агрегаты, состоящие из генератора постоянного тока (возбудителя), маховика и двигателя трехфазного тока, питаемого от сборных полюсов собственного расхода станции (США, для турбогенераторов вплоть до 215 мвт).

Существуют и другие схемы. Наиболее перспективные из перечисленных схем разрабатываются и у нас, в Советском Союзе.

Следует отметить одну характерную особенность всех зарубежных установок — малую кратность форсировки напряжения возбуждения (1,4—1,6, как исключение — 3) и малые скорости нарастания его при форсировке (0,5—1,0 номинального напряжения в секунду).

Каждая из схем имеет, естественно, свои крупные и мелкие достоинства и недостатки. Одной из основных предпосылок быстрого прогресса в разработке схем с различными вариантами применения ионных преобразователей, а также неуправляемых и управляемых полупроводниковых выпрямителей является появление в последние годы мощных преобразователей новых типов.

Так, в США, Англии, ФРГ и Японии уже выпускаются твердые — полупроводниковые — диоды (неуправляемые) на ток 200—1000 ампер и 600—800 в обратного напряжения. В ФРГ, Швейцарии, Англии и США появились и управляемые полупроводниковые вентили на ток до 100 а и обратное напряжение 300—500 в, разрабатываются управляемые полупроводниковые вентили на 100 кВт в единице.

Как некоторый итог из сказанного выше, можно, видимо, констатировать следующие реальные решения, реализующиеся у нас в настоящее время для мощных синхронных машин на ближайшее будущее.

Для гидрогенераторов — независимое ионное возбуждение с применением мощных откачных ртутных выпрямителей с водяным охлаждением (или вентиля с периодической откачкой — один раз в 6—12 месяцев) либо мощных экситронов как с водяным, так и с воздушным охлаждением.

Для турбогенераторов — ионное самовозбуждение (для турбогенераторов и синхронных компенсаторов; для последних — ионное самовозбуждение без серийных вспомогательных трансформаторов);

схемы с высокочастотным генератором индукторного типа на валу возбуждаемого генератора и с твердыми неуправляемыми выпрямителями;

машинный возбудитель, вращаемый от вала возбуждаемого турбогенератора через специальный понижающий редуктор.

* Более подробно см. [19].

Как наиболее перспективная схема для мощных турбогенераторов на ближайшее будущее может рассматриваться система, состоящая из соединенных параллельно неуправляемых полупроводниковых вентилях и управляемых ионных преобразователей (или в будущем — управляемых полупроводниковых вентилях). Такая комбинированная система по своим основным параметрам, как уже говорилось выше, приближается к независимому ионному возбуждению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. И. Азарьев. Повышение пропускной способности электропередач. «Электричество», 1955, № 6.
2. И. А. Сыромятников. Повышение устойчивости электрических систем и обеспечение надежности электроснабжения потребителей. «Электричество», 1946, № 6.
3. И. А. Сыромятников. Режимы работы синхронных генераторов. ГЭИ, 1952.
4. П. С. Жданов. Устойчивость электрических систем. ГЭИ, 1948.
5. И. М. Маркович. Энергетические системы и их режимы. ГЭИ, 1952.
6. С. А. Лебедев. Исследование искусственной устойчивости. «Труды ВЭИ», вып., 40. ГЭИ, 1940.
7. Л. В. Цукерник. Статическая устойчивость электропередачи при сложной системе автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора. «Сборник трудов ИЭ АН УССР», вып. 8, 1952.
8. В. А. Веников. Передачи электроэнергии переменным током на большие расстояния. «Электричество», 1954, № 5.
9. В. А. Веников, И. В. Литкенс. О влиянии регулирования возбуждения на пропускную способность дальних передач. «Электричество», 1955, № 11.
10. В. И. Горушкин. Динамическая устойчивость синхронных генераторов и регулирование возбуждения как средство ее повышения. Докторская диссертация, ЭНИН АН СССР, 1954.
11. В. А. Веников, А. В. Иванов-Смоленский, В. А. Горушкин. К вопросу об эффективности форсирования возбуждения генераторов. «Электричество», 1955, № 1.
12. Г. В. Чалый. Ионное возбуждение мощных синхронных генераторов, работающих через длинные линии передач. Кандидатская диссертация, МЭИ, 1956.
13. А. М. Федосеев, Д. И. Азарьев, И. А. Поляк, Х. И. Орлов. Форсировка возбуждения и динамическая устойчивость синхронного генератора дальней линии передач. Технический отчет. ТЭП, 1953.
14. Я. Н. Штрафун, М. С. Ростовцева. Исследование автоматической системы возбуждения мощных турбогенераторов с силовыми полупроводниковыми выпрямителями. «Электричество», 1958, № 8.
15. Г. В. Чалый, Е. Л. Эттингер, Е. М. Глух. Ионный возбудитель для генераторов Куйбышевской гидроэлектростанции. «Вестник электропромышленности», 1956, № 2.
16. Е. Л. Эттингер, Г. В. Чалый, Е. М. Глух, Я. Н. Штрафун, П. М. Ипатов, Ю. А. Шмай. Вентильное возбуждение синхронных генераторов и компенсаторов. «Вестник электропромышленности», 1959, № 7.
17. М. А. Саркисов, Г. Б. Черников. Эксплуатация установки ионного возбуждения мощных гидрогенераторов. «Электрические станции», 1960, № 5.
18. И. А. Глебов, В. Е. Каштелян, Я. Н. Штрафун. Исследование ионнополупроводниковой системы возбуждения мощных турбогенераторов. «Электричество», 1962, № 5.
19. Ю. А. Шмай, В. Г. Бирюлев. Системы возбуждения синхронных генераторов. «БТИ ОРГРЭС», 1962.

Г. В. ЧАЛЫЙ

ДЕСПРЕ ТЕНДИНЦЕЛЕ ДЕЗВОЛТЭРИИ СИСТЕМЕЛОР ДЕ ЕКСЧИТАЦИЕ А ЖЕНЕРАТОАРЕЛОР СИНКРОНЕ ДЕ МАРЕ ПУТЕРЕ ШИ КОМПЕНСАТОАРЕЛОР

Резумат

Се дескриу ымпрежурэриле, каре ау кондиционат нечеситатя де а креа системе принципиа ной пентру машиниле синкросне.

Се адук унеле дате деспре системеле ной де ексчитацие а хидроженератоарелор, турбоженератоарелор ши а компенсатоарелор синкросне. Се фаче о анализэ компаративэ а ачестор системе.

Се дескриу системеле актуале де ексчитаре ши системеле ку дезволтаре ын перспективэ.

Г. В. ЧАЛЫЙ

ГАШЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ГЕНЕРАТОРАХ С ИОННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

При эксплуатации электрических машин встречается необходимость в «гашении поля» машины — в возможно более быстром сведении магнитного потока возбуждения электрической машины к величине, близкой к нулю.

Необходимость в гашении поля встречается и при нормальной эксплуатации, однако при так называемых «электрических» повреждениях генератора, при коротких замыканиях внутри электрической машины или на его зажимах, при недопустимом повышении напряжения на статоре, гашение поля становится единственной защитой электрической машины. Естественно, чем быстрее будет сведение к нулю величины напряжения, приложенного к месту аварии, тем менее значительными окажутся последствия аварии (или тем быстрее будет восстановлен нормальный режим). Сказанное в наибольшей степени относится к мощным синхронным генераторам электрических станций.

Все способы гашения поля сводятся, в конечном счете, к приведению к минимальной величине тока в обмотке возбуждения генератора.

Если учесть, что номинальные токи возбуждения современных генераторов мощностью 200—300 мвт составляют 2000—3000 а при напряжении 400—500 в, то станут очевидными весьма большие трудности, возникающие при осуществлении этой задачи в системах, обладающих огромными индуктивностями.

Для машин ближайшего будущего — турбо- и гидрогенераторов по 800—1000 мвт в единице — задача становится уже чрезвычайно сложной: в номинальных режимах токи возбуждения этих машин составляют 7000—10 000 а при напряжении на обмотке возбуждения около 500 в; в режимах форсировки эти параметры увеличиваются в 2—4 раза.

Наиболее распространенным до недавнего времени способом гашения поля в генераторах с машинным возбуждением было замыкание обмотки возбуждения генератора на разрядное сопротивление с отключением этого контура от возбудителя (рис. 1, а). Иногда применялись также переключение обмотки возбуждения (изменение полярности возбудителя, рис. 1, б), замыкание обмотки на электрическую емкость (рис. 1, в), замыкание ее на двигатель с независимым возбуждением (разряд на «динамическую емкость», рис. 1, г), замыкание обмотки возбуждения на нелинейное — карборундовое (силитовое) — сопротивление (рис. 1, д).

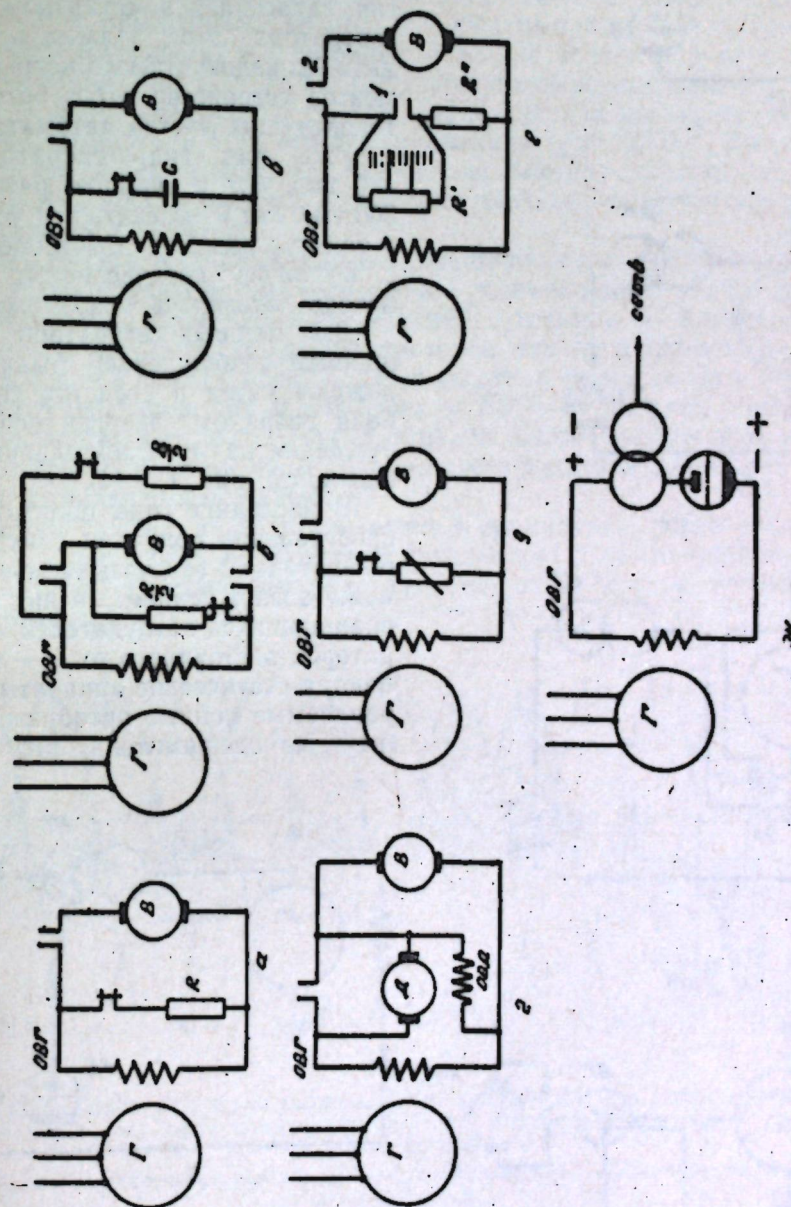
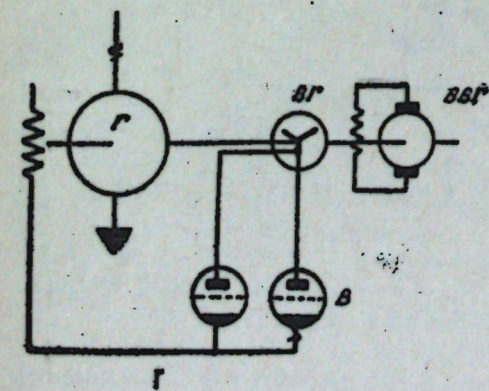
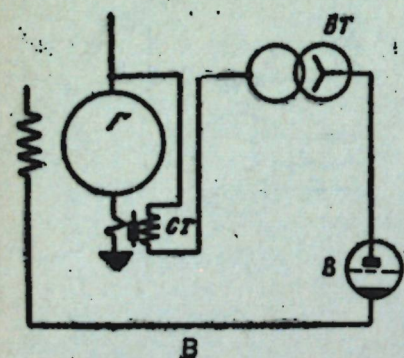
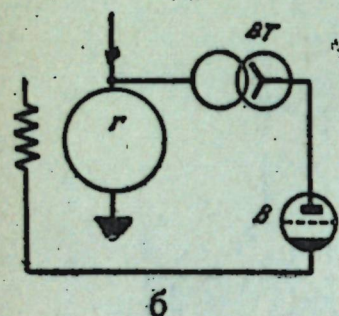
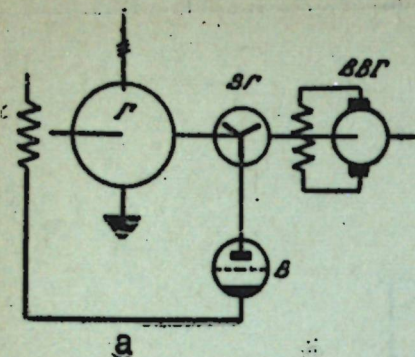


Рис. 1. Схемы гашения поля электрических машин.



Все перечисленные методы требуют для операций по коммутации цепей возбуждения специальных аппаратов — так называемых «автоматов гашения поля». В процессе гашения поля в устройстве гашения поглощается вся или почти вся энергия, запасенная в магнитном поле генератора. Это должно происходить без недопустимого нагрева элементов устройства и без обгорания токоведущих частей автомата.

Уже для гидрогенераторов в 100 тыс. кВт и турбогенераторов в 200 тыс. кВт обеспечить эти условия, а также желаемое быстродействие с помощью перечисленных выше методов оказалось невозможным.

Для мощных генераторов с машинным возбуждением были предложены метод и средства гашения поля разрядом энергии цепи возбуждения на дугогасительную решетку, см. рис. 1, е [4].

В последние годы широкое распространение получили синхронные генераторы с так называемым «ионным» возбуждением: в них вместо вращающихся возбудителей — генераторов постоянного тока — применяются статические аппараты — управляемые ионные преобразователи (ртутные выпрямители, рис. 2)*.

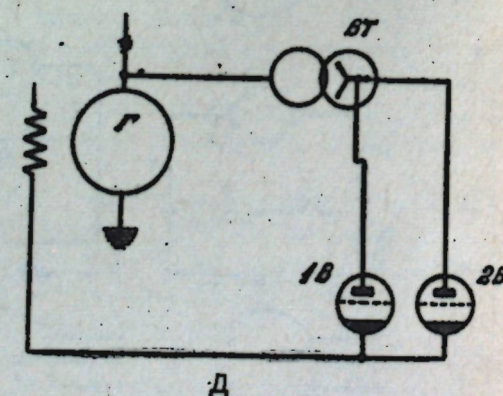


Рис. 2.

Скелетные схемы ионного возбуждения:
а — независимое возбуждение с одной группой вентилей; б — самовозбуждение с одной группой вентилей; в — самовозбуждение с вольтодобавочным трансформатором. Одна группа вентилей; г — независимое возбуждение с двумя группами вентилей; д — самовозбуждение с двумя группами вентилей.

* Подробнее о системах ионного возбуждения см. [1, 2, 3].

Вследствие существенных преимуществ ионных возбудителей [1, 2] ими оснащены часть генераторов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина, все генераторы Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС, а также будут оснащены генераторы Братской, Красноярской ГЭС и все наиболее крупные гидрогенераторы, сооружаемые в СССР.

Гашение поля в системе ионного возбуждения осуществляется изменением угла сеточного управления выпрямителей, переводящим выпрямители в инверторный режим. Перевод выпрямителей в инверторный режим производится с помощью реле или контактора первой (минимальной) величины и не требует никаких переключений в силовых роторных цепях генератора. Энергия, запасенная в магнитном поле генератора, отдается в сеть через выпрямители (рис. 3, д)*. Внешне это выражается только в том, что ток ротора быстро падает до нуля (рис. 4), при достижении током нулевого значения выпрямитель гаснет, гашение поля закончено.

Уже одно это обстоятельство — гашение поля генератора во всех его режимах без каких-либо переключений в силовых цепях, то есть гашение поля генератора переключением в цепях с током в 1—2 ампера при напряжении около 150 в (для генераторов любых мощностей), вместо переключений в цепях с силой тока до десятков тысяч ампер у наиболее мощных генераторов, при напряжении до 2000—2500 в (при гашении поля непосредственно после форсировки), является чрезвычайно существенным преимуществом систем ионного возбуждения перед любой системой машинного возбуждения.

Так как гашение поля применяется в тех случаях, когда нужно возможно быстрее снять возбуждение генератора, вторым наиболее важным фактором является скорость спада тока в обмотке возбуждения генератора при гашении.

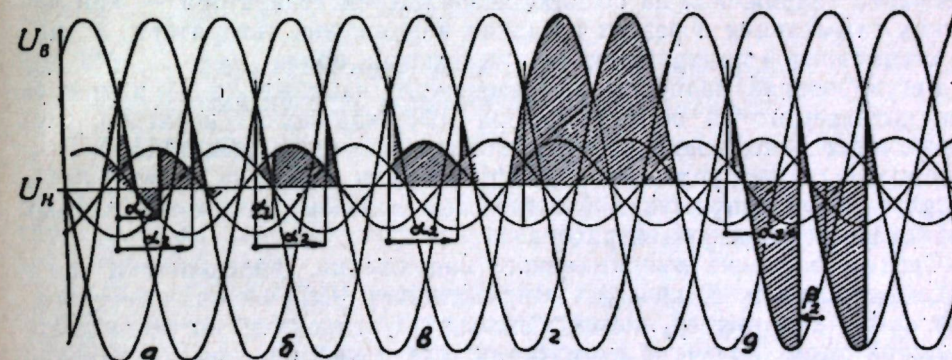


Рис. 3. Упрощенная диаграмма выпрямленного напряжения для схемы с двумя группами вентилей (без учета коммутации тока с анода на анод, для трехфазной нулевой схемы):

U_v — анодное напряжение форсировочной группы вентилей; U_n — анодное напряжение рабочей группы вентилей;

- а — холостой ход генератора, $\alpha_1 \approx 65^\circ$, $\alpha_2 = 125^\circ$;
- б — номинальный режим генератора, $\alpha_1 = 30 \dots 40^\circ$, $\alpha_2 = 125^\circ$;
- в — максимальный режим генератора, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 125^\circ$;
- г — форсировка возбуждения генератора, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0$;
- д — гашение поля генератора, α_1 снимается, $\alpha_2 = 125^\circ$.

* На рис. 3 упрощенно показано выпрямленное напряжение для трехфазной нулевой схемы.

Прежде чем непосредственно сравнить скорость спада тока ротора при различных способах гашения поля, кратко познакомимся с физической сущностью гашения поля для основных систем ионного возбуждения.

В настоящее время разработано несколько вариантов схем ионного возбуждения (рис. 2). Все они, прежде всего, делятся на системы независимого возбуждения и системы ионного самовозбуждения.

В системах независимого ионного возбуждения (рис. 2, а, г) выпрямители питаются от вспомогательного генератора, напряжение которого поддерживается неизменным при всех режимах работы главного генератора.

В системах самовозбуждения (рис. 2 б, е, д) выпрямители питаются либо от самого возбуждаемого генератора через «выпрямительный» трансформатор (рис. 2 б, д), либо через выпрямительный и, дополнительно, сериесный, вольтодобавочный трансформатор, первичная обмотка которого обтекается током статора возбуждаемого генератора (рис. 2, г). Вольтодобавочный трансформатор позволяет поддерживать напряжение на выпрямителе практически неизменным и при глубоких посадках напряжения на шинах генератора — при коротких замыканиях в линии.

Для тех случаев, когда системы возбуждения должны обладать высокими кратностями форсировки напряжения (например, для мощных генераторов, работающих через длинные линии передачи), разработаны схемы возбуждения с двумя параллельными группами вентиля (рис. 2, г, д). В этих схемах одна из групп вентиля — «рабочая»; питаемая от части обмотки вспомогательного генератора (или выпрямительного трансформатора, в случае самовозбуждения), обеспечивает возбуждение генератора во всех нормальных режимах, а вторая — «форсировочная» —, питаемая от полного напряжения, обеспечивает форсирование напряжения на обмотке возбуждения генератора — при коротких замыканиях и резких посадках напряжения генератора, а также с измененной полярностью — при гашении поля.

Регулирование величины выпрямленного напряжения — напряжение, подаваемого на обмотку ротора возбуждаемого генератора, осуществляется изменением момента зажигания анодов выпрямителей с помощью сеточного управления. На рис. 3 даны упрощенные диаграммы выпрямленного напряжения (диаграммы нулевой трехфазной схемы) для основных режимов генератора.

Среднее значение выпрямленного напряжения определяется площадью, ограниченной кривой выпрямленного напряжения за период. Для схемы с двумя группами вентиля,* соединенных на трехфазной мостовой схеме без учета коммутации тока с анода на анод и падения напряжения в вентилях для всех режимов генератора, оно может быть определено как:

$$U_d = \frac{6}{\sqrt{2}\pi} U_n \left[(a-1) \cos(\alpha_2 + 30) + \sqrt{a^2 + a + 1} \sin(\alpha_1 + \arctg \frac{a+1}{a-1} \sqrt{3}) \right] \quad (1)$$

Здесь U_n — фазное напряжение статора вспомогательного генератора (или вторичной обмотки выпрямительного трансформатора) между нулем и отпайкой;

* Эта схема получила пока наибольшее распространение для мощных генераторов. Структура и физический смысл формул для других схем с двумя группами вентиля аналогичны; формулу для схем с одной группой вентиля см. ниже.

$$a = \frac{I'_v}{U_n};$$

U_n — полное фазное напряжение;

α_1 и α_2 — углы регулирования (углы опережения зажигания выпрямителей), соответственно, рабочей и форсировочной группы вентиля.

С учетом коммутации и падения напряжения в вентилях, напряжение для такой схемы в «нормальных» режимах генератора (при $\alpha_1 > 30^\circ$ и $\alpha_2 = 120-130^\circ = \text{const}$) может быть в первом приближении, но достаточно точно выражено более простой формулой (такой же, как и для схемы с одной группой вентиля):

$$U_d = 2,34 U_n \left(\cos \alpha_1 - 0,5 \frac{I_d}{I_{dH}} X_n \right) - \Delta U, \quad (2)$$

где ΔU — падение напряжения на дуге в вентиле;

I_d — ток в роторе генератора;

I_{dH} — то же, номинальное значение;

X_n — эквивалентная реактивность коммутации для рабочей группы вентиля (в относительных единицах).

В обычных выпрямительных схемах, где вентили питаются от трансформатора, длительность коммутации тока с фазы на фазу и падения напряжения при нагрузке определяется реактивностью рассеяния трансформатора.

При питании выпрямителя от синхронного генератора время коммутации определяется некоторой эквивалентной реактивностью; в первом приближении ее можно считать равной мгновенной реактивности двухполюсного короткого замыкания:

$$X_s = \frac{X''_d + X_2}{2},$$

где X''_d — сверхпереходная реактивность генератора, а

X_2 — реактивность обратной последовательности.

При гашении поля главного генератора вентили рабочей группы «запираются» (на сетки вентиля рабочей группы перестают подаваться отпирающие импульсы) — при неизменном угле регулирования форсировочной группы; вся нагрузка переходит на форсировочную группу вентиля (рис. 3, д).

В этом случае аноды форсировочной группы отпираются в области отрицательных полуволн напряжения переменного тока, то есть форсировочная группа переходит в так называемый «инвертерный» режим; выпрямленное напряжение, прикладываемое к ротору, становится отрицательным:

$$U_d = - \left[2,34 U_n \left(\cos \beta_2 + 0,5 \frac{I_d}{I_{dH}} X_n \right) + 2 \Delta U \right]. \quad (3)$$

Здесь: β_2 — угол опережения зажигания анодов вентиля форсировочной группы при инвертировании $\beta_2 = 180 - \alpha_2$;

* Это напряжение может быть также определено по формуле

$$U_d = - \left[2,34 U_n \cos \beta_2 + I_d 2 \left(\frac{X_m}{2\pi} + R \right) + 2 \Delta U \right].$$

Здесь X и R — реактивное и активное сопротивления вторичной обмотки трансформатора (фазы, всей) или статора вспомогательного генератора; m — число фаз.

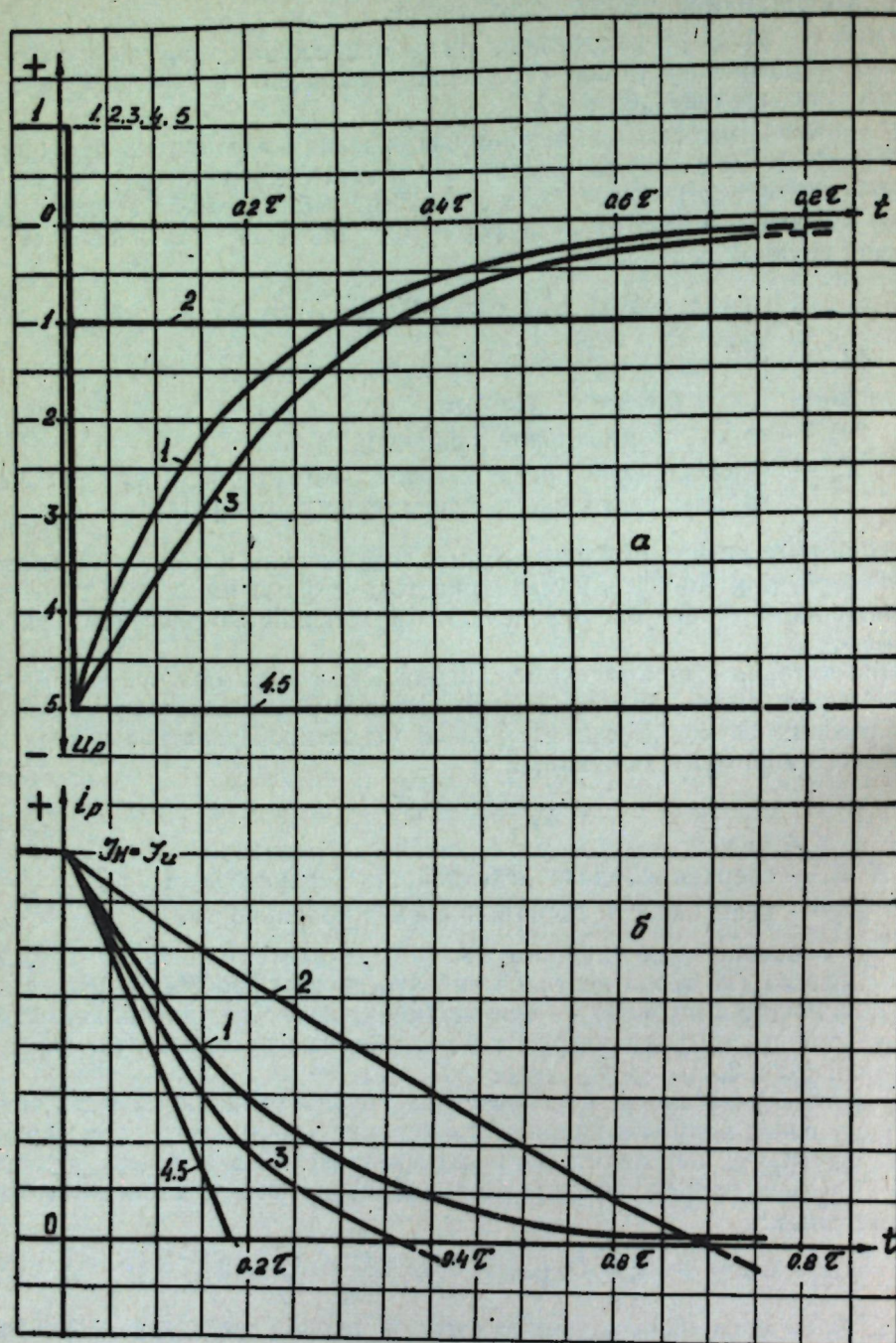


Рис. 4. Характеристики изменения напряжения и тока в обмотке возбуждения генератора. Насыщение не учитывается:

1 — разряд на неизменное активное сопротивление; 2 — противовключение возбuditеля; 3 — противовключение возбuditеля; 4 — разряд на дугогасительную решетку; 5 — гашение поля при ионном возбуждении.

I_{d_n} — выпрямленный ток форсировочной группы вентилей, соответствующий номинальному току «форсировочной» части обмотки статора вспомогательного генератора (или выпрямительного трансформатора);

X_n — эквивалентная реактивность коммутации для форсировочной группы (в относительных единицах).

Устойчивая работа инвертора, как известно, возможна лишь при угле β (в рассматриваемом случае — β_2) большем, чем сумма углов (времени) коммутации и деионизации вентилей*.

Инвертирование в схеме с двумя группами вентилей может происходить удовлетворительно при $\beta_2 = 125^\circ = \text{const}$.

Однако, так как время коммутации и деионизации с ростом нагрузки увеличивается, с целью ускорения процесса гашения поля целесообразно применять двухступенчатое гашение поля. Как показали многочисленные исследования в лабораторных условиях и на мощных генераторах [8, 9], для максимального ускорения гашения поля в начале гашения, когда ток в обмотке возбуждения еще относительно велик, углу β_2 следует дать значение порядка 140° , а затем — при снижении тока — уменьшить до $110-107^\circ$.

Уменьшение тока на второй ступени в ионном возбудителе осуществляется путем уменьшения тока подмагничивания статического фазорегулятора в цепях сеточного управления выпрямителей. Уменьшение тока выполняется весьма просто, с помощью одного реле**.

Таким образом, при запираании вентилей рабочей группы напряжение на обмотке ротора практически мгновенно меняет знак и увеличивается примерно в $\frac{U_n}{U_d}$ раз. Под действием этого отрицательного напряжения ток в обмотке ротора «стремится» также изменить знак и величину (в конечном счете до значения, равного $-\left(\frac{U_d}{r}\right)$; при этом он прежде всего весьма быстро уменьшается до нуля. Как только ток становится равным нулю — выпрямитель (дуга) гаснет, процесс заканчивается.

Для системы возбуждения, имеющей одну группу вентилей, соединенных по трехфазной мостовой схеме, при необходимости в гашении поля угол регулирования увеличивается до значения, при котором, как и в первом случае, аноды вентилей будут зажигаться в области отрицательных полуволн переменного тока. В этом случае

$$U_d = - \left[2, 34 U_\phi \left(\cos \beta + 0,5 \frac{I_d}{I_{d_n}} X \right) + 2 \Delta U \right], \quad (4)$$

где U_ϕ — фазное напряжение, подаваемое на аноды вентиля;

X — эквивалентная реактивность коммутации.

В случаях описанного «независимого» ионного возбуждения напряжение, прикладываемое к обмотке ротора возбуждаемого генератора, в процессе гашения поля остается практически неизменным по величине (рис. 5, а);

* Вопросы, относящиеся к физике процессов коммутации тока в вентилях при инвертировании, в настоящей работе не рассматриваются.

** Авторское свидетельство № 115112 от 1. VI. 1958 г.

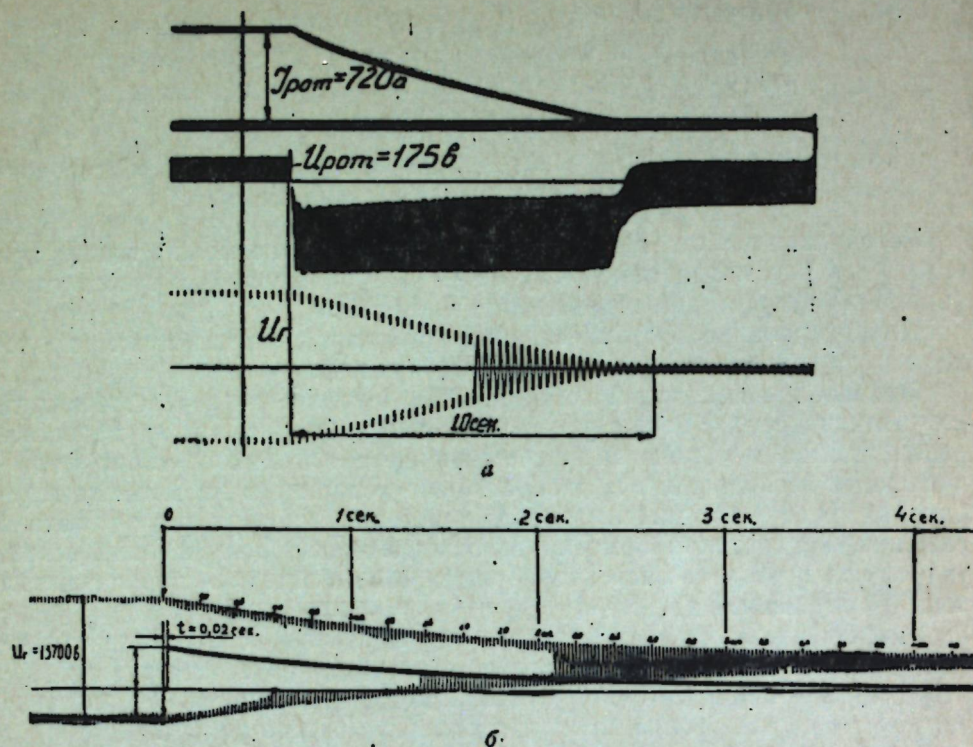


Рис. 5. Осциллограммы гашения поля гидрогенератора 55000 кВт:
а — с ионным возбудителем; $k=2,5$; б — с машинным возбудителем; $k=1,75$.

Падение напряжения в дуге вентилях практически не изменяется, а влияние уменьшающегося члена $0,5 \frac{Id}{Id_n}$ незначительное.

Для случая же самовозбуждения, когда выпрямители питаются от шин возбуждаемого генератора, выпрямленное напряжение, прикладываемое к обмотке возбуждения генератора в процессе гашения поля, изменяется — уменьшается, так как одновременно уменьшается напряжение на шинах изолятора (подробнее — см. ниже).

* * *

Сравним скорость спада тока для некоторых, основных, способов гашения поля. При сравнении частично воспользуемся методом и некоторыми данными, приведенными в статье проф. О. Б. Брона [4].

1. РАЗРЯД ЭНЕРГИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА НА ПОСТОЯННОЕ АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (рис. 1, а)

После замыкания обмотки возбуждения на разрядное сопротивление и отключение возбудителя ток в образовавшейся цепи спадает по закону:

$$I = \frac{U_0}{r} e^{-\frac{R+r}{L}t} = I_0 e^{-\frac{R+r}{L}t}, \quad (5)$$

где U_0 — напряжение возбудителя и
 I_0 — ток в обмотке возбуждения до гашения;
 r и L — активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения генератора;
 R — разрядное сопротивление.

Как видно из схемы (рис. 1, а), напряжение на обмотке возбуждения после подключения к ней сопротивления (и отключения возбудителя) будет определяться (ограничиваться) величиной этого сопротивления; напряжение на обмотке возбуждения будет в каждый момент времени численно равно падению напряжения на сопротивлении R . В первый момент времени, когда весь ток I_0 пойдет через сопротивление, это напряжение будет максимальным, затем, по мере спада тока, оно уменьшается — пропорционально уменьшению тока.

Из уравнения (5) видно, что скорость спада тока будет тем большей, чем больше величина R .

Величина же R , в свою очередь, ограничивается из условий недопущения в момент размыкания цепи возбуждения на обмотке возбуждения генератора напряжения выше некоторого значения U_m , обуславливаемого прочностью изоляции ротора (обычно 0,75 от испытательного напряжения)

$$I_0 R \leq U_m, \quad (6)$$

обозначая

$$\frac{U_m}{U_0} = k = \frac{R}{r}, \quad (7)$$

получим

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau_1}}, \quad (8)$$

где

$$\tau_1 = \frac{L}{R+r} = \frac{I}{k+I} \tau,$$

$\tau = \frac{L}{r}$ — постоянная времени ротора (при разомкнутом статоре).

Принимая U_0 для современных крупных машин равным 400 в и U_m равным 2000 в, получим

$$k = \frac{U_m}{U_0} = 5.$$

Принимая, что процесс гашения поля можно считать законченным, когда ток статора упадет до 1% (для большинства крупных генераторов это составит, как правило, около 200 в на обмотке статора), получим время гашения поля при $R = 5r$

$$I_0 e^{-\frac{t_2}{\tau_1}} = \frac{1}{100} I_0; \quad e^{\frac{t_2}{\tau_1}} = 100,$$

или время гашения

$$t_2 = \tau_1 \ln 100 = \frac{\tau}{k+1} \ln 100 = 0,77 \tau. \quad (9)$$

Приведенные соотношения получены (так же как это будет сделано и для остальных случаев) в предположении отсутствия демпферной обмотки и насыщения статора, что позволит принять напряжение статора пропорциональным току возбуждения.

2. РАЗРЯД ЭНЕРГИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ ВОЗБУДИТЕЛЯ

В этом случае меняется полярность подключения возбuditеля к обмотке возбуждения генератора (рис. 1, б), причем включение с измененной полярностью может производиться с одновременным введением в цепь разрядного сопротивления. Напряжение на обмотке возбуждения генератора будет определяться в этом случае напряжением возбuditеля и падением напряжения на сопротивлении R .

При $R=0$ напряжение на обмотке ротора генератора будет постоянным и равным напряжению возбuditеля.

При $R \neq 0$ напряжение в первый момент будет максимальным, определяемым вводимым сопротивлением, а затем будет уменьшаться с уменьшением тока в образовавшемся контуре (рис. 5, а).

Закон спада тока в этой схеме получается из исходного уравнения

$$L \frac{di}{dt} + (R+r)i = -U_o. \quad (10)$$

Наибольшее допустимое значение определяется из соотношения:

$$I_o R + U_o \leq U_m,$$

откуда

$$\frac{R}{r} = \frac{U_m - U_o}{I_o r} = K - 1,$$

тогда (4)

$$i = \frac{I_o}{k} \left[(k+1) e^{-\frac{t}{\tau_1}} - 1 \right]. \quad (11)$$

Время гашения поля для этого случая определяется из условия:

$$(k+1) e^{-\frac{t_2}{\tau_1}} - 1 = 0,$$

откуда

$$t_2 = \tau_1 \ln(k+1) = \frac{\tau}{k} \ln(k+1). \quad (12)$$

При прежних условиях $\left(\frac{U_m}{U_o} = K = 5 \right)$,

$$t_2 = 0,36 \tau. \quad (13)$$

При $R=0$

$$t_2 = 0,7 \tau. \quad (14)$$

3. РАЗРЯД НА ДУГОГАСИТЕЛЬНУЮ РЕШЕТКУ (рис. 1, г).

В этой схеме вместо разрядного сопротивления параллельно обмотке возбуждения включена дугогасительная решетка. При гашении поля сначала замыкаются контакты 1, затем размыкаются контакты 2 и сразу же после этого размыкаются контакты 1. На контактах 1 возникает дуга. Попадая под действием магнитного дутья в решетку, дуга разбивается на ряд «коротких» дуг, горящих во время процесса гашения поля. Напряжение по дугогасительной решетке, являющееся суммой напряжений на коротких дугах, практически неизменно. Для предотвращения перенапряжения на контактах, могущего возникнуть при обрыве дуги до того, как ток спадет до нуля, параллельно решетке включается относительно большое сопротивление R^1 .

В этом случае справедливо уравнение

$$L \frac{di}{dt} + ri = -U_m. \quad (15)$$

где

$$U_m = Ri = \text{const};$$

R — сопротивление дуги в дугогасящей решетке.

Так как в данном случае $\frac{U_m}{r} = kI_o$, после интегрирования [4] получаем закон изменения тока

$$i = I_o \left[(k+1) e^{-\frac{t}{\tau}} - k \right], \quad (16)$$

откуда для прежних условий

$$(k+1) e^{-\frac{t_2}{\tau}} - k = 0, \text{ или}$$

$$t_2 = \tau \ln \frac{k+1}{k} = 0,181 \tau. \quad (17)$$

4. ГАШЕНИЕ ПОЛЯ В ИОННОМ ВОЗБУДИТЕЛЕ (рис. 1, ж).

Как уже говорилось выше, при необходимости в гашении поля воздействием на систему сеточного управления напряжение на ионном возбuditеле практически мгновенно меняет знак. Одновременно, также практически мгновенно (менее чем за 0,02 сек), устанавливается требуемая — максимальная — величина этого напряжения. Для схемы с независимым ионным возбуждением величина этого напряжения в течение процесса гашения поля практически неизменна*.

В связи с изложенным, переходный процесс при гашении определяется уравнением:

$$\frac{di}{dt} + ri = -U_m. \quad (18)$$

Решение этого уравнения дает

$$i = \left(I_o + \frac{U_m}{r} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{U_m}{r}. \quad (19)$$

Но начальное значение тока определяется тем напряжением, которое было до гашения —

$$I_o = \frac{U_o}{r},$$

тогда

$$i = \frac{U_o}{r} + \left(-\frac{U_m}{r} - \frac{U_o}{r} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right);$$

* О гашении поля при ионном самовозбуждении см. ниже.

При

$$\frac{U_m}{U_0} = k$$

$$i = I_0 + (-kI_0 - I_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right),$$

или

$$i = I_0 - I_0(k+1) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (20)$$

что равноценно выражению (16) для случая гашения поля на дугогасительную решетку.

Время гашения может быть получено из условия $i = 0$

$$I_0 = I_0(k+1) \left(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}}\right),$$

откуда

$$t_2 = \tau \ln \frac{k+1}{k} = 0,181 \tau. \quad (21)$$

Точнее, закон спада тока в случае применения ионного возбудителя будет

$$i = I_0 - I_0(k+1) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau'}}\right). \quad (22)$$

Здесь

$$\tau' = \frac{L+L'}{r+r_0}; \quad r_0 = 2\left(\frac{X'm}{2\pi} + r'\right),$$

где L' , X' и r' — соответственно индуктивность, индуктивное и активное сопротивления вторичной обмотки выпрямительного трансформатора или статора вспомогательного генератора (фазы), непосредственно питающей ртутные выпрямители (форсировочной группы);

m — число фаз.

Кривые изменения напряжения на обмотке возбудителя для разобранных пяти случаев показаны на рис. 4, а (часть данных см. [4]), кривые тока — на рис. 4, б. Кривые даны для одинаковых параметров во всех схемах и при одинаковом запаздывании начала фактического гашения поля после команды на гашение.

На рис. 5, а показана осциллограмма гашения поля гидрогенератора 55000 квт, 62 об/мин с ионным возбудителем.

Для сравнения на рис. 5, б показана осциллограмма гашения поля этого же генератора, но с машинным возбуждением. Гашение поля производилось замыканием обмотки возбуждения генератора на активное сопротивление, равное 0,4 ома (при сопротивлении обмотки ротора в 0,23 ома). Гашению поля в обоих случаях предшествовал холостой ход генератора.

Приведенные на рис. 4 кривые получены без учета насыщения в магнитопроводе. В частности, не показано некоторое искривление линии спада тока на начальном участке, которое при гашении с номинального значения уже начинает сказываться. Наиболее сильно насыщение (влияние изменения индуктивности ротора при изменении тока ротора) сказывается после значительной форсировки.

Некоторое представление об изменении тока для случаев разряда на активное сопротивление, на дугогасительную решетку и при гашении поля в ионном возбудителе при предварительной трехкратной форсировке по току можно получить из рис. 6. Характеристики эти носят лишь иллюстративный — ориентировочный характер, так как кривые намагничивания у различных синхронных машин существенно неодинаковы [4].

Проводя сравнение различных способов гашения поля, необходимо сделать ряд уточнений.

В упоминавшейся статье О. Б. Брона [4] гашение поля при ионном возбуждении просто отнесено к способу гашения поля противовключения возбуждения*.

Весьма существенным отличием гашения поля в системе ионного возбуждения от случаев гашения поля противовключением возбудителя является то, что при ионном (независимом) возбуждении напряжение на обмотке возбуждения генератора во время всего процесса гашения поля остается, практически, неизменным и равным максимальному напряжению (U_m), ограничиваемому, как и во всех прочих случаях, соображениями, связанными с прочностью изоляции обмоток ротора.

В разобранных случаях гашения поля методом противовключения, применяемого при машинном возбуждении, напряжение на обмотке возбуждения может быть неизменным лишь в случае $R=0$ (рис. 4, а). При этом напряжение на обмотке ротора равно напряжению возбудителя перед гашением поля (то есть обычно $U_0 = U_{pH}$ — однократному номинальному напряжению возбудителя); время гашения поля в этом случае равно 0,7τ. При $R \neq 0$ напряжение на роторе имеет максимальное значение (U_m) лишь в самый первый момент гашения, после чего резко понижается; время гашения при этом, для неизменных, принимаемых в сравнении параметров возбуждения, равно 0,36τ. В ионном же возбудителе, при прочих равных условиях, теоретическое время гашения поля значительно меньше — 0,181τ.

При сравнении методов гашения поля следует учесть еще одно обстоятельство. Напряжение на обмотке ротора генератора, как об этом уже говорилось выше, по соображениям надежности изоляции не должно превышать определенной величины — U_m , во всех возможных режимах генератора — будь то форсировка возбуждения, либо гашение поля — как при номинальном начальном возбуждении, так и непосредственно после форсировки.

Эта величина ранее была принята для всех случаев равной 5 (т. е. $\frac{U_m}{U_0} = 5$).

Если учесть, что при пятикратной форсировке напряжения на обмотке ротора ток в обмотке за время форсировки успеет увеличиться в среднем в три раза, то будет справедливым соотношение

$$3I_0 R \geq 5U_0, \quad (23)$$

где R — сопротивление подключаемого к ротору сопротивления.

* В более поздней работе — книге О. Б. Брона «Автоматы гашения магнитного поля» (ГЭИ, 1961) — это не имеет места.

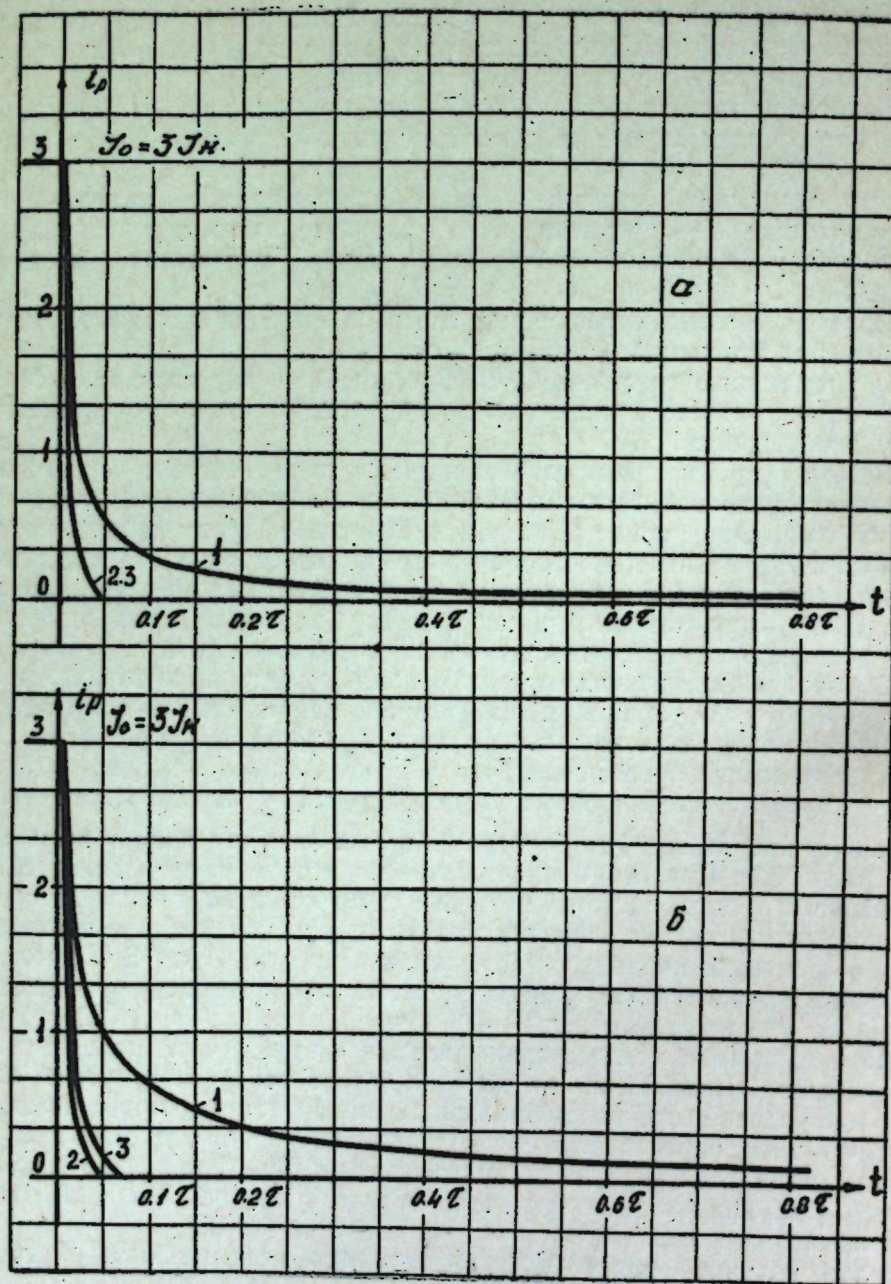


Рис. 6: а — характеристика тока в обмотке возбуждения при гашении поля после предварительной форсировки. Насыщение учитывается;
б — то же, уточненные характеристики;
1 — разряд на неизменное активное сопротивление; 2 — разряд на дугогасительную решетку; 3 — гашение поля при ионном возбуждении.

Но так как $I_0 R \leq U_m$, то для случаев гашения поля при машинных возбудителях (за исключением разряда на дугогасительную решетку) при принятых условиях

$$U_m = \frac{5}{3} U_0 = 1,7 U_0. \quad (24)$$

$$K = \frac{U_m}{U_0} = 1,7. \quad (25)$$

Однако этот коэффициент должен быть скорректирован.

В приведенных выше случаях (за исключением разряда на дугогасительную решетку) пренебрегали сопротивлением дуги. Л. В. Красильников [5] показал, что с увеличением тока возбуждения кратность пика напряжения на обмотке возбуждения при гашении уменьшается. Л. В. Красильников рекомендует учитывать влияние дуги коэффициентом 0,75—0,8.

Тогда, принимая во внимание сказанное выше, коэффициент K для случаев гашения поля шунтированием обмотки возбуждения и противовключением возбудителя будет равен

$$K' = \frac{1,7}{0,8} = 2,2. \quad (26)$$

В случае ионного возбуждения отрицательное напряжение на обмотке возбуждения при гашении поля задается определенным, независимым от режимов, предшествовавших гашению поля, — будь то холостой ход, номинальный режим или форсировка. Уточним величину этого напряжения.

Как уже говорилось выше, для наиболее часто встречающихся схем, например, для генераторов с ионным возбуждением Волжской ГЭС им. В. И. Ленина, это напряжение может быть определено по формуле (3) или иначе

$$Ud_2 = Ud_0 \left(\cos \beta_2 + 0,5 \frac{Id}{Id_{нб}} X_b \right) + 2\Delta U. \quad (27)$$

Здесь Ud_0 — максимальное выпрямленное напряжение, определяемое условиями форсировки. По прежним условиям $Ud_0 = U_m = 5 U_0 = 5 U_{ном}$. Падение напряжения в дуге практически всегда равно 20 вольтам и $2\Delta U = 40$ в.

При $U_{ном} = 400$ в. (наиболее часто встречающееся напряжение) $2\Delta U = 0,1 U_n = 0,1 U_0$.

Член $0,5 \frac{Id}{Id_{нб}} X_b$ для генераторов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина, например, в относительных единицах равен примерно 0,15.

Тогда при $\beta_2 = 55^\circ$ (в среднем) напряжение на обмотке ротора при гашении для ионного возбудителя в относительных единицах:

$$Ud_2 = 5 (0,57 + 0,15) + 0,1 = 3,7,$$

или

$$Ud_2 = 3,7 U_0,$$

$$K' = \frac{Ud_2}{U_0} = 3,7. \quad (28)$$

В этом случае время гашения поля

$$t_2 = \tau \ln \frac{k' + 1}{k'} = \tau \ln \frac{3,7 + 1}{3,7} = 0,24\tau. \quad (29)$$

Таким образом, если параметры схем и устройств гашения поля будут приняты с учетом возможности гашения поля при предварительной трехкратной форсировке тока возбуждения, то время гашения с их помощью, в случае гашения поля с номинального режима генератора (без учета насыщения машины), можно в первом приближении определять по следующим формулам:

а) при гашении поля шунтированием обмотки

$$t_2 = 4,6 \frac{\tau}{k' + 1} = 1,44\tau; \quad (30)$$

б) при гашении поля противовключением возбудителя

$$t_2 = \frac{\tau}{k'} \ln (k' + 1) = 0,53\tau; \quad (31)$$

в) при гашении поля с ионным возбудителем

$$t_2 = 0,24\tau;$$

г) при гашении поля с помощью дугогасительной решетки

$$t_2 = 0,181\tau.$$

На рис. 7 показаны кривые спада тока для четырех рассматриваемых случаев (с учетом незначительного насыщения машины в номинальном режиме)*. Как видно из рисунка, время гашения поля в случае применения ионного возбуждения лишь незначительно больше времени гашения поля при разряде на дугогасительную решетку.

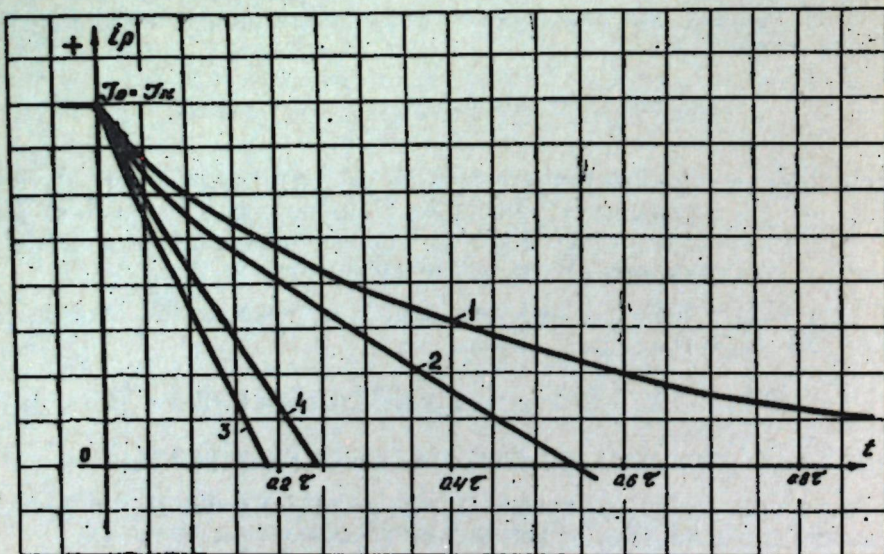


Рис. 7. Уточненные характеристики тока при гашении поля (после номинального хода генератора):

1 — разряд на неизменное активное сопротивление; 2 — противовключение возбудителя; 3 — разряд на дугогасительную решетку; 4 — гашение поля при ионном возбуждении.

* Эти кривые, как и показано на рис 6, следует рассматривать, в силу ранее указанных соображений, как в известной степени ориентировочные.

Если учесть насыщение машины при предварительной трехкратной форсировке по току, то кривые гашения поля для основных способов будут иметь вид, ориентировочно показанный на рис. 6, б.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ СИСТЕМА ГАШЕНИЯ ПОЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ С ИОННЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ

Как показывалось выше, в генераторе с ионным возбуждением ток в обмотке ротора при гашении весьма быстро падает до нуля. Однако, благодаря наличию токов в демпферных контурах и массивных сердечниках полюсов генератора, спадание магнитного потока, а следовательно и ЭДС генератора, происходит существенно медленнее (рис. 10).

Поэтому для более эффективного гашения поля генератора целесообразно сразу же после спада тока в роторе до нуля создать в обмотке ротора ток обратного направления, а после спада до нуля напряжения на выводах генератора этот ток в обмотке ротора следует снять*.

Реверсирование направления тока в обмотке ротора при наличии выпрямителей может осуществляться либо с помощью схем с удвоенным числом вентилях (по сравнению с количеством их для нормальной работы генератора), либо применением переключателей в цепи выпрямленного тока. Недостатком первых схем является двойное количество вентилях, недостатком вторых — наличие переключателя в цепи возбуждения, что, вообще говоря, резко снижает надежность эксплуатации.

В том случае, когда схемы с ионными преобразователями нормально имеют две группы вентилях, возможно реверсирование тока в цепи выпрямленного напряжения с помощью переключателей, без разрыва цепи выпрямленного тока, что сохраняет высокую степень надежности работы установки при гашении поля, свойственную генераторам с ионным возбуждением. Для этого переключатель должен устанавливаться в цепи выпрямленного тока только форсировочной группы вентилях; рабочая же группа вентилях остается постоянно подключенной к обмотке ротора генератора (рис. 8), чем и обеспечивается надежность работы.

Процесс гашения поля в этом случае происходит следующим образом.

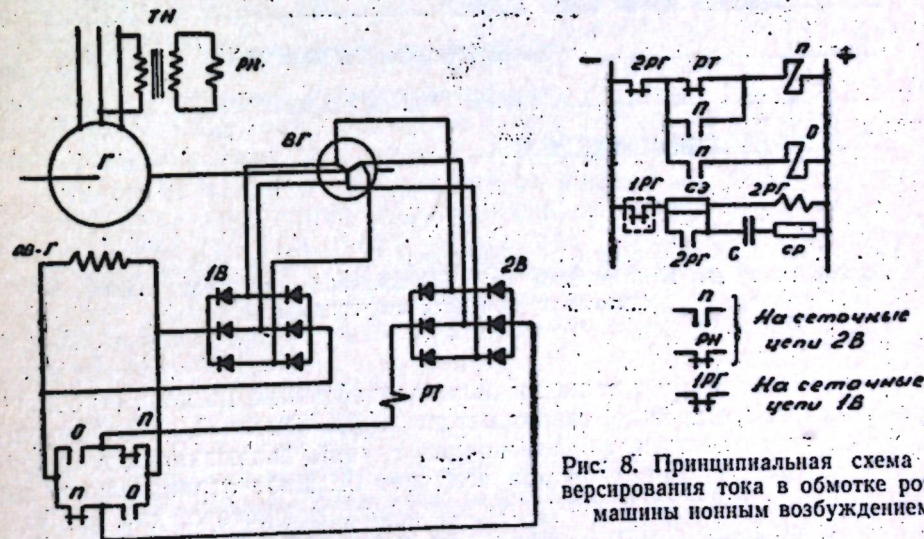


Рис. 8. Принципиальная схема реверсирования тока в обмотке ротора машины ионным возбуждением.

* Авторское свидетельство № 141209 от 28. VIII. 1961 [7].

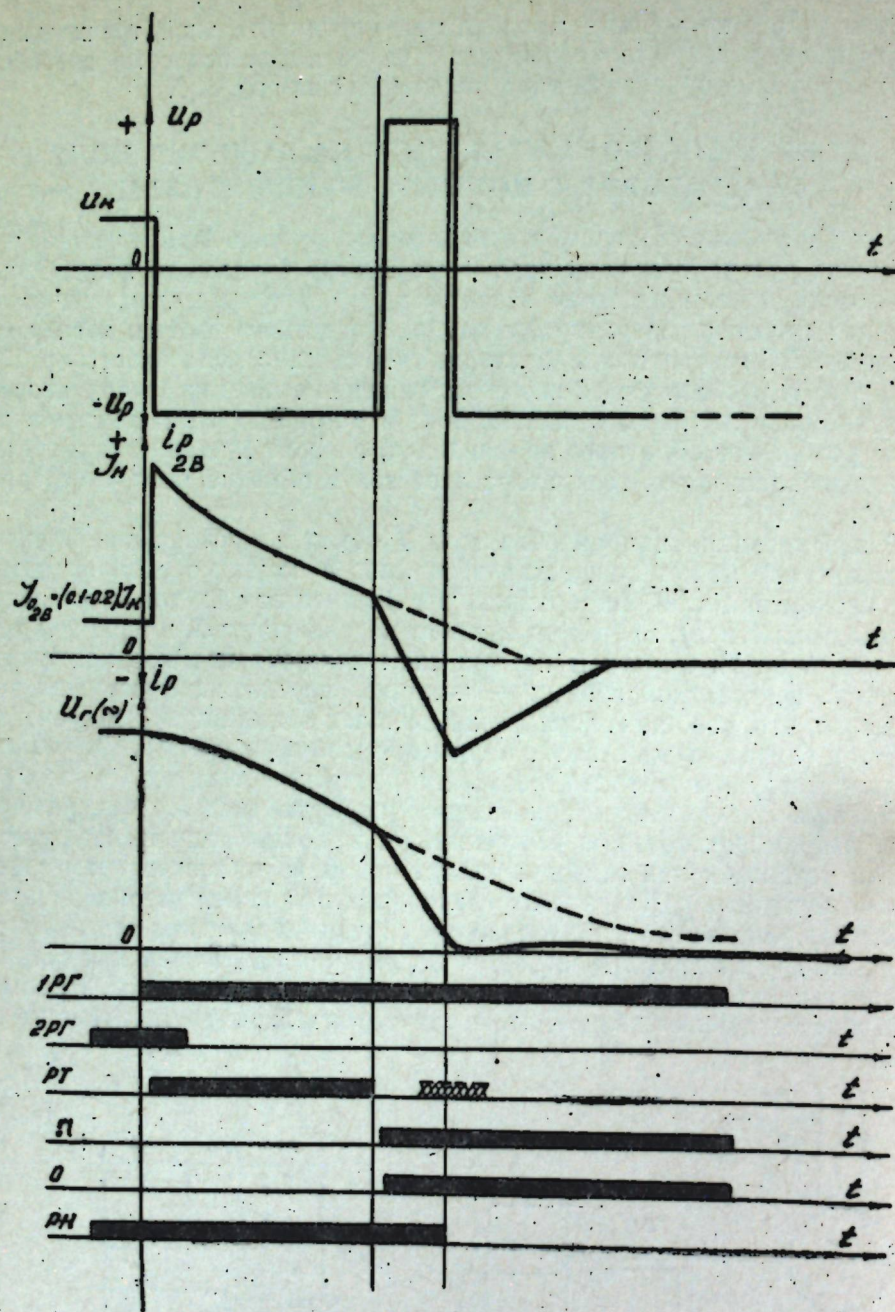


Рис. 9. Циклограмма схемы с реверсированием тока в обмотке ротора машины с ионным возбудителем (для U_2 показана огибающая только положительных полувольт синусоиды).

При необходимости в гашении поля воздействием на цепи сеточного управления, как и прежде, «запираются» аноды вентилях рабочей группы, в силу чего вентили форсировочной группы оказываются в инвертерном режиме. Обмотка ротора получает большое отрицательное напряжение, под действием которого ток в обмотке ротора, как это уже показывалось выше, быстро спадает до нуля (ток в роторной цепи при этом проходит через вентили только форсировочной группы).

Когда величина тока в обмотке ротора, при его спадании, достигнет 30—40% значения тока ротора при холостом ходе генератора, отключится минимальное токовое реле РТ в цепи выпрямленного тока группы вентилях и включит контакторы П и О, которые изменят полярность подключения форсировочной группы вентилях к обмотке ротора генератора.

Одновременно вентили форсировочной группы, воздействием на систему сеточного управления их, переводятся снова в выпрямительный режим, соответствующий режиму форсировки, вследствие чего обмотка ротора получит высокое положительное напряжение. Однако, так как теперь обмотка ротора имеет уже обратную полярность (по отношению к вентилям форсировочной группы), в ней появляется ток обратного направления (по отношению к нормальному), что интенсивно снижает магнитный поток машины, а следовательно, и напряжение на ее выводах. Увеличение тока в обмотке ротора вызывает включение реле РТ, однако это не влечет за собой отключения контактов П и О*.

Когда напряжение на выводах генератора понизится до величины, близкой к нулю, отключается минимальное реле напряжения генератора (РН) и переводит вентили форсировочной группы снова в инвертерный режим; ток в обмотке ротора под влиянием отрицательного напряжения на обмотке ротора интенсивно спадает до нуля; гашение поля генератора заканчивается.

С некоторой выдержкой времени отключается реле РГ, вследствие чего отключаются контакты П и О. Этим восстанавливается первоначальная схема (примерная циклограмма работы схемы показана на рис. 9).

Гашение поля генератора с ионным самовозбуждением

Как уже упоминалось выше, в случаях ионного возбуждения, осуществляемого по схеме самовозбуждения, общее время спадания тока до нуля в обмотке ротора генератора при гашении поля существенно больше, чем в случае независимого ионного возбуждения.

В случае ионного самовозбуждения начальная интенсивность спадания тока такая же, как и при независимом возбуждении, а затем, по мере уменьшения напряжения на выводах генератора в процессе гашения поля, отрицательное напряжение на обмотке ротора также соответственно уменьшается, вследствие чего, естественно, уменьшается скорость спадания тока.

Можно считать, что интенсивность спадания тока в случае ионного самовозбуждения остается примерно равной интенсивности при независимом возбуждении в интервале от начала гашения поля до того времени, когда спадающий ток достигнет значения 50—40%* номинального; затем интенсивность существенно уменьшается, становясь близкой к интенсивности при разряде шунтированием обмотки возбуждения на сопротивление.

* Реле РТ может и не успеть включиться, но это не влияет на работу схемы.

** То, что ток успевает снизиться до такого значения с интенсивностью, примерно соответствующей интенсивности при независимом ионном возбуждении, объясняется тем, что уменьшение потока и ЭДС генератора существенно запаздывает, как об этом говорилось выше, по сравнению с уменьшением тока в обмотке ротора.

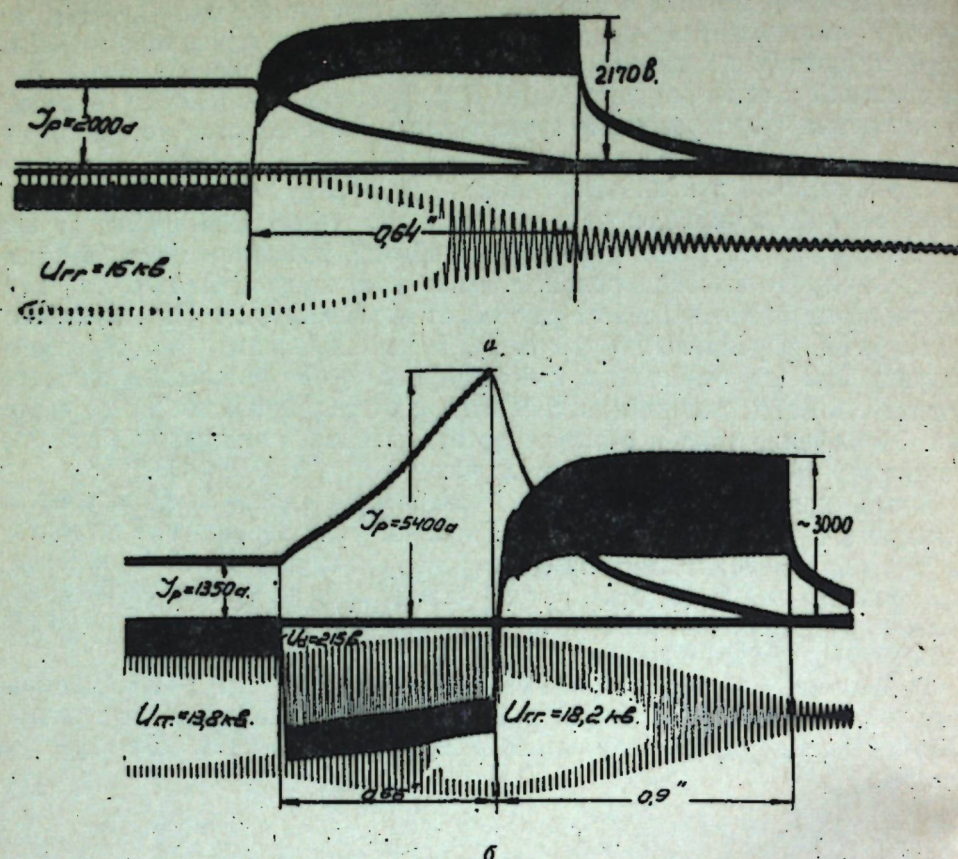


Рис. 10. Осциллограммы гашения поля гидрогенератора 105 000 кВт (Волжская ГЭС им. В. И. Ленина):

а — после номинального режима; б — после предварительной форсировки.

U_d — напряжение на обмотке ротора гидрогенератора (положительное направление вниз);

I_p — ток в обмотке ротора гидрогенератора;

U_{st} — напряжение статора гидрогенератора.

В связи с этим гашение поля в генераторах с ионным самовозбуждением целесообразно осуществлять в два этапа: вначале — инвертированием анодов вентиля, а затем — вводом в действие автомата гашения поля с дугогасительной решеткой. Естественно, что в этом случае автомат может быть выбран на силу тока, примерно в два раза меньшую, чем при использовании только одного автомата.

При таком, комбинированном, гашении поля время гашения поля будет получено примерно равным времени при применении независимого ионного возбуждения.

В заключение на рис. 10 даны осциллограммы гашения поля гидрогенератора Волжской ГЭС им. В. И. Ленина с ионным (независимым) возбуждением при гашении поля после номинального режима генераторов (рис. 10, а) и после предварительной форсировки (рис. 10, б).

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Л. Эттингер, Г. В. Чалый, Е. М. Глух. Опытная установка ионного возбуждения на мощной гидростанции. «Электричество», 1955, № 4.
2. Г. В. Чалый, Е. Л. Эттингер, Е. М. Глух. Ионный возбудитель для генераторов Куйбышевской ГЭС. «Вестник электропромышленности», 1956, № 2.
3. Г. В. Чалый. Ионное возбуждение мощных синхронных генераторов, работающих через длинные линии передачи. Диссертация. МЭИ, 1956.
4. О. Б. Брон. Продолжительность процессов гашения магнитного поля в электрических машинах. Сб. «Электросила», 1954, № 12.
5. Л. В. Красильников. О перенапряжениях при гашении поля генераторов. «Электрические станции», 1952, № 3.
6. Е. Л. Эттингер, Е. М. Глух, М. А. Смирнитский, С. Х. Харламов, А. Д. Колмацуй, Ю. А. Шмай, Г. В. Чалый. Способ гашения поля синхронной машины с ионным возбуждением. Авторское свидетельство № 115 112 от 1. VI. 1958.
7. Е. Л. Эттингер, Г. В. Чалый, Ю. Н. Шмай, Е. М. Глух. Устройство для гашения поля электрической машины с ионным возбуждением. Авторское свидетельство № 141 209 от 26 VIII. 1961.
8. Е. Л. Эттингер, Г. В. Чалый и др. Научный отчет об испытаниях системы ионного возбуждения на ГЭС-14 «Мосэнерго», т. I и II ЦНИЛ ЦКБ. «Электропривод», 1954.
9. Е. Л. Эттингер, Г. В. Чалый и др. Отчет об испытаниях системы ионного возбуждения на гидрогенераторе № 14 Куйбышевской ГЭС. ЦНИЛ ЦКБ. «Электропривод», 1957.

Г. В. ЧАЛЫЙ

СТИНЖЕРЯ КЫПУЛУЙ МАГНЕТИК ЫН ЖЕНЕРАТОАРЕЛЕ КУ ЕКСЧИТАЦИЕ ИОНИКЭ

Резумат

Се експун партикуларитэциле стинжерий кыпупулуй магнетик ын женераотоареде синхроне ку ексцитатор ионик. Се фаче о компарацие ын-тре диферите методе де стинжере а кыпупулуй магнетик ла женераотоареде де електромашинь ши стинжеря кыпупулуй ла женераотоареде ку ексцитатор ионик. Се дау осцилограмеле стинжерий кыпупулуй ла хидроженератоареде де маре путере. Се дескрие система перфекционате де стинжере а кыпупулуй магнетик ла женераотоареде ку ексчитацие ионикэ.

В. Г. ЖУРАВЛЕВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СТАТИСТИЧЕСКО-ВЕРОЯТНОСТНЫХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО УРОВНЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В МОЛДАВИИ

Для планирования развития народного хозяйства республики особенно важным является определение перспективных уровней потребления электрической энергии (прогноз электропотребления). Этот прогноз должен быть научно обоснован и должен давать максимально возможное совпадение в будущем с реальными уровнями электропотребления.

Точность определения перспективных уровней потребления электрической энергии существенно влияет на темпы развития народного хозяйства. Если действительный уровень электропотребления окажется выше прогнозируемого, то могут появиться перебои в энергоснабжении, вызванные медленными (в соответствии с прогнозом) темпами ввода генерирующих мощностей. Это приведет к снижению темпов развития промышленности и сельского хозяйства. Их развитие будет сдерживаться недостаточностью энергетической базы республики.

К большим народнохозяйственным потерям может приводить и неоправданно высокий прогнозируемый уровень электропотребления. Завышение прогноза повлечет за собой завышение темпа ввода генерирующих мощностей и омертвление на продолжительное время больших капитальных вложений [1].

Омертвление денежных и материальных средств, вложенных в энергетику, замедлит темпы развития других отраслей народного хозяйства. Это является недопустимым в условиях планового развития социалистического хозяйства страны.

1. ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЕЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Получение прогноза уровня энергопотребления заблаговременно, на 10—20 лет, является сложным делом.

В настоящее время методы прогнозирования энергопотребления еще далеки от совершенства и, несмотря на большую трудоемкость, дают малодостоверные результаты. Методы прогнозирования, принятые за рубежом, подробно рассмотрены в литературе [2]. Имеются и работы с изложением некоторых отечественных методов [3, 4]. Дается оценка точности одного из принятых методов [5].

Попытки упростить и улучшить методы прогнозирования привели к использованию методов корреляционного анализа.

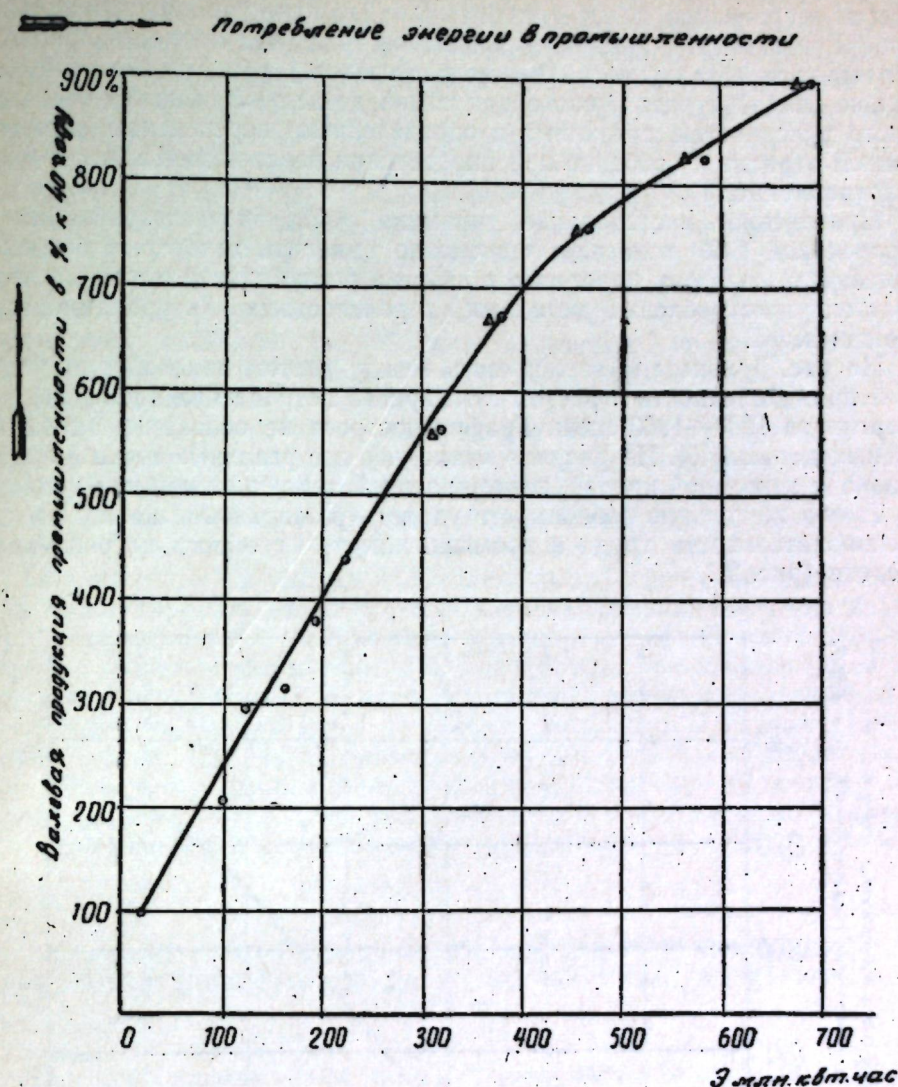


Рис. 1. Зависимость годового потребления электрической энергии от роста валовой продукции промышленности Молдавской ССР.

Чем же обосновано применение методов математической статистики при решении этой задачи?

В Молдавии, как и во всех других республиках Советского Союза, происходит непрерывный и очень быстрый рост мощности энергетической системы. Роль каждого отдельно взятого (даже наиболее крупного) потребителя становится все менее значительной. Число потребителей резко возрастает. Все большую роль начинают играть не одиночные потребители, а совокупность большого количества потребителей, их совместный режим работы и их возможные сочетания.

Это и приводит к целесообразности применения методов теории вероятностей и математической статистики при прогнозировании нагрузки. Методы статистики позволяют охватить сразу всю совокупность действующих факторов, суммарно оценить все многообразие входящих в систему потребителей электрической энергии в динамике их развития. Общий анализ явления, определяемый вероятностными методами, яв-

ляется несравненно менее трудоемким. Его точность при правильном выборе исходных данных может быть не ниже, чем точность прогноза, полученного детальным анализом перспективы развития каждой отдельной взятой отрасли, поскольку такой детальный анализ содержит много условностей, связанных с определением перспективы развития данной отрасли и особенно при определении перспективных норм энергопотребления.

Проведенное исследование динамики роста энергопотребления в Молдавской ССР показало, что можно выделить некоторые основные показатели развития народного хозяйства республики и связать с ними рост энергопотребления методами вероятностных (корреляционных) зависимостей.

На рис. 1 показана зависимость между ростом валовой продукции всей промышленности и ростом суммарного потребления электрической энергии за 1950—1960 годы. График построен на основании опубликованных данных [6]. Из рисунка видно, что все реальные точки ложатся близко к некоторой кривой, напоминающей кривую степенного типа.

Такую же тесную зависимость удалось установить и между ростом производительности труда в промышленности и общим потреблением энергии (рис. 2).

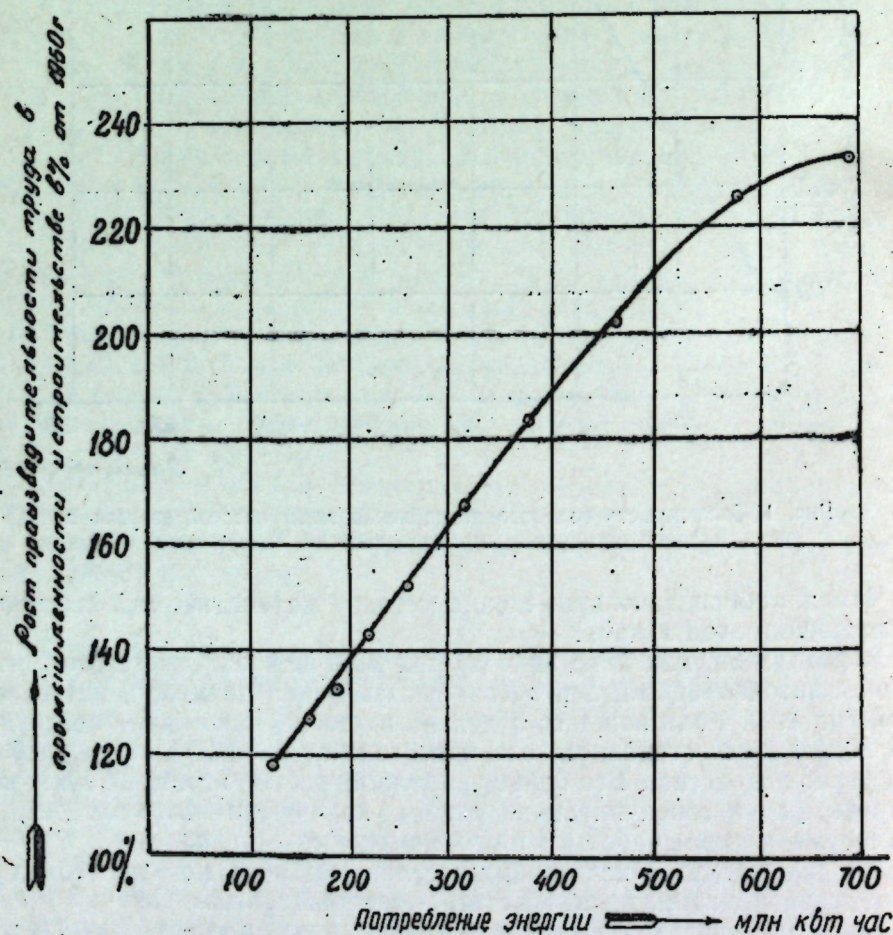


Рис. 2. Зависимость годового потребления электрической энергии от производительности труда в промышленности Молдавской ССР.

Чем можно объяснить наличие таких тесных зависимостей? Очевидно тем, что рост валового выпуска продукции является одним из основных факторов, определяющих развитие экономики республики. Он определяет и развитие энергетики. Хотя доля промышленного потребления энергии по Молдавии ниже, чем в целом по СССР, она все же является достаточно высокой.

Коммунально-бытовое и прочие энергопотребления в значительной степени развиваются пропорционально промышленному потреблению*.

Другая тесная связь между производительностью труда и потреблением энергии объясняется тем, что производительность труда является наиболее общим показателем, характеризующим технический прогресс в народном хозяйстве республики. Повышение производительности труда не мыслимо в настоящее время без применения электрификации и автоматизации.

Кроме этих двух, можно установить и ряд других связей. В ряде случаев может наблюдаться тесная связь между суммарным потреблением энергии и ростом валовой продукции сельского хозяйства. Обнаружить такую связь для Молдавской республики однако пока не удалось**.

Есть связь между общим потреблением электрической энергии и ростом электровооруженности труда в промышленности. Оценка характера и тесноты этой связи может представлять определенный теоретический и практический интерес. Однако для прогнозирования роста потребления энергии эту связь непосредственно использовать невозможно. Электровооруженность труда не является независимой величиной при планировании. Для ее использования нужно установить дополнительную связь между ростом выпуска валовой продукции и ростом электровооруженности труда, то есть переходить к множественной корреляции, что связано с дополнительными трудностями и с потерей точности.

2. АНАЛИЗ СВЯЗИ МЕЖДУ ВЫПУСКОМ ВАЛОВОЙ ПРОДУКЦИИ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ТРУДА И ПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Для установления связей между ростом валового выпуска промышленной продукции, производительностью труда и потреблением энергии был обработан статистический материал по данным [6] за период с 1950 по 1960 годы. Это сравнительно короткий ряд наблюдений. Однако анализ более длительного периода нецелесообразен ввиду того, что условия развития народного хозяйства до 1950 г. резко отличаются от нынешних. Учет более отдаленного периода, по нашему мнению, не увеличит, а скорее снизит точность прогнозирования.

При анализе потребления было обнаружено, что зависимость логарифма от величины годового электропотребления в функции логарифма от величины выпуска валовой продукции и в функции от производительности труда близка к прямой линии (рис. 3 и 4). Поэтому весь дальнейший анализ был проведен в логарифмической и полулогарифмической системе координат.

* На данной стадии исследования предполагалось, что относительная доля сельскохозяйственного электропотребления сохранит свою величину на ближайшие 3—5 лет.

** Вероятно, такая связь может быть обнаружена методами нелинейной и множественной корреляции.

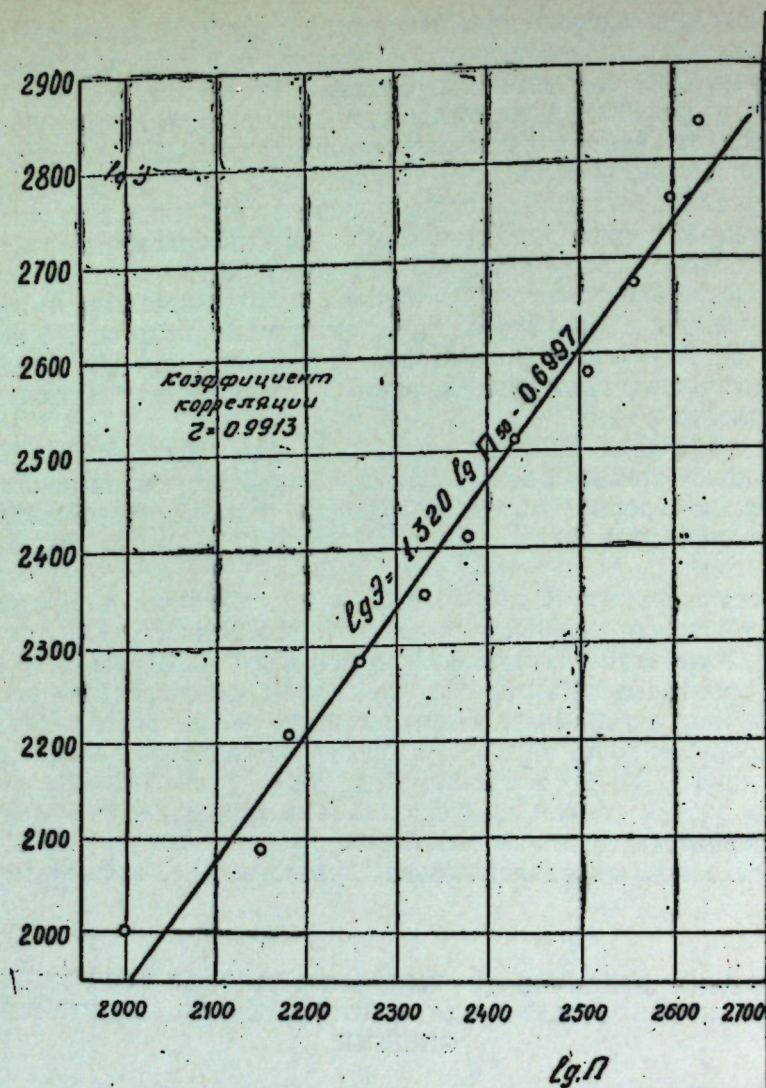


Рис. 3. Связь между потреблением энергии и валовым выпуском продукции в полулогарифмической системе координат.

$$\lg \Xi = f_1[\lg(\Pi)] \quad (1)$$

$$\lg \Xi = f_2(\Pi\Gamma) \quad (2)$$

Методом линейной корреляции были установлены эти связи. Расчет коэффициента корреляции для этих связей приведен в таблицах 1 и 2*.

Зависимость потребления энергии от валовой продукции промышленности характеризуется коэффициентом корреляции r .

$$r = 0,9913 \quad (3)$$

и имеет вид (логарифмы везде десятичные)

$$\lg \Xi = 1,8781 \lg \Pi_{*60} - 0,6987^{**}), \quad (4)$$

* Расчеты, приведенные в таблицах, выполнены Бержанской А. С. и Субботниковым Ю. Д.

** Или $\lg \Xi = 1,320 \lg \Pi_{*60} - 0,6997$, если валовая продукция выражена в % от уровня 1950 г.

где $\Pi_{*60} = \frac{\Pi}{\Pi_{60}} = 100$ — относительная в % от уровня 1960 г. валовая продукция промышленности на исследуемый уровень.

Э — годовая выработка энергии в млн. квтч.

Зависимость потребления энергии от роста производительности труда имеет вид

$$\lg \Xi = 1,460 + \Pi\Gamma \cdot 0,00594, \quad (5)$$

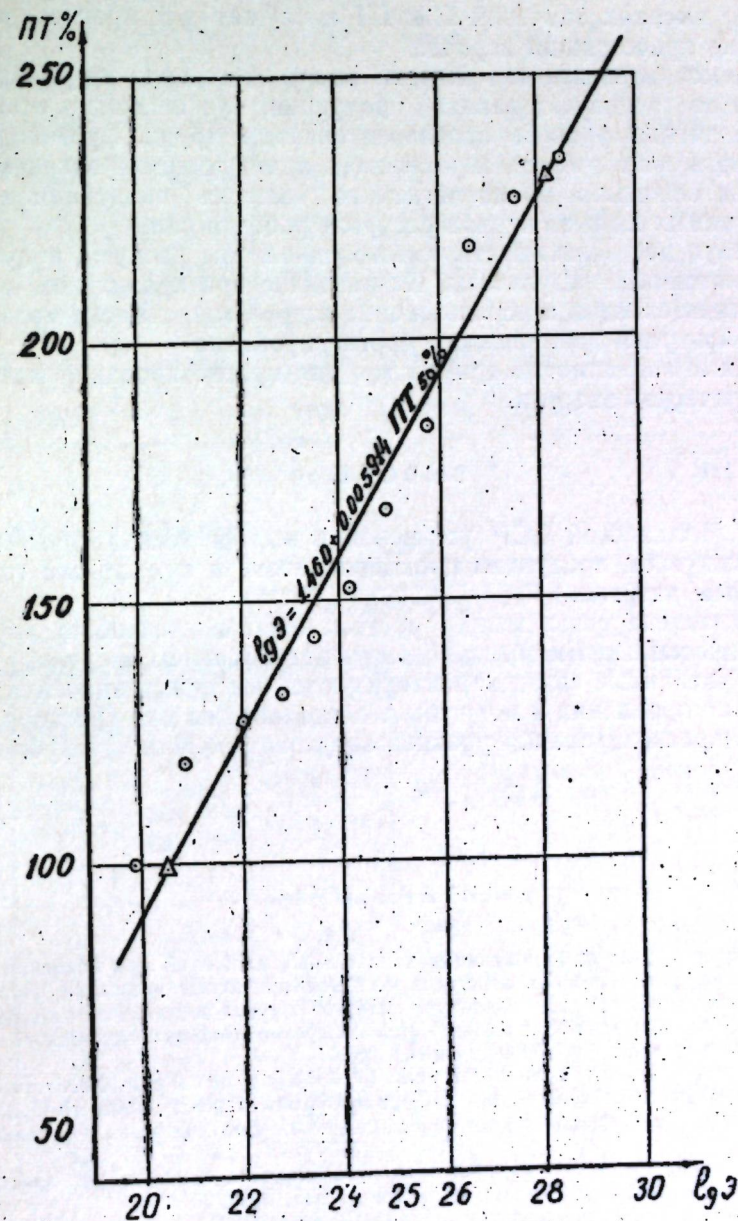


Рис. 4. Связь между потреблением энергии и производительностью труда в полулогарифмической системе координат.

где $ПТ_*$ — относительная производительность труда в % от уровня 1960 г.

Эта зависимость характеризуется коэффициентом корреляции

$$r = 0,984. \quad (6)$$

Обе полученные зависимости имеют весьма высокие коэффициенты корреляции, приближающие эти связи к функциональным. Поэтому эти связи могут считаться весьма достоверными.

Указанные зависимости распространяются (экстерполируются) в зону более высоких значений $П$ и $ПТ$ и служат для прогнозирования нагрузки на предстоящий период.

Ожидаемое производство энергии определяется или на основе планируемого роста выпуска валовой продукции, или на основе предполагаемой на данный уровень производительности труда. Производительность труда в свою очередь определяется планирующими органами республики на основании предполагаемого выпуска продукции и учета предполагаемых на этот период ресурсов рабочей силы.

Используя две зависимости вместо одной, мы рискуем получить и несколько отличные результаты. Их различие при правильном подходе будет незначительным, а использование второй зависимости может служить для контроля правильности прогнозирования.

Указанные зависимости применимы для прогнозирования потребления электрической энергии.

ВЫВОДЫ

1. Для Молдавской ССР установлена весьма тесная связь между валовым выпуском продукции промышленности и суммарным годовым потреблением энергии.

2. Установлена связь между ростом производительности труда в промышленности и суммарным годовым потреблением энергии.

3. Обе указанные связи характеризуются высокими значениями коэффициента корреляции и могут быть использованы для краткосрочного (до 5 лет) прогнозирования уровней энергопотребления республики.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Журавлев. Учет замораживания капитальных вложений при освоении вновь введенных энергетических агрегатов большой единичной мощности. Новосибирский электротехнический институт. Вторая научно-техническая конференция электромеханического факультета Новосибирского электротехнического института (тезисы докладов). Новосибирск, 1962.
2. Fischer Klas-Dieter. Die Voraussichtliche Entwicklung des Elektrizitätsbedarf in der Bundesrepublik Deutschland bis 1975 „Elektrizitätswirtschaft“, 1962, № 11, 352—358.
3. И. Б. Краснов. Планирование электрификации народного хозяйства. Госполитиздат, 1958.
4. Г. В. Сербиновский, Б. А. Константинов. Определение потребления электроэнергии на перспективный период. «Электричество», 1959, № 8.
5. Тодор Мелеску. Точность прогноза. Academie de la R. P. R. „Revue d'Electrotechnique et d'Energetique“, 1960, т. V, № 2.
6. Народное хозяйство Молдавской ССР. Статистический ежегодник. Госстатиздат. Кишинев, 1961.

Таблица 1

Определение коэффициента корреляции для кривой связи $\lg \Xi = f_1(\Pi)$

Год	$\lg \Pi$	$\lg \Pi - \lg \Pi_{cp}$ отклонение от среднего	$(\Pi - \Pi_{cp})^2$ квадратичное отклонение	$\lg \Xi$	$\lg \Xi - \lg \Xi_{cp}$ отклонение	$(\lg \Xi - \lg \Xi_{cp})^2$ квадратичное отклонение	$(\lg \Xi - \lg \Xi_{cp}) \times \Pi - \Pi_{cp}$
1950	2,000	-0,3677	0,1352	1,9983	-0,4281	0,1823	0,1574
1951	2,1523	-0,2152	0,0463	2,0899	-0,3365	0,1132	0,0724
1952	2,1818	-0,1858	0,0346	2,2068	-0,2196	0,0482	0,0408
1953	2,2625	-0,1050	0,0110	2,2810	-0,1454	0,0211	0,0153
1954	2,3263	-0,0413	0,0017	2,3452	-0,0813	0,0061	0,0034
1955	2,3674	-0,0001	0,0000	2,4117	-0,0147	0,0002	0,0000
1956	2,4362	+0,0685	0,0047	2,5017	+0,0753	0,0057	0,0052
1957	2,5119	+0,1442	0,0208	2,5783	+0,1519	0,0231	0,0219
1958	2,5635	+0,1560	0,0384	2,6688	+0,2423	0,0587	0,0475
1959	2,6020	+0,2346	0,0550	2,7642	+0,3377	0,1140	0,0792
1960	2,6395	+0,2720	0,0740	2,8448	+0,4184	0,1751	0,1138
Итого			0,4217	—	—	0,7487	0,5569

Коэффициент корреляции

$$r = \frac{0,5569}{\sqrt{0,7487 \times 0,4217}} = 0,9913$$

Таблица 2

определению коэффициента корреляции для кривой связи $\lg \Xi = f_2(ПТ)$

Год	Производительность труда в промышленности, в % к 1950 г.	$ПТ - ПТ_{cp}$ отклонение от среднего	$(ПТ - ПТ_{cp})^2$ квадратичное отклонение	$\lg \Xi$	$\lg \Xi - \lg \Xi_{cp}$ отклонение	$(\lg \Xi - \lg \Xi_{cp})^2$ квадратичное отклонение	$(ПТ - ПТ_{cp}) \times (\lg \Xi - \lg \Xi_{cp})$
1950	100	+63,4	4019,56	1,9983	-0,4281	0,1833	27,142
1951	119	-44,4	1971,36	2,0899	-0,3365	0,1132	14,941
1952	127	-36,4	1324,96	2,2068	-0,2196	0,0482	7,993
1953	132	-31,4	985,96	2,2810	-0,1454	0,0211	4,566
1954	143	-20,4	416,16	2,3452	-0,0813	0,0061	1,659
1955	152	-11,5	132,25	2,4117	-0,0147	0,0002	0,213
1956	167	+3,5	12,25	2,5017	+0,0753	0,0057	0,264
1957	183	+19,5	380,25	2,5783	+0,1519	0,0231	2,962
1958	217	+53,5	2862,25	2,6688	+0,2423	0,0587	12,963
1959	226	+62,5	3906,25	2,7642	+0,3377	0,1140	21,106
1960	232	+68,5	4692,25	2,8448	+0,4184	0,1751	28,660
Итого			20703,5	—	—	0,7487	122,469

$$r = \frac{122,469}{\sqrt{2070,35 \cdot 0,7487}} = 0,9837$$

В. Г. ЖУРАВЛЮВ

ФОЛОСИРЯ УНОР КОРЕЛАЦИИ ДЕ СТАТИСТИКЭ ШИ ПРОБАЛИТАТЕ ЛА ДЕТЕРМИНАРЯ НИВЕЛУЛУИ ДЕ ПЕРСПЕКТИВЭ АЛ КОНСУМУЛУИ ДЕ ЕНЕРЖИЕ ЕЛЕКТРИКЭ ЫН МОЛДОВА

Резумат

Фолосинд методеле корелацией линиаре, с'а стабилит легатура дин-тре логаритмул консумулуй ануал де енержие ши логаритмул продукцией глобале а индустрией.

Ачастэ легатурэ се карактеризязэ прин коефициентул де корелацие $r = 0,9913$ ши поате фи фолоситэ ла детерминаря нивелулуй де консум ал енержией електриче ла диферите трепте де дезволтаре а индустрией.

С'а обцинут о корелацие динтре продуктивитатя мунчий ын индустрие ши логаритмул консумулуй де енержие, каре се ва фолоси ла контроляря нивелулуй де перспективэ (пробабил) ал консумулуй де енержие електрикэ.

Г. М. ФЕДОРИЩЕНКО, М. Л. МИСНИК

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ И ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТИ ПРИ АНАЛИЗЕ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ МОЛДАВСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Развитие промышленности и сельского хозяйства республики, улучшение условий быта городского и сельского населения сопровождается быстрым ростом потребления электроэнергии.

В этой связи весьма важное значение имеет возможно более точный прогноз величин, характеризующих режимы нагрузки и определение тенденции их изменения на конец семилетки.

Графики нагрузки являются исходным материалом, на основе которого ведутся расчеты по развитию энергосистем. На форму графика нагрузки оказывает влияние весьма большое количество факторов — состав потребителей, технология производства, состав производственного оборудования и режим его эксплуатации, организация работы предприятий, быт населения, времена года, метеорологические условия и т. д. Это разнообразное влияние множества факторов проявляется в виде регулярных и нерегулярных колебаний нагрузки. Регулярные колебания нагрузки — устойчивые, периодически повторяющиеся с определенной закономерностью. Нерегулярные колебания, величину и время которых нельзя предусмотреть заранее, накладываются на регулярные колебания и искажают форму кривой графика. В результате этого мы никогда не имеем двух графиков, точно повторяющих друг друга.

Учесть обычными аналитическими методами разнообразное влияние огромного числа различных факторов на форму графика практически невозможно. Поэтому эта задача решается по-разному.

Наиболее известный метод — это суммирование типовых графиков нагрузки отдельных потребителей с учетом их доли участия в суммарном максимуме системы [1]. На основании таких расчетов получают расчетные графики нагрузки для условного расчетного дня. Такие графики с определенным приближением соответствуют действительным графикам нагрузки.

Важной особенностью нерегулярных колебаний является их взаимная компенсация при осреднении графиков нагрузки, поэтому ряд авторов [1] считают необходимым при расчетах за исходные брать осредненные графики нагрузки. Но при этом не учитываются нерегулярные (случайные) колебания, которые свойственны нагрузке. А отклонения действительных графиков нагрузки от осредненных в отдельные часы могут достигать в некоторых случаях весьма значительных величин — до 20%

от средней мощности. Игнорирование таких отклонений нагрузки может привести к значительным ошибкам.

Статистический метод позволяет, не учитывая степень влияния каждого фактора в отдельности на форму графика, характеризовать нагрузку в каждый момент времени средним значением и дисперсией. Отдельные попытки применения этого метода для получения расчетных графиков нагрузки промышленных предприятий, а также и для описания режимов нагрузки энергосистем были и у нас и за рубежом [2, 3]. Все авторы подтверждают, что отклонение нерегулярных колебаний нагрузки от среднего значения для каждого часа суток хорошо согласуется с нормальным законом распределения.

Исходным материалом для анализа графиков нагрузки Молдавской энергосистемы являются диспетчерские графики нагрузки за 1956 — 1962 гг., что обеспечивает необходимую точность исходных данных.

Изменение режима потребления содержит три основных вида периодически повторяющихся колебаний нагрузки:

- а) суточные колебания нагрузки, характеризующие изменения нагрузки в течение суток;
- б) недельные колебания нагрузки, характеризующие различия в суточном электропотреблении по дням недели (рабочие, сокращенные рабочие, выходные и послевыходные дни);
- в) годовые (сезонные) колебания нагрузки, характеризующие регулярные изменения нагрузки, зависящие от времени года (зима, весна, лето, осень).

Недельные регулярные изменения нагрузки

Различия в суточном потреблении электроэнергии за нормальные рабочие дни (сюда не входят субботние дни и понедельники) и другими днями недели учитываются коэффициентами:

$$K_n = \frac{W_n}{W_{н.р.д.}}; W_n = \frac{W_n}{W_{н.р.д.}},$$

где

W_n — среднее суточное потребление электроэнергии за предыдущие и послевыходные дни месяца;

W_n — среднее суточное потребление электроэнергии за выходные и праздничные дни месяца;

$W_{н.р.д.}$ — среднее суточное потребление электроэнергии за нормальный рабочий день месяца.

Суточное потребление электроэнергии за сокращенный рабочий день и за послевыходной и послепраздничный день примерно одинаково, поэтому они учитывались общим коэффициентом K_n . Так как праздничных дней в году всего 7 и электропотребление за эти дни не имеет больших различий от электропотребления в выходные дни, то они учитывались коэффициентом K_n .

Суточные изменения нагрузки

В связи с внутринедельными изменениями нагрузки выделяются четыре типа кривых суточных графиков: график нормального рабочего дня, выходного и праздничного дня, сокращенного и послепраздничного рабочего дня (понеделник). В работе приводятся данные по графикам только для нормального рабочего дня.

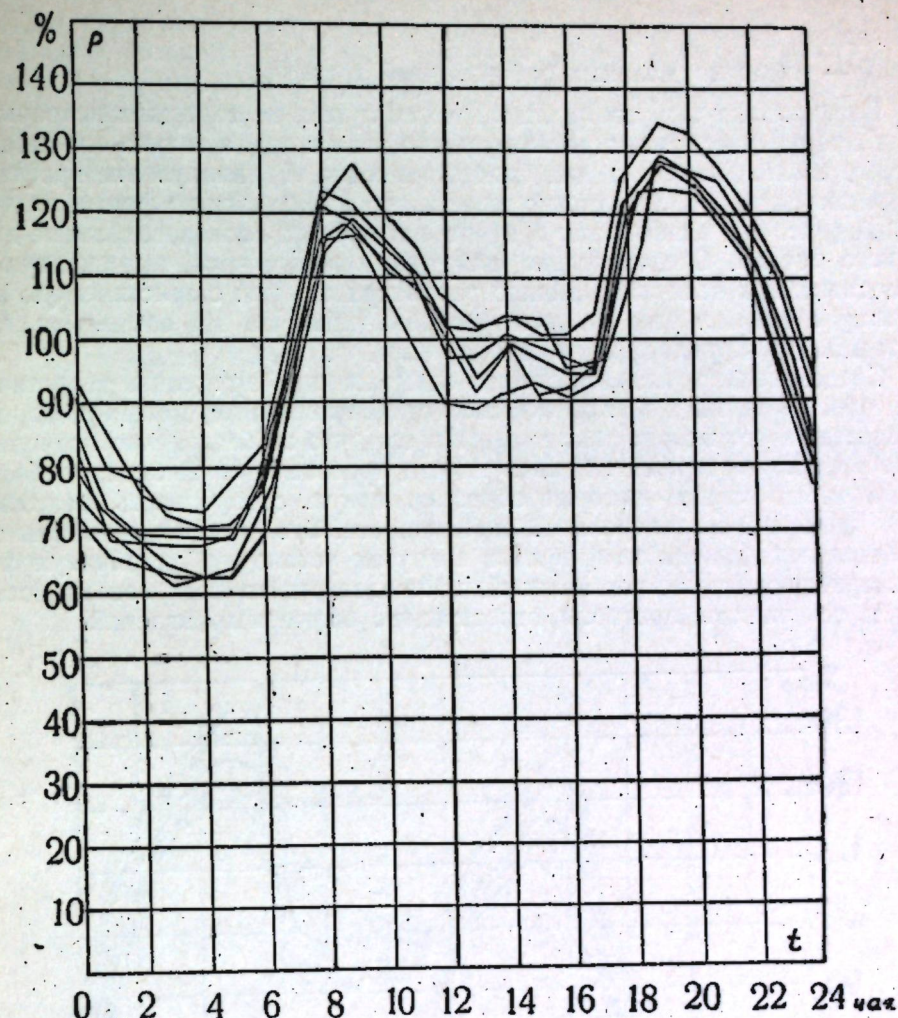


Рис. 1. Графики среднего значения нагрузки для нормального рабочего дня января месяца 1956—1962 гг.

Поскольку реальный суточный график нагрузки содержит в себе случайные отклонения и не повторяется в строго идентичной форме, то для расчетов и анализа необходимо получить средние графики, которые не содержат случайных отклонений. Относительно размеров выборки, т. е. периода, за который следует осреднить действительные графики, имеются рекомендации [3—4]. Этот период должен быть таким, чтобы исключить влияние случайных колебаний, которые создают сезонные изменения нагрузки, связанные с продолжительностью светового дня. Нами было замечено, что при выборке в 25 дней в осенний и весенний период уже сказываются сезонные колебания нагрузки, поэтому была принята выборка за 10 нормальных рабочих дней. Это удобно и при вычислениях. Для уменьшения влияния сезонных изменений в весенние и осенние дни данные выбирались из средних чисел месяца. Выборочные данные были приведены к величине среднесуточной мощности за нормальный рабочий день соответствующего месяца, которая определяется по формуле:

$$\bar{P}_{н.р.д.} = \frac{1}{N} \sum_{N} W_{н.р.д.}, \quad (2)$$

где

N — число нормальных рабочих дней в месяце.

График нагрузки, построенный таким путем, не содержит непрерывного аperiodического роста нагрузки из года в год, а только описывает форму кривой нагрузки для каждого месяца. Группируя эти графики по месяцам за ряд лет, можно видеть, что они близки по форме между собой (рис. 1) и напоминают графики нагрузок за последовательные дни одного месяца. Следовательно, нагрузку каждого часа, выраженную в относительных величинах, можно рассматривать как статистическую величину с нормальным законом распределения. На это обстоятельство указывается в работах ряда авторов [2, 3, 4].

Следовательно, имеется полная возможность применить теоретически обоснованный в математической статистике метод малых выборок. Существо этого метода заключается в том, что из бесконечно большого числа членов генеральной совокупности производится выборка небольшого числа членов, которые образуют новую совокупность, называемую выборкой из генеральной совокупности. Это дает возможность по выборочным данным из графиков нагрузок установить устойчивую характеристику изучаемых явлений, наблюдаемых во всей совокупности их, и основывать прогнозы относительно изучаемых явлений.

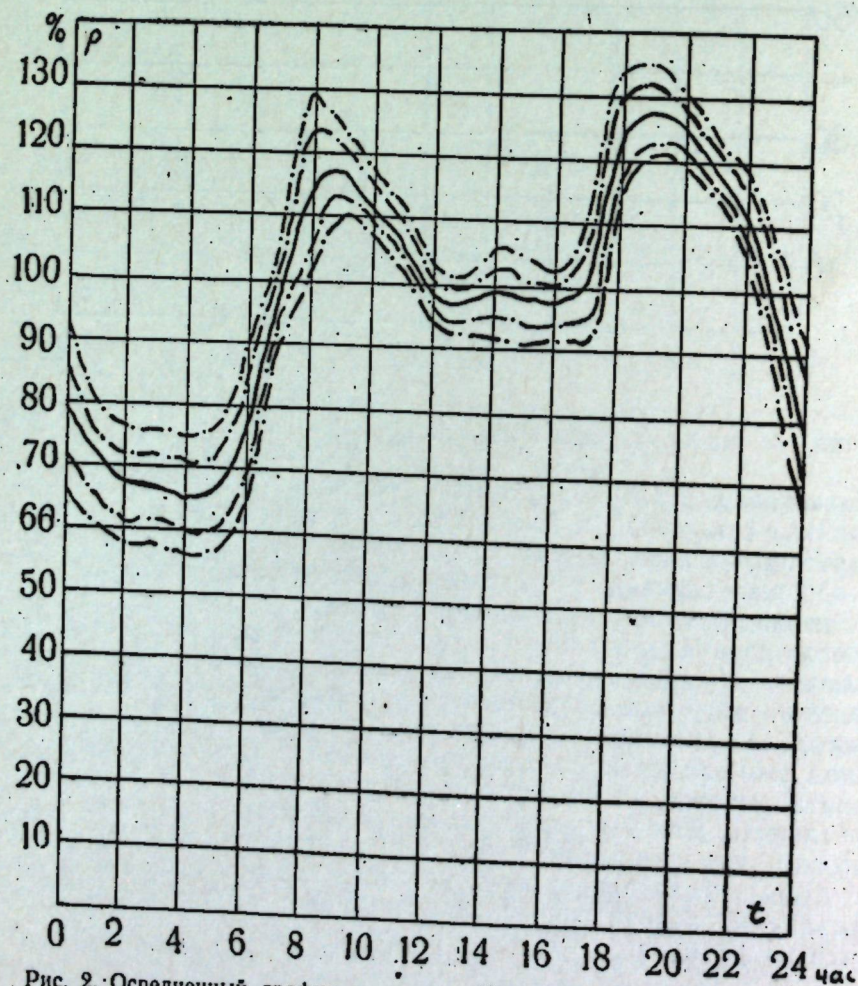


Рис. 2. Осредненный график нагрузки декабря месяца с диапазонами вероятности 0,750 и 0,975.

Для этого необходимо нагрузку каждого часа охарактеризовать генеральной средней — x_0 и дисперсией — σ . Располагая данными за небольшой ряд лет, т. е. выборкой из генеральной совокупности, оцениваем эти величины показателями t — распределения (Стьюдента).

При оценке средней, полученной по данным небольшого числа наблюдений, Стьюдент рассматривал распределение не выборочной средней, а другой величины, тесно с ней связанной:

$$t = \frac{\bar{x} - x_0}{S_{\bar{x}}}, \quad (3)$$

где:

x_0 — представляет среднюю генеральной совокупности,

$\bar{x}$ — среднюю выборки объема n членов,

$S_{\bar{x}}$ — стандартную ошибку выборки, вычисляемую по формуле:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (4)$$

Здесь

S — выборочное стандартное отклонение, определяемое по формуле

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5)$$

Распределение Стьюдента подчинено закону:

$$S(t) = C \left(1 + \frac{t^2}{n-1}\right)^{-\frac{n}{2}} \quad (6)$$

Оно приближается к нормальному распределению:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (7)$$

когда n — возрастает. Число n в распределении Стьюдента может быть любым. Это распределение применимо и тогда, когда выборка взята из такой генеральной совокупности, распределение которой более или менее отличается от нормального распределения.

Выборочная средняя $\bar{x}$ является оценкой из генеральной совокупности x_0 . Стандартная ошибка выборки $S_{\bar{x}}$ является оценкой величины $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$.

Пересчет осредненных величин графиков нагрузок за каждый месяц в относительные величины производится по формуле:

$$X_i = \frac{P_i}{P_{н.р.л}} \cdot 100,$$

где

P_i — текущая мощность осредненного графика нагрузки данного месяца;

x_i — текущая координата графика нагрузки, выраженная в %;

$P_{н.р.л}$ — определяется по формуле (2).

Полученные графики за ряд лет (1956—1962) группировались по месяцам за характерные дни. Средние величины координат за ряд лет вычислялись по формуле:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_i}{n} \quad (8)$$

Таким образом, по этим средним величинам строятся усредненные графики для каждого месяца (рис. 2).

Доверительный интервал для x_0 с вероятностью в 95% определяется по формуле:

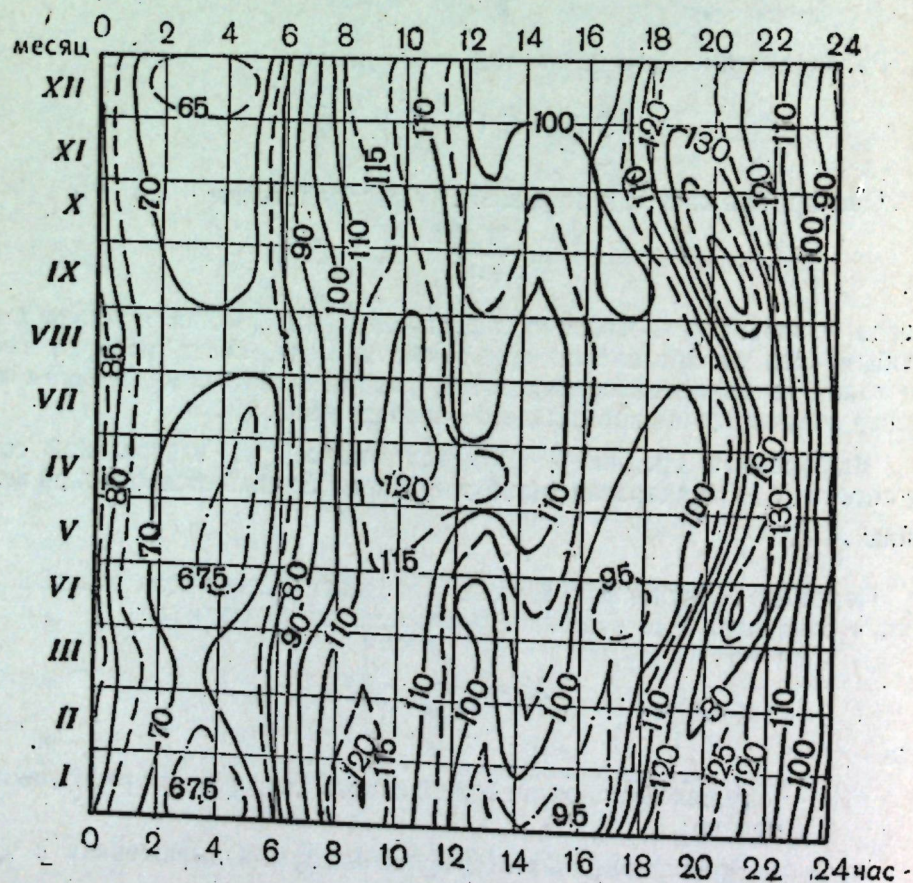
$$\bar{x} - t_{0,05} \cdot S_{\bar{x}} \leq x_0 \leq \bar{x} + t_{0,05} \cdot S_{\bar{x}}.$$

Значение $t_{0,05}$ для данного n , найденное по таблице распределения t [5], подставляем в эту формулу и получаем окончательно выражение для средней, то есть $\bar{x} \pm t_{0,05} \cdot S_{\bar{x}}$.

Возможная ошибка в определении x_0 по средней выборки $\bar{x}$ при данном числе выборочных значений n определяется по формуле:

$$\Delta X\% = \frac{t_{0,05} \cdot S_{\bar{x}}}{\bar{x}} \cdot 100.$$

Оценкой варьирования выборки (дисперсии σ) является величина S . Для оценки доверительных интервалов для σ применяется распределение χ^2 (хи-квадрат), таблица для которого приведена [5].



Доверительный интервал определяется по соотношению:

$$\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{\chi_n^2} \leq \sigma^2 \leq \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{\chi_n^2},$$

где

χ_n^2 , χ_n^2 — наибольшее отклонение соответственно для нижней и верхней границы доверительного интервала.

Поскольку для определения σ был принят 95% доверительный интервал, то верхняя граница соответствующих доверительных интервалов определяется по формуле:

$$\sigma \leq \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{\chi_{0,975}^2}},$$

где

$\chi_{0,975}^2$ — берется из таблиц для соответствующих n (числа членов выборки).

Полученные данные дают возможность построить топограмму (рис. 3) или суточные графики нагрузки энергосистемы для каждого месяца с диапазонами вероятности отклонения нагрузки от средней (рис. 2), которые могут быть охарактеризованы коэффициентами полноты — γ и пиковости β (рис. 4).

Из графиков изменений средних величин коэффициентов γ и β видно, что наибольшая пиковость суточных графиков нагрузки наблюдается в весенне-осенний период года, когда имеет место спад и соответствующий подъем нагрузки в Молдавской энергосистеме. Одновременно в это время имеет место и разуплотнение суточных графиков.

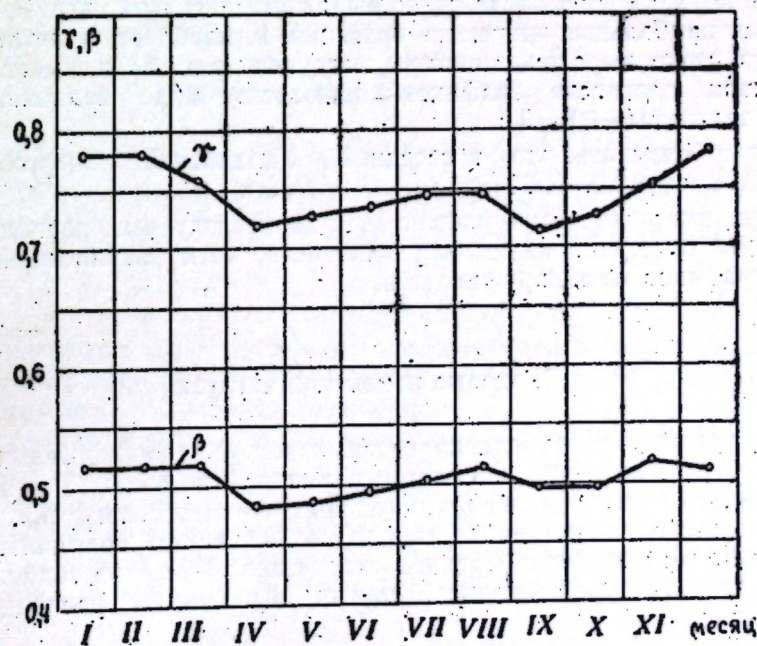
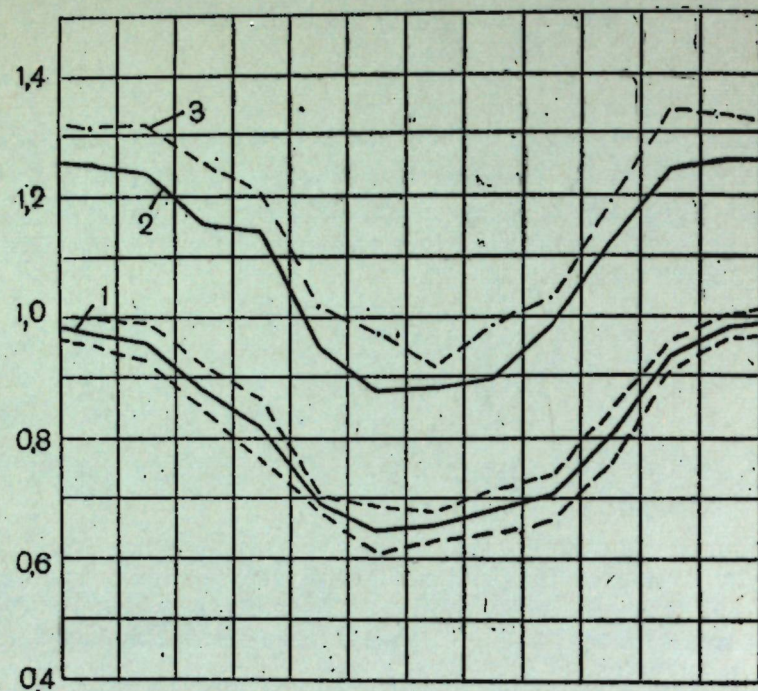


Рис. 4. Годовые изменения коэффициентов γ и β для нормального рабочего дня.



5. Статические графики годового изменения нагрузки.

В зимнее же время, когда резко выражен максимум нагрузки и наблюдается наибольшая плотность графиков и, наоборот, в летнее время, когда резко выражен минимум нагрузки (рис. 5) и имеет место наименьшая плотность графиков, пиковость мало отличается от средней величины — $\beta=0,5$.

Следует отметить, что в соседней Украинской энергосистеме $\beta=0,8-0,78$ и $\gamma=0,9-0,87$.

Анализ изменения этих показателей за исследуемый период показывает, что тенденции ни к росту пиковости, ни к разуплотнению суточных графиков не обнаруживается.

Годовые изменения нагрузки

На периодические изменения годовых нагрузок накладываются годовые приросты нагрузок, которые неодинаковы по годам. Это затрудняет проведение анализа графиков годовых изменений нагрузки. Чтобы исключить это влияние, необходимо из них исключить дополнительный прирост. Для определения средней статического графика годового изменения нагрузки удобен метод малых выборок и распределение Стьюдента.

На рис. 5 видно, что статические графики годового изменения нагрузки за период развития энергосистемы (1956—1965 гг.) мало отличаются по форме.

Выводы

1. Располагая данными за небольшой ряд лет и оценивая величины x_0 и σ показателями x и s , можно построить многолетние суточные графики для каждого месяца или топограммы этих графиков, графики годовых изменений нагрузки с диапазонами вероятности отклонения нагрузки от средней.

2. Анализ графиков показывает устойчивый до настоящего времени характер их изменения, несмотря на значительный (30%) ежегодный прирост нагрузки в Молдавской энергосистеме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Гуревич, В. А. Гадиева, Б. К. Понкратов, Б. М. Цветков. К вопросу об определении перспективных режимов нагрузки энергетических систем и их объединений. Информационное письмо № 10, ЭНИН АН СССР, 1959.
2. Б. В. Гнеденко, Б. С. Мешель. О статистических методах расчета исследования электрических нагрузок промышленных сетей. «Электричество», 1960, № 2.
3. Б. К. Понкратов. Процесс выравнивания нерегулярных колебаний электрической нагрузки энергетических систем. «Общая энергетика». Выпуск 5, Изд-во АН СССР, М., 1961.
4. М. Петку. Описание режима нагрузки электроэнергетических систем. Editions de l'Académie de la R. P. R. «Revue d'Électrotechnique et d'Energétique», т. V, 1960, № 2.
5. Дж. У. Снедекор. Статистические методы в применении к исследованиям в сельском хозяйстве и биологии. Сельхозиздат, М., 1960.

Г. М. ФЕДОРИШЧЕНКО, М. Л. МИСНИК

ФОЛОСИРЯ МЕТОДЕЛОР ДЕ СТАТИСТИКЭ МАТЕМАТИКЭ ШИ А ТЕОРИЕЙ ПРОБАБИЛИТЭЦИЙ ЛА АНАЛИЗА ГРАФИЧЕЛОР ДЕ САРЧИНЭ А СИСТЕМУЛУИ ЕНЕРЖЕТИК АЛ МОЛДОВЕЙ

Резюме

Ын лукраре, спре деосебуре де методеле дес ынтребуинцате ла анализа графичелор де сарчинэ, сынт апликате методеле де статистикэ математикэ ши а теорией пробабилитэций.

Ачаста дэ посибилитате де а обцине ку ун ануит град де екзактитате графичеле де сарчинэ, каре се карактеризязэ прин мэримя медие ши абатеря де ла ачастэ мэриме, ла фел ка ши интервалул конфиденциал, ын каре се афлэ ачесте мэримь.

Материалеле черчетэрий сынт дестинате пентру планификаря перспективэ а дезволтэрий системулуй енержетик ал Молдовей.

М. К. БОЛОГА, Г. М. ЛЕВИН, Ю. Н. ПАУКОВ

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ НА КОНВЕКТИВНУЮ ТЕПЛОТДАЧУ

Интенсификация процессов теплообмена является одной из неотложных задач теплоэнергетики, ибо от ее успешного решения зависит не только совершенствование многочисленных и разнообразных машин и аппаратов, но часто и сама возможность их осуществления. Большинство исследований, проведенных в последнее время по изучению возможности интенсификации процессов теплообмена, основаны на применении методов искусственной турбулизации пограничного слоя, что вполне естественно, так как нормальное развитие турбулентности не дает возможности получить максимально-рациональную интенсификацию теплообмена вследствие того, что эта интенсификация возникает при весьма высоких скоростях потока, а следовательно, и значительных гидравлических сопротивлениях.

Для создания искусственной турбулизации применяются различные решетки и планки, вращение и вибрация поверхности нагрева, изучается влияние акустических и электрических полей.

В настоящей статье приводится обзор результатов исследований влияния на конвективную теплоотдачу механических вибраций и наложения акустических полей. Большинство из этих работ относится к изотермическим условиям теплообмена вязкой жидкости с твердым телом и охватывает в основном три физически различных случая:

- колебания твердой поверхности в присутствии невозмущенной жидкой среды,
- соприкосновение неподвижной поверхности со средой, испытывающей акустические колебания,
- колебание жидкости в неограниченном объеме.

Математическая формулировка задачи, связанной с колебаниями и теплопередачей, очень трудна, а уравнения, описывающие этот процесс в общем виде, на современном уровне знаний неразрешимы. Поэтому различные исследователи вынуждены обратиться к эмпирическим методам с тем, чтобы отыскать определяющие параметры и оценить относительную значимость физических величин, входящих в уравнения неразрывности, энергии и движения.

Проведенные эксперименты показали, что при наличии колебаний коэффициент теплоотдачи обычно увеличивается. Однако эти данные немногочисленны и иногда сомнительны вследствие затруднительности проведения точных измерений, особенно в случае измерений на пластине. Кроме того, экспериментальные исследования были привязаны к различным конкретным условиям, и естественно, что они привели к разноречивым зависимостям, которые нельзя с уверенностью экстраполиро-

вать на широкий класс теплообменных аппаратов тем более, что во всех исследованиях в качестве теплообменной поверхности применялась гладкая поверхность, в большинстве случаев цилиндрическая.

Аналитическое решение задачи об акустическом течении около круглого цилиндра, помещенного в пучность стоячей волны, опубликовано Г. Шлихтингом в 1932 г. Согласно решению Г. Шлихтинга [1], получившему впоследствии экспериментальное подтверждение, существуют две области течения в каждом квадранте: тонкий (первичный) слой в непосредственной близости от цилиндра и внешнее (вторичное) течение. В первичном слое течение происходит к поверхности цилиндра вдоль оси распространения колебаний, а во внешнем течении движение происходит от поверхности цилиндра вдоль этой оси.

Заметим, что когда жидкость ограничена, во внешнем течении образуются вихри. Такую картину наблюдал Г. Вест [1] в опытах с малыми цилиндрами и установил, что с увеличением частоты и амплитуды колебаний движение усиливается и внезапно возникают сложные вихри вторичного течения, а первичные вихри сжимаются к поверхности (рис. 1). Сокращение первичных вихрей и возникновение вторичного течения наблюдалось и другими исследователями, а Е. Андраре [1] сфотографировал акустическое течение около круглого цилиндра и установил, что при постоянной частоте и амплитуде вихри растут с увеличением диаметра цилиндра.

В основу попыток теоретического решения задачи, связанной с колебаниями и теплопередачей, различные авторы положили принцип независимости воздействий на пограничный слой различных составляющих суммарной скорости. Происходящие же в действительности процессы взаимосвязаны, и поэтому полученные расчетные зависимости могут быть применены только в той области частот, амплитуд и интенсивностей, в которой они получили экспериментальное подтверждение.

В. Бузник и К. Везломцев [2] определяют суммарную кинетическую энергию, действующую на тепловой пограничный слой, по следующей формуле:

$$E_s = \sum_{i=1}^{i=n} E_i \quad (1)$$

Суммарную скорость авторы, исходя из уравнения (1), записывают в виде:

$$w_s = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} w_i^2}$$

и, переходя к критерию Рейнольдса, вычисленному по суммарной скорости, приходят к критериальному уравнению $Nu = c Re_s^n$.

По аналогичной схеме, с использованием принципа суперпозиции, П. Кубанский [3, 4] рассчитал теплоотдачу от горизонтального цилиндра при наличии в воздухе акустических течений. Результирующий коэффициент теплоотдачи получен автором как сумма коэффициента теплоотдачи от цилиндра при отсутствии колебаний, изменения коэффициента теплоотдачи, вызванного колебательной скоростью в стоячей акустической волне, и изменения коэффициента теплоотдачи, вызванного акустическими течениями.

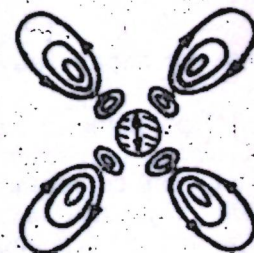


Рис. 1. Течение около колеблющегося цилиндра (по Г. Весту).
($f = 550$ гц, $a > 0.4$ мм, $d = 0.77$ мм.)

П. Кубанский [5] также предпринял удачную попытку распространения акустического течения внутри трубки Кундта на течения, наблюдаемые у стенок цилиндра. Им составлено выражение для функции тока и при сравнении с акустическими течениями, наблюдаемыми в его опытах, получено хорошее совпадение результатов. На основании полученных результатов П. Кубанский рассчитал суммарное значение критерия Нуссельта для осесимметричного акустического течения у нагретого цилиндра при естественной и вынужденной конвекции и для плоского течения в случае вынужденной конвекции. Однако следует отметить, что полученные для случая осесимметричного акустического течения зависимости крайне неудобны для практического использования в инженерных расчетах, вследствие их громоздкости. Кроме того, как указывает сам автор, применимость полученных формул ограничивается акустическими течениями с амплитудами смещения, значительно меньшими ($\approx$ в 1000 раз) размеров цилиндра, находящегося в акустическом поле.

Влияние механических вибраций

Исследование теплоотдачи вибрирующей трубки диаметром 1,9 см в воде выполнено Р. Мартинелли и Л. Белтером [1, 26] в 1938 г. При амплитудах до 0,25 см и частоте до 40 гц максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи достигло более 400% по сравнению с его значением при отсутствии колебаний. Однако достоверность этих результатов сомнительна, так как Л. Белтер указал, что они не совпадали с результатами более поздних экспериментов.

Н. Калашников и В. Черникин [6] исследовали влияние вибраций на теплоотдачу при подогреве вязких жидкостей в условиях естественной конвекции. В качестве рабочих сред использовались: высоковязкий мазут ($\nu_{20} = 66,2 \text{ см}^2/\text{сек.}$), автол 18 ($\nu_{20} = 13,0 \text{ см}^2/\text{сек.}$), веретенное масло ($\nu_{20} = 1,28 \text{ см}^2/\text{сек.}$) и смесь веретенного масла с керосином ($\nu_{20} = 0,17 \text{ см}^2/\text{сек.}$). В опытах применялся латунный цилиндр с диаметром 1,98 см и рабочей длиной 28,2 см. Амплитуда вибраций изменялась от 0,5 см до 4 см, частота от 1,7 до 27 гц, среднеквадратичная скорость вибраций от 4 до 134 см/сек.

Принятые режимы исследования позволяли пренебречь свободной конвекцией по сравнению с подогревом в условиях вибрации. При этом критерий Пекле, использование которого не совсем удачно, изменялся от $1,6 \times 10^4$ до 4×10^5 , а Pr от $1,4 \times 10^2$ до $1,5 \times 10^4$. Критериальная зависимость, предложенная Н. Калашниковым и В. Черникиным, имеет вид:

$$Nu = 0,146 Pe^{0,67} Pr^{-0,16},$$

где все параметры отнесены к средней температуре пограничного слоя.

Проведенные исследования показали, что вибрация цилиндра значительно интенсифицирует подогрев вязких жидкостей. При наложении вибраций со скоростью 134 см/сек коэффициент теплоотдачи к мазуту 100 увеличивается в 20 раз, а к смеси веретенного масла с керосином при тех же условиях — в 24 раза. Для маловязких жидкостей интенсивность роста коэффициента теплоотдачи в большей степени зависит от амплитуды, чем от частоты. С увеличением же вязкости роль амплитуды снижается и для высоковязких жидкостей коэффициент теплоотдачи является функцией только частоты.

Следует отметить, что все исследования [6] проводились при горизонтальном расположении подогревателя, так как в предварительных исследованиях авторами был установлен невысокий эффект от вибрации вертикальных и наклонных подогревателей.

Опыты по изучению теплоотдачи вибрирующего цилиндра к газам проводились В. Бузником, В. Ролинским и А. Ипатенко [7]. Исследования охватывали как область естественной, так и вынужденной ($Re = 10^3 - 10^4$) конвекции. Приняв за определяющую температуру среднюю температуру пограничного слоя, авторы получили критериальную зависимость $Nu_m = 0,182 Re_s^{0,64} Pr_m^{0,32}$, где $Re_s = \sqrt{Re^2 + Re_a^2}$ (Re — число Рейнольдса, вычисленное по скорости потока, Re_a — по амплитудному значению скорости вибрации).

Следует отметить, что экспериментальные данные по теплоотдаче вибрирующего цилиндра к газам [7] удовлетворительно согласуются с результатами исследования теплоотдачи вращающихся [2] и поперечно обтекаемых [25] цилиндров (рис. 2). Таким образом, естественная конвекция механическими вибрациями переводится в область вынужденной конвекции, и теплоотдача значительно интенсифицируется.

В. Коваленко [8] определил влияние вибрации на теплоотдачу при кипении. В качестве теплоотдающей поверхности он использовал трубку диаметром 38 мм и длиной 250 мм. Удельный тепловой поток q менялся от 4×10^3 до $25 \times 10^3 \text{ ккал/м}^2\text{час}$, частота вибраций — от 700 до 3000 1/мин, а амплитуда колебаний — от 0,15 до 0,35 мм.

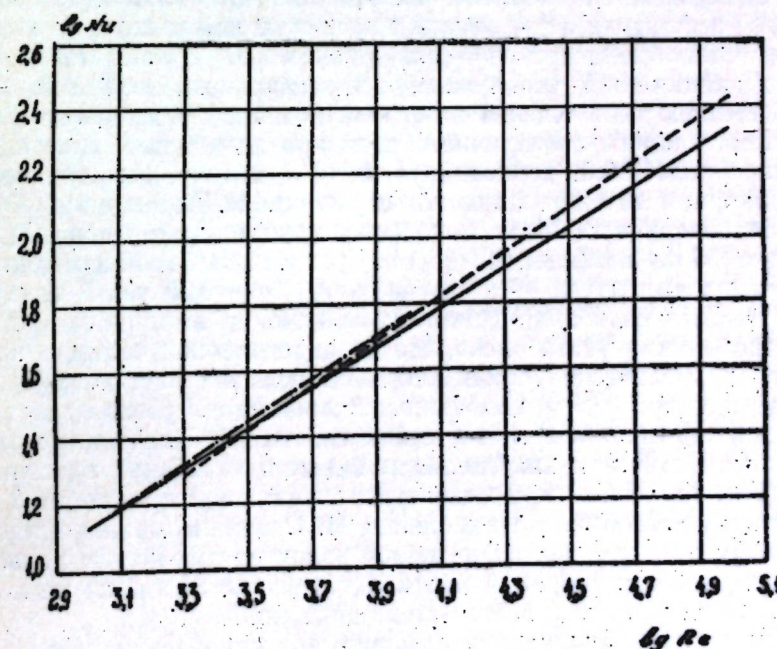


Рис. 2. Опытные данные по теплоотдаче вибрирующего, вращающегося и поперечно обтекаемого цилиндра.

— М. Михеев, поперечное обтекание цилиндра;
 --- В. Кейс, вращение цилиндра;
 - · - В. Бузник, вибрация цилиндра.

Полученные результаты показали, что в области низких тепловых потоков ($q < 6000$ ккал/м²час) вибрации несколько интенсифицируют теплоотдачу. С увеличением теплового потока положительное влияние вибрации на теплоотдачу уменьшается. При увеличении теплового потока в области пузырькового кипения (до $q = 15000$ ккал/м²час) вибрация оказывает все более отрицательное влияние на теплоотдачу. Такой характер действия вибрации В. Коваленко объясняет механизмом отрыва пузырьков с теплообменной поверхности: при малых тепловых потоках, когда парообразование еще не влияет или мало влияет на гидродинамику, в пристенном слое действует обычный механизм интенсификации процесса теплоотдачи, вызванный вибрацией теплообменной поверхности; с ростом теплового потока вибрация способствует преждевременному срыву пузырей и тем самым уменьшает их турбулизирующее действие.

В 1959 г. А. Шайн опубликовал [9] результаты опытов с пластиной высотой 20 см и шириной 25 см, на которую накладывались колебания частотой 11—315 гц с амплитудой до 0,155 см. Тепловой поток от пластины и коэффициент теплоотдачи определялись по интерферометрическим картинам распределения температур в пограничном слое. В ходе исследований обнаружено существование критического комплекса $(af)_{кр} = 0,39$ см.гц, при котором возникает волновой режим в пограничном слое. Когда $(af) < (af)_{кр}$, колебания не влияют на процесс теплообмена, а в случае $(af) > (af)_{кр}$ коэффициент теплоотдачи начинает возрастать и при $af = 1,95$ см.гц увеличивается на 40% по сравнению со стационарным значением. Установлено, что влияние частоты колебаний при постоянной амплитуде и амплитуды при постоянной частоте на интенсификацию теплообмена при $af = \text{const}$ одинаковы. Кроме того, автор пришел к заключению, что изменение коэффициента теплоотдачи вызвано изменением типа течения в пограничном слое, а не закономерным изменением толщины пограничного слоя при колебаниях пластины.

Влияние колебаний, перпендикулярных к потоку, на теплоотдачу при ламинарном течении жидкости изучалось И. Сканланом [10]. Исследуемая поверхность была выполнена в виде квадратной пластины со стороной 25 мм и толщиной 0,05 мм. Частота колебаний изменялась от 20 до 75 гц, а амплитуда — в интервале 0,025 — 0,05 мм. В отдельных случаях частота колебаний достигала 600 гц, а амплитуда 0,1 мм.

Исследованиями установлено, что до определенной частоты, названной автором критической, происходит интенсивный рост коэффициента теплоотдачи, а при $f > f_{кр}$ коэффициент теплоотдачи резко падает, приближаясь к значению α при отсутствии колебаний. Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии колебаний пластины на коэффициент теплоотдачи. В отдельных случаях α возрастает в 3 раза. Наличие критической частоты в опытах И. Сканлана можно объяснить, по-видимому, тем, что при очень малой величине амплитуды колебаний и больших частотах вибраций картина обтекания пластины не отличается от течения жидкости в отсутствие колебаний.

Р. Лемлих [11], анализируя решение, полученное для квазистационарного пульсационного режима, пришел к выводу, что интенсификация теплообмена также начинается с определенной частоты и в случае наложения вибраций на рабочую среду. Автор принял ориентировочную критическую частоту равной 20 гц.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать следующее:

а) механические вибрации теплообменной поверхности и рабочей среды значительно интенсифицируют конвективную теплоотдачу. При этом процессы теплообмена интенсифицируются как между поверхно-

стью и пограничным слоем (в результате турбулизации пристенного ламинарного подслоя), так и в области между турбулентным ядром и пограничным слоем (за счет ее турбулизации при сравнительно больших амплитудах вибраций);

б) интенсификация теплообмена вибрацией в случае естественной конвекции эффективнее для горизонтальных теплоотдающих поверхностей, чем для вертикальных и наклонных;

в) увеличение частоты вибрации при неизменной амплитуде и увеличение амплитуды при неизменной частоте приводят к увеличению коэффициента теплоотдачи;

г) существует определенная, так называемая критическая частота, ниже которой вибрация не интенсифицирует конвективную теплоотдачу.

Влияние акустических полей

а) Естественная конвекция

Исследование течения у нагретого твердого тела в стоячей акустической волне и влияния этого течения на теплоотдачу выполнено П. Кубанским [12] в 1952 г. В акустическое поле помещалась гладкая латунная калориметрическая трубка диаметром 2,4 см и длиной 32,5 см. Коэффициент теплоотдачи определялся по тепловому балансу. Температура стенки трубки достигала 70°C, интенсивность акустического поля составляла в центральной части пучка $I_0 = 0,08$ вт/см² при длине волны $\lambda = 2,3$ см. Температура окружающей среды была около 15°C.

Визуальными наблюдениями установлено, что у поверхности трубки расположены темные полосы, отстоящие друг от друга на расстоянии, равном полуволне излучаемых колебаний. Измерение температуры воздуха вблизи стенки показало, что в области темных полос температура значительно выше, чем в светлых участках между ними. Автор экспериментально доказал, что темные полосы расположены в узлах стоячей волны, а светлые — в пучностях. Такой характер наблюдаемого явления П. Кубанский объясняет тем, что у стенки возникают течения среды, направленные от пучностей к узлам. В узлах происходит встреча двух взаимнопротивоположных потоков, которые, сливаясь в один, удаляются в нормальном, по отношению к поверхности трубки, направлении.

Таким образом, в аксиальной стоячей волне акустические течения представляют собой систему встречных, осесимметричных вихрей, располагающихся у стенки цилиндра, с пространственным периодом, равным полуволне. Возникающие течения вызывают приток холодного воздуха к стенке в пучностях стоячей волны и отвод нагретого воздуха в ее узлах, тем самым интенсифицируя процесс теплообмена. В опытах П. Кубанского получено увеличение коэффициента теплоотдачи в два раза и для значений $GrPr = 25 \times 10^3 - 10^4$ предложена зависимость

$$Nu = 10 K^{0,5}, \text{ где } K = \frac{P}{\rho g \beta \Delta t \frac{\lambda}{2}},$$

P — давление звукового излучения,

$\rho g \beta \Delta t$ — подъемная сила.

П. Кубанским [13] также изучено поведение резонансной системы в поле акустических волн большой амплитуды. Опыты проводились с латунной трубкой диаметром 2,4 см и длиной 32,5 см, в стенках которой в шахматном порядке высверливались цилиндрические или конические

отверстия с шагом от 0,1 до 1 см. Собственная частота колебаний резонаторов равнялась 8,6—33,6 кГц. Трубка помещалась в бегущую волну, и резонаторы возбуждались на основной частоте изменением частоты колебаний, излучаемых вибратором. В проведенных исследованиях обнаружено наличие у поверхности трубки с возбужденными резонаторами значительной «силы притяжения», направленной из окружающей среды по нормали к стенке трубки. Эффект «притяжения» особенно заметен в непосредственной близости от устьев резонаторов и по их краям. Исследования проводились при $I_0 = 0,0455 \div 0,237 \text{ вт/см}^2$ и $(GrPr)_m = (38-58) \times 10^3$. Результаты опытов показывают, что наличие резонаторов, возбужденных акустическими колебаниями, значительно интенсифицирует теплоотдачу. Значение критерия Nu в системе с возбужденными резонаторами в 2,5 раза выше, чем значение Nu в случае цилиндра, помещенного в стоячую акустическую волну, и в 4,5—7 раз выше, чем значение Nu для гладкого цилиндра.

Следует, однако, отметить [29], что при вычислении коэффициента теплоотдачи последний был отнесен к наружной поверхности калориметрической трубки и увеличение поверхности, происходящее за счет резонансной системы, не учитывалось, что, конечно, неправильно. Действительно, поверхность нагрева теплообменника за счет резонансной системы была увеличена в 2,75 раза, и, следовательно, величина критерия Nu значительно завышена.

Влияние ультразвуковых полей на теплоотдачу к воде и к трансформаторному маслу изучали А. Жукаускас, А. Шланчаускас и Е. Яронис [14]. Эксперименты проводились в сосуде размерами 185×160×40 мм, в котором устанавливались калориметрические трубки диаметром 8 и 19 мм. Акустические колебания частотой 697 кГц создавались кварцевым излучателем и волнопоглощающей поверхностью. Интенсивность поля вычислялась по значениям напряжения и условиям колебания кварцевой пластины. Влияние акустического поля на теплоотдачу определялось путем изменения интенсивности ультразвуковых волн при постоянном количестве переданного тепла. Авторами предложена экспериментальная зависимость:

$$Nu_f = 0,4 (GrPr)_f^{0,25} (Pr_f/Pr_w)^{0,25} \left(\frac{GrPr}{10^3} \right)^{0,13} T^{-0,25}, \quad (2)$$

в которой значение $GrPr$ изменялось от 10^4 до 10^7 . При интенсивности ультразвукового поля $I = 1,9 \text{ вт/см}^2$ теплоотдача к воде увеличилась в 2,8 раза, к маслу — в два раза.

Анализ формулы (2) показывает, что интенсификация теплообмена имеет место при интенсивности ультразвукового поля $I \geq 0,6 \div 0,8 \text{ вт/см}^2$. В то же время авторы указывают, что при $I = 0,7 \text{ вт/см}^2$ в воде начинается дегазация. Последнее позволяет предположить, что возможной причиной интенсификации теплообмена при $I \geq 0,6 \div 0,8 \text{ вт/см}^2$ является турбулизирующее действие пузырьков, возникших при дегазации, а не наличие акустического поля. Из формулы (2) также следует, что наложение ультразвукового поля с интенсивностью меньше $0,6 \text{ вт/см}^2$ приводит к ухудшению теплоотдачи. Этот результат явился, возможно, следствием неточного определения коэффициента теплоотдачи. Ошибки могли внести концевые потери и влияние боковых стенок, так как ширина сосуда составляла всего 40 мм. Вызывает сомнение и правильность определения интенсивности акустического поля по напряжению, приложенному к вибратору, и акустическому сопротивлению среды, ибо с возникновением дегазации акустическое сопротивление среды резко возрастает.

В опытах Д. Холмана и Мот-Смит Типтона [15] по изучению влия-

ния звукового поля на теплоотдачу от горизонтального цилиндра увеличения коэффициента теплоотдачи не было обнаружено до тех пор, пока звуковое давление не превысило 135 дБ. С увеличением давления свыше 135 дБ авторами отмечено увеличение коэффициента теплоотдачи, который при звуковом давлении, равном 150 дБ, становится в два раза большим, чем в отсутствии звукового поля. Вероятной причиной увеличения коэффициента теплоотдачи авторы считают наличие акустического ветра вблизи поверхности цилиндра.

С. Уолкер и С. Адамс [16] в 1959 г. опубликовали результаты исследования потоков, возникающих вблизи поверхности цилиндра, помещенного в низкочастотное звуковое поле, и влияния этих потоков на охлаждение цилиндра. Рабочей средой служил воздух. В опытах использовался деревянный цилиндр диаметром 4,66 мм, в который был вмонтирован термистор. Термистор питался током, достаточным для его работы в качестве малого источника тепла. Цилиндр мог вращаться вокруг своей оси, что позволяло определить распределение температур по окружности. Ось цилиндра была расположена перпендикулярно колебательной скорости частиц в звуковой волне. Исследования показали, что при звуковом давлении до 114 дБ охлаждение обусловлено колебательной скоростью частиц, а при звуковом давлении свыше 114 дБ — акустическими течениями.

В 1961 году Р. Фанд и И. Кей [1] провели детальное экспериментальное исследование с целью выяснения физической сущности процесса, связывающего колебания и теплопередачу. Для исследований был выбран случай свободной конвекции около горизонтального цилиндра. Используемая для экспериментов опытная установка состояла из электрически нагреваемого круглого цилиндра диаметром 19 мм и системы для генерации и измерения плоского стоячего и бегущего акустического поля. Цилиндр, состоящий из пяти отдельных секций, подвешивался горизонтально в безэховой камере. Средние три секции длиной 152 мм представляли собой медные втулки, в каждой из которых находился отдельный электрический нагревательный элемент. Данные по теплопередаче были определены по центральной секции цилиндра. Остальные две секции были поставлены для предотвращения тепловых потерь с концов центральной секции.

Исследование проводилось при следующих 4-х условиях эксперимента:

- I. теплопередача без воздействия звука;
- II. теплопередача в неподвижном звуковом поле; цилиндр расположен в пучности стоячей волны;
- III. теплопередача в неподвижном звуковом поле; цилиндр расположен вне пучности стоячей волны;
- IV. теплопередача в бегущей волне.

Диапазон изменения основных параметров в опытах следующий: частота $f = 1100 - 6120 \text{ гц}$; температурный перепад $\Delta t = 0 - 140^\circ\text{C}$; уровень звукового давления 0—150 дБ; температура воздуха $t = 21,1^\circ\text{C}$. Из полученных результатов следует, что интенсивные поперечные звуковые колебания оказывают существенное влияние на коэффициент свободной конвективной теплоотдачи горизонтального цилиндра в воздухе. Авторами установлено, что основным фактором, влияющим на коэффициент теплопередачи, является колебательная кинетическая энергия. Вихревое течение возникает, когда уровень звукового давления (УЗД) достигает так называемого «критического значения УЗД» и становится полностью развитым при более высоком уровне звукового давления. Дальнейшее увеличение УЗД приводит к увеличению размеров вихрей,

но характер течения не меняется. В таблице 1 приведены критические значения и УЗД для полностью развитого вихревого течения при различных значениях $\lambda/2a$, где λ — длина волны и a — диаметр нагреваемого цилиндра.

Экспериментальные данные были обработаны в виде зависимостей:

$$\alpha_b = C_1 \frac{(\Delta t d^3)^m}{d} [(af)^2 F]^n \text{ и } Nu_b = C_2 (GrPr)^{1/2} (Ma^2 F)^n,$$

где α_b — коэффициент теплоотдачи цилиндра в акустическом поле, C_1, C_2, m, n — постоянные, численные значения которых приведены в таблице 1; Δt — разность температур; a — амплитуда колебаний, f — частота колебаний, F — коэффициент, учитывающий синусоидальное распределение перемещений частиц по конечному диаметру цилиндра и зависящий при $\lambda/2a < 6$ от длины волны. Ma — вибрационное число Маха, рассчитываемое по параметрам окружающей среды. Критерии Nu_b, Gr, Pr рассчитаны по средней температуре слоя. Относительное изменение коэффициента теплоотдачи для $f < 1496$ гц и $f \lambda/2a < 6,04$ оценивается по формуле:

$$\alpha_b/\alpha_0 = 2,95 d^{1/4} (\Delta t)^{1/4} (af)^{1/2},$$

где α_0 — коэффициент теплоотдачи без воздействия звука.

Авторы делают вывод, что для частот ниже 2000 гц данные по теплопередаче при условиях II, III и IV одинаковы в пределах точности эксперимента. Однако если для условий II и IV этот вывод и не вызывает сомнения, то из приведенной графической зависимости [1] следует, что коэффициент теплоотдачи изменяется в зависимости от расположения цилиндра вне пучности стоячей волны. Кроме того, в работе [1] приводится заключение о том, что при низких частотах ($f < 2$ кгц) выражение для теплоотдачи в случае колебания воздуха также справедливо и для поперечно-колеблющегося горизонтального цилиндра в невозмущенном воздухе. Последнее подтверждается тем, что при низких частотах изотермическое течение около цилиндра одинаково, как для случая колеблющегося цилиндра, так и для случая колеблющегося воздуха.

Таблица 1

f гц	$\lambda/2a$	(УЗД) _{кр} (начало образования вихрей) дб	(af) _{кр} (начало образования вихрей) см. гц	(УЗД) _{мин} для полностью раз- витого вихревого слоя дб	(af) _{мин} для пол- ностью развитого вихревого слоя см. гц	m для полностью развитого вихре- вого слоя	n для полностью развитого вихре- вого слоя	C_1	C_2
1101	8,208	140	10,90	146	21,8	0,333	0,333	0,730	14,10
1496	6,039	140	10,90	146	21,8	0,333	0,333	0,724	14,30
2116	4,268	138	8,70	145	20,6	0,293	0,333	0,706	16,10
2942	3,071	136	6,89	142	13,7	0,279	0,333	0,730	17,70
3378	2,674	136	6,89	142	13,7	0,273	0,283	0,694	10,10
4872	1,854	140	10,90	144	17,3	0,266	0,158	0,439	1,79
6120	1,476	140 (?)	10,90	142 (?)	17,3	0,260	0,100	0,335	0,76

Для частоты 1100 гц авторы [27] сфотографировали с помощью табачного дыма течение около горизонтального цилиндра в присутствии акустического поля. Обнаруженная картина течения (рис. 3) характеризуется возникновением и развитием 2-х вихрей и подобна картине, образующейся при поперечном обтекании цилиндра. Наряду с этим установлено существование критического значения звукового давления и показано, что при $\lambda/d \geq 12$ интенсивность звука, необходимая для образования вихрей, не зависит от частоты, и, во-вторых, что при неизменном УЗД размер вихрей также не зависит от частоты. Для $\lambda/d < 12$ при постоянном УЗД размеры вихрей уменьшаются.

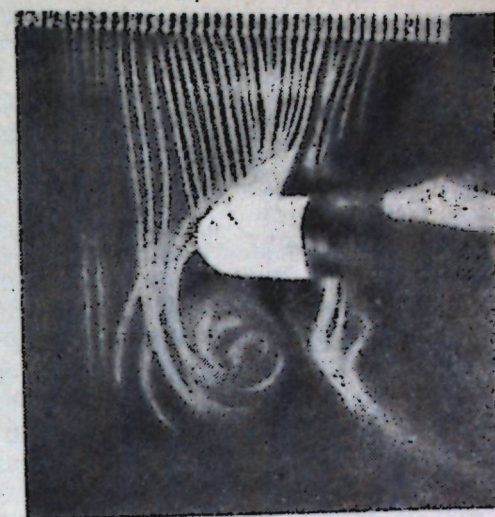


Рис. 3. Течение около нагретого цилиндра в акустическом поле.

Исследованию возможностей интенсификации теплообмена при кипении воды с помощью ультразвуковых колебаний посвящена работа А. Орнатского и В. Щербакова [17]. В качестве теплоотдающей поверхности они использовали нихромовую калиброванную проволоку диаметром 0,4 мм и длиной 45—55 мм. Проволока устанавливалась горизонтально в зоне наиболее плотного акустического потока. Интенсивность звука в воде достигала 1,5—2 вт/см². Опыты проводились при атмосферном давлении и температурах воды до 97°C.

В экспериментах определялась величина критического теплового потока при наложении ультразвукового поля и без него. На основании полученных результатов авторы пришли к выводу, что наличие ультразвуковых полей в охлаждающей среде интенсифицирует теплоотдачу.

Исследование влияния колебаний звуковой частоты на теплоотдачу при кипении провели также И. Гиббон и Г. Хоугтон [18]. Опыты проводились в стеклянном сосуде диаметром 76 мм и высотой 305 мм. В основании сосуда на резиновой мембране был укреплен тefлоновый поршень, которому сообщались колебания с частотой 20—1000 гц. Кипение воды происходило на платиновой отожженной проволоке диаметром 0,13 мм. Эксперименты проводились при непрерывной циркуляции воды через сосуд, происходившей с постоянной скоростью. Установлено, что при пузырьковом кипении интенсивность теплоотдачи сильно зависит от частоты колебаний. При частоте $f = 40—70$ гц значения коэффициента теплоотдачи возрастают вдвое; при $f = 70—100$ гц существуют два отчетливо выраженных максимума; в области $f = 100—400$ гц коэффициент теплоотдачи

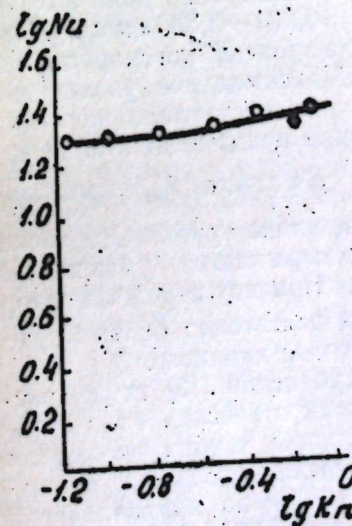


Рис. 4.

всего на 10% выше, чем при отсутствии колебаний, и наконец, при частотах $f=400-1000$ гц наблюдается постоянное увеличение коэффициента теплоотдачи, который при $f=1000$ гц на 72% выше соответствующего значения при отсутствии колебаний. При пленочном кипении при $f=80-100$ гц замечено увеличение коэффициента теплоотдачи не более чем на 15%.

б) Вынужденная конвекция

Влияние акустических колебаний конечной амплитуды на пограничный слой у стенок цилиндра, находящегося в потоке, изучалось П. Кубанским [19]. Опыты проводились на той же установке, что и исследование воздействия акустических течений на теплоотдачу цилиндра при естественной конвекции. Воздушный поток создавался в аэродинамической трубе прямоугольного сечения размерами 250×300 мм. Отметим, однако, что примененная П. Кубанским система генерации волн создавала значительную неравномерность интенсивности звукового поля, особенно в экспериментах с поперечным обтеканием.

Из визуальных наблюдений картины обтекания цилиндра можно заключить, что в том случае, когда фронт стоячей волны перпендикулярен направлению потока и параллелен оси трубки, пограничный слой претерпевает изменения, причем, по предположению автора, они значительны, если среднее значение колебательной скорости не меньше поступательной скорости потока.

Уменьшение или увеличение теплоотдачи от стенок цилиндра объясняется соответствующим расположением пучностей и узлов по отношению к местам отрыва пограничного слоя, причем с увеличением интенсивности излучаемых колебаний эффект воздействия на теплоотдачу растет. Пограничный слой претерпевает изменения и тогда, когда фронт стоячей волны перпендикулярен потоку и оси цилиндра. В этом случае на лобовой части трубки видны тени, имеющие вид «бугорков», а в кормовой части, в соответствующих местах, видны тени в виде длинных, вытянутых вдоль потока полос. Для количественной оценки влияния акустических колебаний на теплоотдачу автор [19] провел эксперименты с латунной калориметрической трубкой диаметром 1,5 см и длиной 12 см. Однако опыты были поставлены в узком интервале длин волн и интенсивностей колебаний ($\lambda=2$ см и 2,5 см; $I_0=0,031-0,336$ Вт/см²). Незначительная мощность вибратора ограничивала пределы для скорости потока ($w=1,45-1,7$ м/сек, $Re=1450-1775$). Максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи, полученное автором, составляло величину порядка 50%. Результаты опытов П. Кубанский представил в виде зависимости $Nu=f(K_n)$, где $K_n=\frac{P}{\rho w^2}$ (рис. 4). В расчетах K_n принималось звуковое давление, осредненное по всей длине трубки. До точки перелома кривая, представленная на рис. 4, выражается уравнением $Nu=23K_n^{0,06}$, за точкой перелома: $Nu=27K_n^{0,20}$. Причину перелома автор объясняет тем, что акустические течения при достаточно большой интенсивности колебаний приобретают турбулентный характер.

В условиях вынужденной конвекции П. Кубанский [13] также изучил теплоотдачу резонансной системы в поле акустических волн большой амплитуды. Объектом исследования служила трубка диаметром 2,4 см и длиной 32,5 см, в стенках которой были высверлены в шахматном порядке с шагом по образующей 0,5 см и по направляющей 0,25 см цилиндрические резонаторы диаметром 0,05 см и высотой 0,25 см. Особенностью трубки является малый диаметр устья и ультра-

звуковая (33,6 кгц) частота собственных колебаний резонаторов. Автор визуально установлено, что возникающие у резонаторов течения столь сильны, что пронизывают пограничный слой, вследствие чего неизбежно должен усиливаться теплообмен не только между стенкой трубки и пограничным слоем, но и между пограничным слоем и ядром потока. При постоянной скорости с увеличением интенсивности поля эффект интенсификации теплообмена растет, а при неизменной интенсивности поля и увеличении скорости потока — падает (при $w=1,5-3$ м/сек теплоотдача возрасла в 2 раза, при $w=23$ м/сек на 20—25%, а при $Re \geq 32000$ наложение акустического поля не приводит к интенсификации теплообмена). Однако в дальнейшем автор [29] утверждает, что при постоянной интенсивности колебаний увеличение Nu было одинаковым при любой скорости в диапазоне 4,5—20 м/сек.

А. Жукаускас, А. Шланчаускас и Э. Яронис [20] исследовали влияние ультразвуковых волн на теплоотдачу к воде и трансформаторному маслу. Скорость потока изменялась от 0,08 до 1 м/сек. Частота колебаний равнялась 27; 610 и 697 кгц. Ультразвуковое поле накладывалось на рабочую среду. Объектом исследования служила теплоотдача от цилиндрических трубок диаметром 12 и 19 мм и пластин толщиной 0,65 и 10 мм. Полученные для частоты 27 кгц результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

Экспериментальные характеристики	Скорость потока w м/сек	Перепад температур стенка-поток, °C	Напряжение на вибраторе U_s	α %
Водяной гидроконтур, канал 200×100 мм. Калор. трубка диаметром 12 мм	0,08—0,45	7—20	110—590	1,0—1,14
Масляный гидроконтур Калор. трубка диаметром 12 мм	0,09—0,3	40—60	110—750	1,0—1,05
Водяной гидроконтур, канал 200×200 мм. Пластина $\delta=0,68$ мм, $l=61$ мм	0,08—1,0	8—16	120—590	1,14—1,81
Масляный гидроконтур, канал 200×100 мм. Пластина $\delta=10$ мм, $l=50,3$ мм	0,13—0,35	30—40	270—390	1,02—1,07

Как следует из таблицы 2, максимальное увеличение теплоотдачи достигнуто, в случае тонкой пластинки и составляет 80%. На других частотах увеличение коэффициента теплоотдачи не превышало 20%.

В ходе исследований установлено, что с ростом интенсивности ультразвуковых волн теплоотдача улучшается, а с увеличением скорости потока эффект интенсификации уменьшается (рис. 5). При скоростях потока больших 1 м/сек заметного влияния ультразвука на теплоотдачу не обнаружено. В некоторых опытах измерялась скорость акустического ветра и оказалось, что увеличение теплоотдачи, вызванное ультразвуком, равно эффекту, который бы получился при увеличении скорости потока на величину скорости акустического ветра. Исходя из этого, авторы [20] пришли к выводу, что значительно экономичнее (табл. 3) и проще интенсифицировать теплообмен увеличением скорости потока, чем наложением ультразвукового поля.

Таблица 3

Коеф. теплоотдачи α $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}}$	Скорость потока w м/сек	$N_{0\text{вт}}$	$N_{e\text{вт}}$	$N'_{0\text{вт}}$	K
630	0,51	0,039	—	0,039	1
819	0,51	0,039	1,05	0,075	14,5
1 150	0,51	0,039	9,2	0,131	71
1 540	0,51	0,039	16,6	0,111	150

N_0 — мощность, затраченная на создание скорости потока;

N_e — мощность, затраченная на создание ультразвукового поля;

N'_0 — мощность, необходимая для создания такой скорости потока, при которой коэффициент теплоотдачи имел бы то же значение, что и при $w = 0,51 \text{ м/сек}$ с наложенным на поток ультразвуковым полем.

$$K = \frac{N_0 + N_e}{N'_0}$$

Согласно данным таблицы 3, для увеличения при помощи ультразвукового поля коэффициента теплоотдачи в 2,5 раза (от 630 до 1540 $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}}$) необходимо затратить в 150 раз большую мощность, чем для получения того же коэффициента теплоотдачи путем увеличения скорости потока. В дальнейшем авторы [21] исследовали возможность снижения потребляемой мощности для интенсификации теплообмена применением фокусирующих систем и импульсного режима генерирования волн. Экспериментально изучались теплоотдача трубки к воде и трансформаторному маслу при воздействии волн с частотой более 18 кгц и использование цилиндрических рефлекторов. Результаты опытов показали, что теплоотдача улучшилась в 1,5 раза по сравнению с теплоотдачей в случае применения обыкновенных излучателей. При цилиндрическом излучателе с частотой 300 кгц (калориметрическая трубка расположена внутри цилиндра) для продольного обтекания трубки трансформаторным маслом получено увеличение коэффициента теплоотдачи на 43% при скорости потока 0,5 м/сек. При импульсном воздействии для достижения увеличения теплоотдачи к трансформаторному маслу, равного увеличению при воздействии волнами в непрерывном режиме, требуется в два раза меньшая мощность.

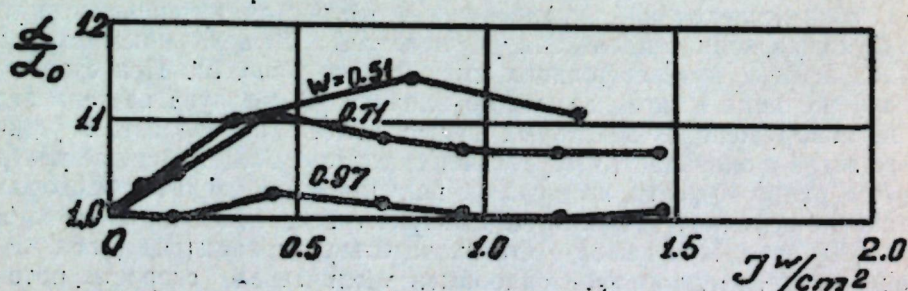


Рис. 5.

А. Третьяков и Чэн Хуа-Дин [22] изучали влияние ультразвуковых колебаний на теплопередачу от жидкости, движущейся внутри трубы, к среде, продольно омывающей трубу снаружи. В качестве рабочей среды использовались вода и масло. Частота колебаний изменялась в пределах 15—150 кгц. Опытами установлено, что на теплопередачу в поле ультразвуковых волн влияют расход и физические свойства жидкости, геометрия и физические свойства материала трубки, частота и интенсивность колебаний, причем рост интенсивности вызывает рост теплообмена.

При одностороннем звуковом поле увеличение теплоотдачи составляет 17% при $I = 3 \text{ Вт/см}^2$ и 30% при $I = 6 \text{ Вт/см}^2$. При двухстороннем поле для $I = 7 \text{ Вт/см}^2$ увеличение коэффициента теплоотдачи составляет 80%. Увеличение частоты при постоянной интенсивности приводит к уменьшению эффекта интенсификации теплообмена (при $f = 15 \text{ кгц}$ $\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1,3$, при $f = 150 \text{ кгц}$ $\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1,08$). Уменьшение коэффициента теплоотдачи с увеличением частоты авторы [22] объясняют повышением поглощения колебаний как теплообменником, так и жидкостями. Именно различной поглотительной способностью твердых тел авторы объясняют тот факт, что при работе с дюралюминиевой трубкой эффект интенсификации теплоотдачи существенно выше, чем с медной.

Воздействие колебаний звуковой частоты на теплоотдачу к воздуху, движущемуся в горизонтальной трубе, исследовалось Р. Лемлихом и Хью-Чанг-Конгом [23]. Труба с внутренним диаметром 18,9 мм и длиной 635 мм снаружи нагревалась конденсирующимся паром. Колебаний сообщались воздуху при входе в участок стабилизации с помощью электромагнитного генератора. Опыты проводились при резонансных частотах: 198, 256, 322 кгц. В случае нерезонансных частот влияние колебаний на теплообмен не обнаружено. Среднеквадратичное звуковое давление изменялось в опытах в интервале 0,88—21,5 кг/м^2 , Re — от 560 до 5900. Экспериментальные результаты обобщены следующими уравнениями:

$$(Nu/Nu_0) - 1 = 1,3 \cdot 10^{-6} (P \cdot f)^2 \text{ при } Re < 1500$$

$$(Nu/Nu_0) - 1 = 0,047 \left[\frac{(P \cdot f)^{3,08}}{Re^2} \right] \text{ при } Re > 2500,$$

где Nu — значение критерия Нуссельта при наличии колебаний,
 Nu_0 — при отсутствии колебаний,
 P — звуковое давление.

Установлено, что резонансные колебания существенно интенсифицируют теплообмен, причем увеличение резонансной частоты и амплитуды приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи. Влияние колебаний проявляется сильнее при ламинарном режиме, чем при турбулентном: увеличение коэффициента теплоотдачи составляет 51% и 27% соответственно.

Г. Робинсон, Мак-Клур III и Р. Хендрикс [24] изучали влияние ультразвуковых колебаний частотой 400 кгц на теплоотдачу от воздуха и трансформаторного масла к поверхности твердого тела. В опытах с воздухом тепло воспринималось фарфоровым стержнем прямоугольного сечения, которому сообщались колебания. Предельная температура стержня составляла 720°C. Ввиду того, что граница фарфор — воздух практически отражает всю энергию ультразвуковых волн в пограничный слой колебания не передаются, увеличения коэффициента теплоотдачи авторами не получено. В опытах с жидкостью осуществлялась передача

ча тепла от нагретого трансформаторного масла через латунный диск диаметром 76 мм и толщиной 12,7 мм, соприкасающийся с поверхностью масла к воде. Генератор колебаний помещался в трансформаторном масле. Опытами установлено, что ультразвуковые колебания интенсифицируют теплоотдачу. При $I=4,4 \text{ вт/см}^2$ перепад температур уменьшался на 22°C . При больших интенсивностях авторами отмечено уменьшение эффекта интенсификации теплообмена.

На основании проведенного анализа по интенсификации теплообмена акустическими полями можно отметить следующее:

а) принципиально возможно интенсифицировать процесс конвективного теплообмена с помощью акустических колебаний;

б) экспериментальные результаты для вынужденной конвекции разноресивы. Увеличение теплоотдачи, полученное различными авторами, колеблется от 10 до 80%;

в) вызываемое акустическими колебаниями увеличение теплоотдачи в условиях свободной конвекции достигает 200—300%;

г) наложение акустического поля на рабочую среду увеличивает коэффициент теплоотдачи при скоростях потока $w < 1 \text{ м/сек}$;

д) с экономической точки зрения эффективнее для увеличения коэффициента теплоотдачи гладких поверхностей повышать скорость потока, чем накладывать акустические колебания.

В заключение отметим, что при наложении колебаний как на теплообменную поверхность, так и на рабочую среду, в последней возникают установившиеся акустические течения, которые накладываются на периодическое движение. При этом, если колебания не настолько интенсивны, чтобы возбудить акустические течения и изменить характер пограничного слоя, их влияние на теплопередачу пренебрежимо мало.

В настоящее время математическая задача, связанная с колебаниями и теплопередачей, приводит к чрезвычайно сложным уравнениям, по существу неразрешимым. С другой стороны, сейчас ощущается недостаток опытных данных, на основе которых можно было бы выявить физику процесса и упростить соответствующие уравнения. Поэтому наиболее рациональным путем при изучении влияния колебаний на конвективную теплоотдачу явится проведение экспериментальных исследований, тем более, что теоретические расчеты пока носят предположительный характер.

В дальнейшем эксперименты с телами простой геометрии (гладкая труба, пластина) необходимы в основном для более детального выявления физики явления, так как эффект интенсификации теплопередачи достаточно изучен. Что же касается влияния колебаний на теплопередачу в компактных теплообменниках [28], то здесь имеется существенный пробел. В этом отношении большой интерес представляет исследование воздействия колебаний, особенно низкой частоты, на теплоотдачу ребренных поверхностей. Предварительные опыты, проведенные в этом направлении с участием авторов, дали обнадеживающие результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. M. Fand, I. Kaye. The influence of sound on free convection from a horizontal cylinder. "Trans. ASME(c)", 1961, vol. 83, № 2.
2. В. М. Бузник и К. А. Везломцев. Некоторые результаты обобщения экспериментальных данных по интенсификации процессов конвективного теплообмена. «Изв. ВУЗов», «Энергетика», 1959, № 8.
3. П. Н. Кубанский. Применение теории акустических течений у нагретых твердых тел к частным случаям. «Акустический журнал», т. 7, № 2, 1961.
4. П. Н. Кубанский. Интенсификация теплообмена акустическими течениями при вынужденной конвекции. «Акустический журнал», т. 8, вып. 1, 1962.
5. П. Н. Кубанский. Осесимметричное акустическое течение у стенок цилиндра. ЖТФ, 1957, 27, № 6.
6. Н. В. Калашиников и В. Н. Черникин. Теплоотдача вибрирующих подогревателей. «Теплоэнергетика», 1958, № 10.
7. В. М. Бузник, А. Я. Ипатенко, В. Ю. Ролинский. Теплообмен вибрирующего цилиндра в вынужденном потоке газа. Труды Николаевского корабл. ин-та, вып. XV, 1958.
8. В. Ф. Коваленко. Опытное исследование влияния вибрации на теплоотдачу при кипении. «Теплоэнергетика», 1958, № 2.
9. E. Shine Andrew. The effect of transverse vibrations on the heat — transfer rate from a heated vertical plate in free convection. "Paper. Amer. Soc. Mech. Engrs." 1959, NHT-27.
10. I. A. Scanlan. "Effects of normal surface vibration on laminar forced convective heat transfer. "Industr. and Engng. Chem." 1958, 50, № 10.
11. R. Lemlich. "Vibration and pulsation boost heat transfer" "Chem. Engng." 1961, 68, № 10.
12. П. Н. Кубанский. Течения у нагретого твердого тела в стоячей акустической волне. ЖТФ, 1952, т. 22, вып. 4.
13. П. Н. Кубанский. Поведение резонансной системы в поле акустических волн большой амплитуды. ЖТФ, т. 22, вып. 9, 1952.
14. Э. П. Яронис, А. А. Шланчаускас, А. А. Жукаускас. Влияние ультразвуковых волн на теплоотдачу тел в жидкостях. Сб. Применение ультразвука к исследованию вещества. Вып. 14, М., 1961.
15. P. Holman, P. Mott-Smith Tipton. The effects of constant-pressure sound field on free-convection heat transfer from a horizontal cylinder. "J. Aero-Space Sci.", 1959, № 3.
16. Walker C. T., Adams C. E. Thermal effects of acoustic streaming near a cylindrical obstacle. "J. Acoust. Soc. America", 1959, 31, № 6.
17. А. П. Орнатский, В. К. Щербаков. Интенсификация теплообмена в области кипения с помощью ультразвука. «Теплоэнергетика», 1959, № 1.
18. Gibbons I. H., Houghton G. Effects of sonic vibrations on boiling. "Chem. Engng Sci.", 1961, 15, № 1—2.
19. П. Н. Кубанский. Влияние акустических колебаний конечной амплитуды на пограничный слой. ЖТФ, 1952, т. 22, вып. 4.
20. A. Žukauskas, A. Šlančiauskas ir E. Jaronis. Ultragarso poveikis silumos atidavimui priverstines konvekcijos atveiu. "Tr. AN Lit. SSR". Серия БЗ(23), 1960 г.
21. Исследование влияния импульсного режима при интенсификации теплоотдачи упругими волнами. Отчет Института энергетики и электротехники АН Лит. ССР, 1960.
22. А. П. Третьяков и Чэн-Хуа-Дин. Влияние ультразвука на интенсификацию теплообмена. «Теплоэнергетика», 1960, № 11.
23. Lemlich R., Hwu-Chung-Kong. The effect of acoustic vibration on forced convective heat transfer. A. J. Ch. E. 1961, 7, № 1.
24. A. C. Robinson, M. Clure III, R. Hendricks. Effects of ultrasonics on heat transfer by convection. "Amer.-Ceram. Soc. Bull", 1958, 37, № 9.
25. М. А. Мухеев. Основы теплопередачи ГЭИ. 1956 г.
26. R. C. Martinelli, L. M. K. Boelter. The effect of vibration upon the free convection from a horizontal tube. Proceedings fifth International Congress of applied mechanics, 1938.
27. R. M. Fand, J. Kaye. Acoustic streaming near a heated cylinder. "J. Acoustical Society of America", vol. 32 1960.
28. В. М. Кэйс, А. Л. Лондон. Компактные теплообменники. ГЭИ, 1962.
29. П. Н. Кубанский. Интенсификация теплообмена ультразвуком. «Теплоэнергетика», 1962, № 11.

М. К. БОЛОГА, Г. М. ЛЕВИН, Ю. Н. ПАУКОВ

ИНФЛУЕНЦА ОСЧИЛАЦИИЛОР АСУПРА СКИМБУЛУИ КОНВЕКТИВ ДЕ КЭЛДУРЭ

Резумат

Ын артикол се анализязэ старя актуалэ а черчетэрилор ын домениул инфлуенцей осчилациилор асупра скимбулуй конвектив де кэлдурэ.

Се фаче о апречиере женералэ а ачестей проблеме ши се експун резултателе обцинуте ын лукрэриле теоретиче ши експериментале.

С'а констатат, кэ осчилацииле интенсификэ скимбул де кэлдурэ ын-тр'о мэсурэ маре ши май алес ын казул фреквенцей инфрасоноре.

Соноризаря медиулуй ликид сау газос ку осцилаций де фреквенце ултрасонорэ нечеситэ келтуель марь де енержие. Се пречизязэ черче-тэриле ын домениул интенсификэрий скимбулуй конвектив де кэлдурэ ку ажуторул осчилациилор.

К. Я. КРАСНОЛОБ, Б. А. ОРГИАН

ПОЛЯРОГРАФ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПО КАЧЕСТВЕННЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

В последнее время при проведении тех или иных технологических процессов в промышленности определилась тенденция применения качественного контроля.

Как показывает обзор ряда авторов [1—5], [15—19], автоматический контроль по качественным показателям не нашел еще широкого распространения в управлении технологическим процессом, несмотря на то, что в настоящее время уже создано большое число приборов аналитического контроля. Сюда относятся автоматические газоанализаторы, основанные на измерении теплопроводности, магнитной восприимчивости, степени поглощения ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной части спектра; масс — спектрометрические, хроматографические, электрохимические и другие типы газоанализаторов.

Разработано большое число автоматических анализаторов жидкости: анализаторы, основанные на измерении электропроводности (низкочастотные и высокочастотные); диэлкометры (приборы, измеряющие диэлектрическую проницаемость жидкостей); титраторы, использующие метод термометрического и потенциометрического титрования; рН-метры; радиоактивные плотнометры, а также радиоактивные анализаторы двух- и трехкомпонентных жидкостей; анализаторы, измеряющие состав жидкости по степени поглощения инфракрасной части спектра; рефрактометры и поляриметры; анализаторы жидкости, основанные на измерении вязкости; приборы для определения содержания нефтепродуктов в сточных водах, использующие явление люминесценции и другие.

Одним из перспективных методов анализа является метод полярографии, который по своим аналитическим возможностям не уступает перечисленным методам анализа. Полярографический метод анализа основан на расшифровке вольтамперных кривых, получаемых при электролизе исследуемых растворов. Для снятия таких кривых раствор, содержащий анализируемое вещество, помещают в электролитическую ячейку (электролизер) с двумя электродами. Одним электродом (как правило, анодом) служит слой ртути на дне ячейки. Другим электродом, катодом, являются капельки ртути, вытекающие из тонкого стеклянного капилляра. К электродам ячейки подведено питание от внешнего источника, как это показано на рис. 1. Если устанавливать различные значения напряжения на ячейке и измерять средний ток, проходящий через нее, то по этим данным можно построить статическую характеристику в прямоугольной системе координат напряжение — ток.

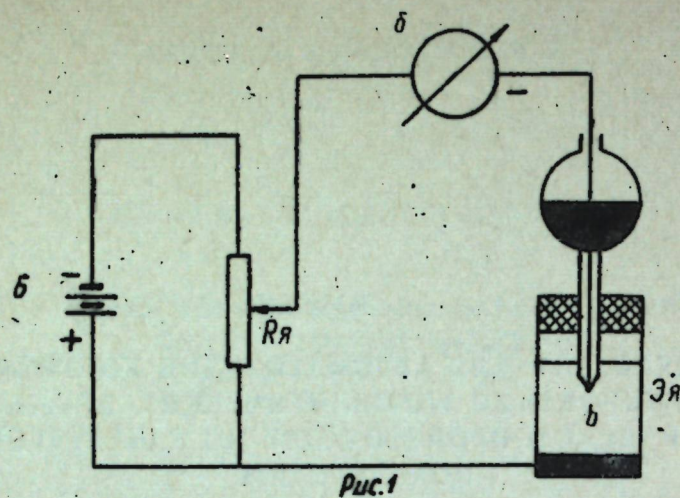


Рис. 1. Схема полярографической установки.

Она имеет особую форму и называется полярограммой. Полярограмма состоит из трех характерных участков: остаточного тока, волны и предельного тока (рис. 2).

Полярограмма содержит в себе информацию о количестве и природе вещества (то есть определяет наличие того или иного компонента, находящегося в растворе). Установлено, что разность между предельным и остаточным током пропорциональна концентрации вещества и потому она является мерой количественного анализа. Установлено также, что напряжение, соответствующее средней точке волны полярограммы (рис. 2, точка А), характеризует природу вещества. В работе Цфасмана [9] сделана попытка классифицировать существующие полярографические методы анализа, подразделяя их по типу поляризуемого электрода, по признакам питания ячейки и по виду изучаемых характеристик.

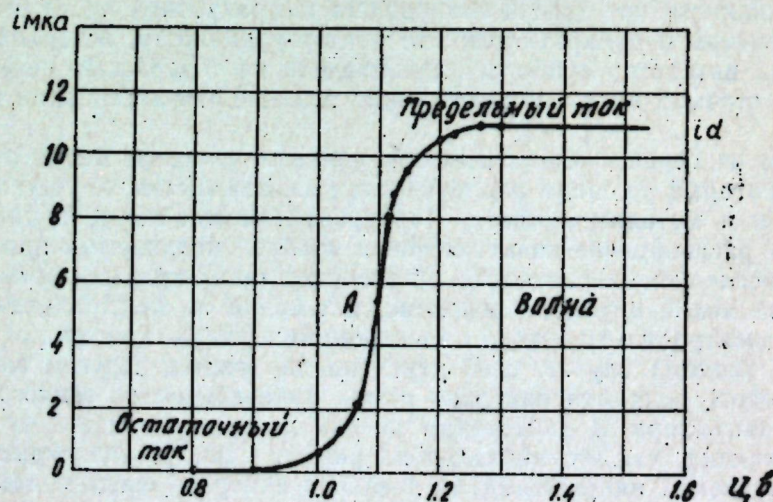


Рис. 2. Типовая полярограмма.

С интересующей нас точки зрения мы подразделяем существующие полярографы еще на две группы:

а) полярографы, которые по своим конструктивным и схемным особенностям не могут быть приспособлены для автоматизации контроля и управления, и

б) полярографы, могущие быть приспособленными для этих целей. Остановимся более подробно на некоторых из них:

ПОЛЯРОГРАФЫ ПЕРВОЙ ГРУППЫ. В настоящее время выпускается различными фирмами и заводами большая группа полярографов, так называемых «автоматических». Эту группу приборов объединяет, по сути, принцип получения информации-полярограммы, которая действительно воспроизводится без какого-либо вмешательства извне, но на этом автоматический цикл заканчивается, и для получения дальнейшей информации требуется вмешательство оператора. Полярографы, работающие по такому принципу, не могут быть приспособлены для непрерывного автоматического контроля. К полярографам этой группы относятся: полярограф типа ПА-2, выпускаемый Ленинградским заводом «Геологоразведка», модель 1962 г.; полярограф типа ПЭ-312, разработанный А. С. Беневольским и С. Б. Цфасманом [9]; полярограф фирмы Атлас (ФРГ); полярографы фирмы Сарджент и фирмы Лидс и Нортруп (США); полярограф фирмы «Мервин-Инструмент», разработанный Баркером и Дженкинсом; несколько моделей фирмы Янагимото (Япония) и др.

ПОЛЯРОГРАФЫ ВТОРОЙ ГРУППЫ. В эту группу входят полярографы, которые приспособлены или могут быть приспособлены для непрерывного автоматического контроля и управления.

В непрерывной автоматической полярографии могут применяться два вида регистрации результатов анализа: периодическая запись полной полярограммы (на диаграммной бумаге) и запись предельного тока во времени при заданном потенциале. Хотя первый тип применяется реже, однако имеет ряд преимуществ — устраняются помехи за счет изменения сопротивления ячейки и потенциала электрода сравнения, можно фиксировать появление новых волн и, наконец, исключаются изменения концентраций раствора, связанные с непрерывным прохождением больших токов. Однако циклическое снятие полярограммы требует сложной конструкции полярографов.

К полярографам этой группы можно отнести: полярограф системы Прохазки [20]; полярограф, разработанный Валентой [21]; полярограф Бертрама [22] и др.

В лаборатории автоматизации производственных процессов Института энергетики и автоматики в творческом содружестве с сотрудниками Института химии АН МССР был разработан автоматический полярограф, позволяющий использовать его для непрерывного контроля и управления технологическим процессом в некоторых химических производствах.

Прибор должен удовлетворять следующим основным требованиям:

а) осуществлять регистрацию результатов анализа контролируемых компонентов;

б) обеспечивать визуальный контроль состояния того или иного компонента;

в) давать возможность изменять пределы напряжения поляризации во всем диапазоне работы прибора;

г) давать возможность изменять (в больших интервалах) время нарастания потенциала поляризации;

д) иметь устройство, отключающее измерительную часть прибора по окончании цикла съемки информации. Повторение цикла должно быть произведено по истечении выдержки времени, устанавливаемой перед съемкой;

е) иметь ручной контроль работы прибора;

ж) управление технологическим процессом должно производиться позиционными или изодромными регуляторами;

з) прибор должен быть прост в обращении и надежен в эксплуатации в условиях производства.

1. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА.

Полярограф состоит из двух блоков: собственно полярографа и программного устройства. Прибор состоит из следующих основных элементов:

- а) узла питания,
- б) реле времени больших интервалов выдержек (РВБИ),
- в) реле времени малых интервалов выдержек (РВМИ),
- г) исполнительной части программного устройства и делителя напряжения на шаговых искателях,
- д) выходного балансового каскада,
- е) электронного потенциометра.

Напряжение на ячейку подается скачками, через 0,01 в с делителя напряжения, собранного на контактных полях шаговых искателей Шц1/Шц2/IV . Интервалы времени между переключениями (скорость возрастания напряжения) в пределах 1–60 сек выбираются при помощи реле РВМИ, собранного на лампе тлеющего разряда L_2 , и регулируются потенциометром R_3 [10].

По окончании съемки полярограммы (окончания цикла) прибор ав-

томатически отключается на период, заданный реле времени РВБИ от 1 до 45 мин, собранного на лампе Л₁, после чего прибор вновь включается и цикл повторяется.

Исполнительная часть программного устройства собрана на полях шаговых искателей и работает по устанавливаемой программе.

Выходной каскад представляет собой обычный балансный катодный повторитель на лампе L_3 .

2. РАБОТА ПРИБОРА (см. рис. 1)

Прибор может работать в ручном и автоматическом режиме в зависимости от положения тумблера Т₁: «Ручной», «Автомат». В первом случае изменение потенциала производится кнопками К_{н1} и К_{н2}, переключающими соответствующие шаговые искатели. Тем самым осуществляется контроль работы прибора.

При работе в автоматическом режиме питание подается на реле времени РВМИ тумблером T_1 , который замыкает одновременно цепь: нормально замкнутые (н. з.) контакты реле PB_2 , обмотка шагового искателя $Ш_{и1}$. Таким образом, обмотка шагового искателя $Ш_{и1}$ будет периодически возбуждаться, передвигая контактные ламели.

Цикл искателя ШИ_1 состоит из 10-ти импульсов. Десятый импульс возвращает искатель в исходное положение и одновременно переключает ШИ_2 на одно контактное деление, соответствующее 0,1 вольт.

Пределы изменения потенциала устанавливаются переключателями Π_1 и Π_2 . Первый соответствует конечному потенциалу поляризации, второй — начальному. Происходит это следующим образом: при достижении установленного конечного потенциала поляризации замыкается цепь (Π_1 , Шу_2 , P_3 (н. з.), обмотка реле P_2), при этом реле остается вклю-

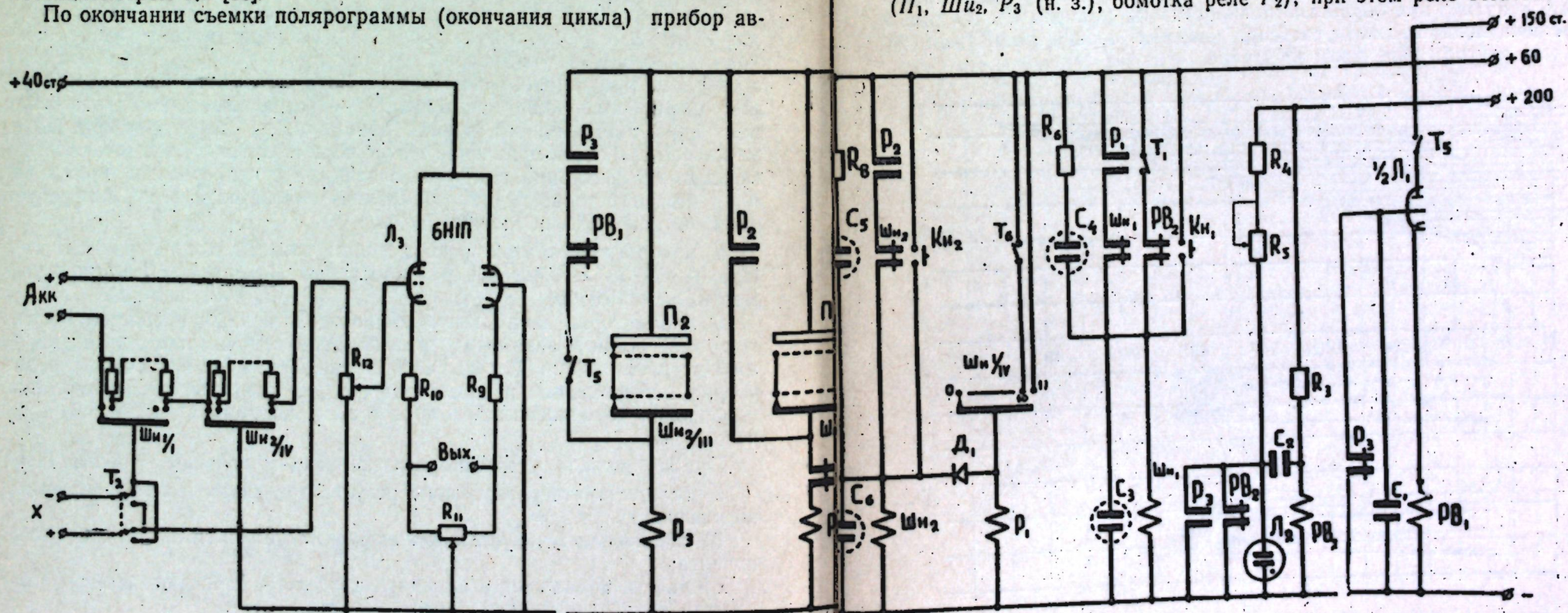


Рис. 3. Принципиальная схема полярографа.

ченным с помощью нормально открытых (н. о.) блок-контактов реле P_2 . Одновременно замыкается цепь «самохода» искателя: P_2 (н. о.), $Ши_2$ (н. з.), обмотка искателя $Ши_2$. Цепь самохода остается включенной до достижения начального потенциала поляризации, устанавливаемого переключателем P_2 . По достижении начального потенциала поляризации, устанавливаемого переключателем P_2 , замыкается цепь: P_2 , $Ши_2$ и обмотка реле P_3 . Реле P_3 срабатывает, разрывая цепь питания реле P_2 и шаговой искатель останавливается. Цикл съемки закончен.

При включенном тумблере (как указано на схеме) следующий цикл повторится по истечении выдержки времени, установленной на реле времени РВВИ. При включенном тумблере цикл начнет повторяться сразу.

Для сопряжения выхода полярнографа с электронным потенциометром введен балансный каскад, собранный на двойном триоде. Через сопротивления в катодах лампы подается отрицательное смещение — 75 в, что позволяет работать на линейном участке характеристики лампы. Между катодами лампы включены два последовательно соединенных сопротивления (на схеме они не показаны), с одного из них снимается напряжение и подается на электронный потенциометр типа ЭПД или других, что дает возможность обеспечить запись и регулирование измеряемого параметра; второе переменное сопротивление служит для регулировки пределов измерений [12—14].

Для удобства чтения полярограмм при автоматическом контроле в приборе предусмотрен отметчик, включаемый тумблером T_6 . Отметчик воспроизводит на полярограмме отметки через каждые 0,1 вольта; так как напряжение на делителе при этом падает до нуля, то начальные точки отметок фиксируют «дрейф» нуля прибора и дают возможность вводить поправку при обработке полярограммы (см. рис. 2). На рис. 2 изображена полярограмма раствора кадмия концентрации $2 \cdot 10^{-4} M$, снятая на ртутном капельном электроде.

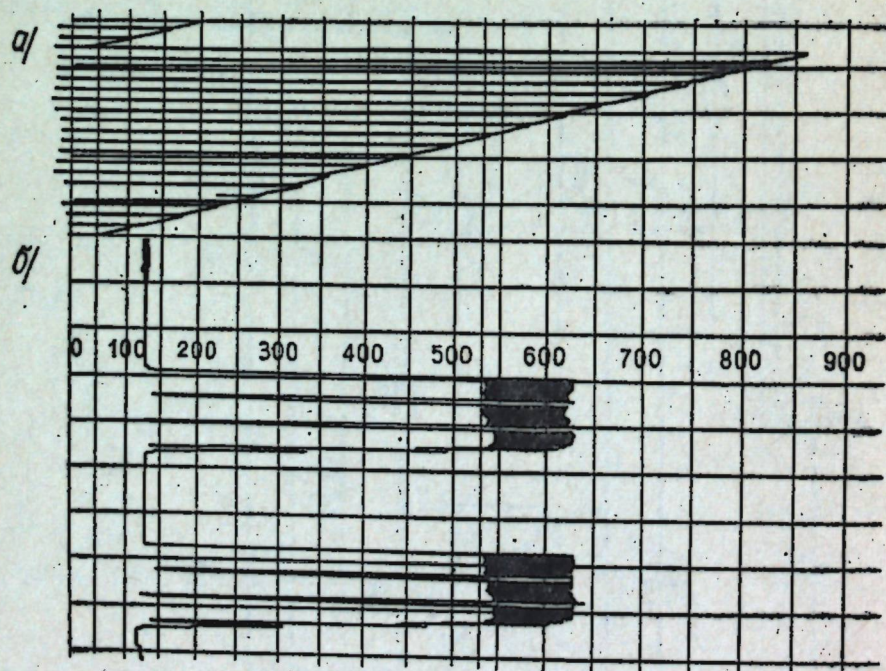


Рис. 4: а) характер изменения напряжения, подаваемого на ячейку; б) вид полярограммы.

В качестве датчика может служить любой электролизер, обеспечивающий непрерывное снятие информации с исследуемого раствора [6, 9].

В настоящее время изучается возможность осуществления прибора на бесконтактных элементах, что, безусловно, повысит надежность и срок работы прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Шумиловский, Л. В. Мальцер, Мэн Чжи-чжун и др. Об автоматическом контроле состава многокомпонентных смесей. Труды Первого международного конгресса Международной федерации по автоматическому управлению, т. 4, М., Изд-во АН СССР, 1960.
2. Д. А. Пейшнт. Автоматизация отбора и химического анализа проб. Труды Первого международного конгресса Международной федерации по автоматическому управлению, т. 4, М., Изд-во АН СССР, 1960.
3. М. А. Векслер, Н. Н. Тимошенко. Автоматизация производства и аналитический контроль. «Заводская лаборатория», 1962, XXVIII, т. I.
4. В. М. Добкин и др. Автоматизация периодических производств в химической промышленности. «Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева», 1961, VI, 5.
5. В. Н. Трейер, В. И. Обухов. К вопросу о получении информации о течении химических процессов при их автоматизации. Доклады АН БССР, 1961, 5, № 12.
6. Я. И. Турьян. Полярграфический электролизер с твердым электродом для непрерывного автоматического контроля. «Заводская лаборатория», 1962, 28, № 1.
7. Б. А. Оргиян, К. Я. Краснолоб. Полуавтоматический полярограф. «Известия АН МССР», 1961, № 12.
8. Ю. К. Делимарский, А. В. Горыдский. Электронные процессы и методы исследования в полярграфии. Изд-во АН УССР. Киев, 1960.
9. С. Б. Цфасман. Электронные полярграфы, М., Металлургиядат, 1960.
10. Г. В. Дружинин. Реле времени. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
11. Справочник по элементам автоматики. Под ред. Б. С. Соскова, М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
12. Н. Я. Парлашкевич, Ю. М. Лужков, В. В. Рубинштейн, И. С. Волчок. Семинар механизации и автоматизации производственных процессов в химической промышленности (конспекты докладов). Московский Дом научно-технической пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского. Сб. 3.
13. Н. Р. Парлашкевич и др. Автоматизация производства феноло-формальдегидных смол. «Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева», 1961, 6, № 5.
14. Б. А. Оргиян, К. Я. Краснолоб. Новый полуавтоматический полярограф. Материалы второго совещания по полярграфии. Изд-во Казанского университета, 1962.
15. W. F. Loranger, R. G. Edholm. Application of X-ray emission to on-line control, «Mining Congr. J.», 1961, 47, № 10.
16. Differential Auto Analyzer. «Amer. Dyestuff Reporter», 1961, 50, № 17.
17. R. C. Chery. Automatic process monitoring by utilizing electrical properties of the process material. «Ann. N. Y. Acad. Sci.», 1961, 91, № 4.
18. H. A. Stein. Electronic system links 100 analyzers. «Canad. Chem. Process», 1961, 45, № 4.
19. R. J. Carter. A chromatographic closed-loop control system. «Control», 1961, 4, № 41.
20. R. Prochazka. «Chim. ind.», 1953, 29, 281.
21. P. Valenta. «Coll. Czech. Chem. Comm.», 1956, 21, 498.
22. H. W. Bertram, M. W. Lerner, G. J. Petretic, E. S. Roszkowski, C. J. Rodden. «Anal. Chem.», 1958, 354.

К. Я. КРАСНОЛОБ, Б. А. ОРГИЯН

ПОЛАРОГРАФ ПЕНТРУ АУТОМАТИЗАРЯ КОНТРОЛУЛУИ ШИ РЕГУЛАРЯ ПРОЧЕСЕЛОР ТЕХНОЛОЖИЧЕ ЫН ИНДУСТРИЯ КИМИКЭ ДУПЭ ИНДИЧИИЛЕ ДЕ КАЛИТАТЕ

Резумат

Се пропуне ун поларограф пентру контролул инконтинуу ши дири-
жаря прочеселор де продукцие ын индустрия кимикэ конформ дателор
калитативе.

Ын лукраре се экзаминазэ тендинцеле женерале, скицате ын кон-
струкция апарателор модерне, ын легэтурэ ку препараря анализатори-
лор пентру контролул инконтинуу ши регуларя прочеселор технологииче.

Лукраря поате фи де фолос лукрэторилор, каре се окупэ ку пробле-
ма аутоматизэрий прочеселор де продукцие.

Ю. А. ЩЕГЛОВ, Л. Г. ГОЛЬДЕНБЕРГ, А. А. ФАКТОРОВИЧ, К. Я. КРАСНОЛОБ

АВТОМАТИЗАЦИЯ УЗЛОВ ПРИЕМА И ПЕРЕКАЧКИ ДРОБЛЕННОЙ МАССЫ ТОМАТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ТОМАТОВ

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация технологических линий по переработке томатов в
настоящее время является насущной проблемой. Это определяется сле-
дующими обстоятельствами:

1. Производство по переработке томатов является одним из глав-
ных среди пищевых производств, особенно в Молдавии.

2. Существует целый ряд специфических трудностей при создании
простых и надежных элементов систем автоматики для производств
подобного рода (повышенная влажность окружающей среды, химиче-
ская агрессивность и неоднородность контролируемой среды и т. д.).

3. Головные участки технологического оборудования по переработке
томатов, эксплуатируемые в настоящее время на пищевых предприя-
тиях, лишены какой-либо автоматизации, что приводит к большим по-
терям полуфабриката, к увеличению обслуживающего персонала и к
неравномерности работы технологического оборудования.

При попытках автоматизации как отдельных узлов, так и техноло-
гической линии в целом наибольшие трудности возникают при разра-
ботке систем автоматизации для узлов приема и перекачки дробленой
массы томатов. В то же время эти узлы, более чем остальные, нужда-
ются в автоматическом управлении, ибо в них происходят потери цен-
ного полуфабриката в результате переливов. Необходимость наблюде-
ния за работой этих узлов приводит к увеличению обслуживающего пер-
сонала.

Целесообразность разработки системы автоматизации для узлов
приема и перекачки дробленой массы томатов определяется и тем,
что эти узлы являются составной частью всех линий по переработке то-
матов, различающихся по конструктивным и технологическим призна-
кам.

Анализ состояния вопроса показывает, что система автоматики для
узлов приема и перекачки дробленой массы томатов в настоящее вре-
мя в промышленности не эксплуатируется.

Целью работ, проведенных в лаборатории автоматизации производ-
ственных процессов института энергетики и автоматики, явилось созда-
ние и внедрение надежной и простой системы автоматики.

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ

Основным вопросом, возникающим при разработке системы автома-
тизации узлов приема и перекачки дробленой массы томатов, является
вопрос создания надежного регулятора уровня томатной массы в слив-

ных и промежуточных емкостях. Относительная трудность задачи при разработке регуляторов уровней состояла в том, что до сего времени применительно к томатной массе не были разработаны надежные чувствительные элементы — датчики.

Датчикам в данном случае приходится работать в условиях повышенной влажности, в агрессивной и неоднородной среде. Кроме того, часть датчиков должна встраиваться внутри бака с томатной массой. Это определяется тем, что использование устройств с прозрачными трубками (смотровыми), устанавливаемыми с наружной стороны (основанных на принципе сообщающихся сосудов), оказывается неприемлемым, так как из-за неоднородности томатной массы и наличия в ней твердой фракции уровень массы в баке и в смотровой трубке не соответствует друг другу.

Первое направление, по которому проводились работы, состояло в создании фотоэлектронного датчика уровней, находящегося внутри бака, в котором контролируется уровень. Образцы таких датчиков были разработаны, исследованы и испытаны в производственных условиях [1]. Но в процессе испытания и наладки от фотоэлектронных датчиков пришлось отказаться по следующим причинам:

во-первых, значительные трудности возникли из-за необходимости выполнения абсолютно герметичной системы датчиков, так как установка помещалась внутрь бака с томатной массой;

во-вторых, необходима высокая изоляция всех электрических цепей, так как рабочие цепи фотосопротивлений, которые использовались в фотоэлектронных датчиках, являются высокоомными — соразмерными с сопротивлением изоляции цепей. В условиях повышенной влажности воздуха выдержать высокую изоляцию цепей практически весьма трудно, и, вследствие чего, добиться четкой и надежной работы фотоэлектронного датчика и всего регулятора в целом оказалось невозможным.

Второе направление заключалось в использовании свойства электропроводности, которой обладает томатная масса. По своему составу томатная масса представляет механическую смесь твердой и жидкой фракций. Химически томатная масса является средой с кислой реакцией и обладает электропроводностью.

Конструкция датчика выполнена в виде электродов из нержавеющей стали толщиной 3 мм, укрепленных на изоляционной плате (рис. 1).

К электродам подводилось относительно высокое напряжение — 25 в, что допустимо по условиям техники безопасности, а электроды включались непосредственно в цепь исполнительного реле, минуя промежуточные усилители сигналов.

За счет этого резко увеличилось отношение $\frac{\text{полезный сигнал}}{\text{помехи}}$, то есть значительно поднята

помехоустойчивость чувствительного элемента, что привело к полному устранению ложных срабатываний, которые имели место при подводе к электродам низкого напряжения (нескольких вольт) и использовании промежуточных устройств, когда ложные срабатывания возникали ввиду большой влажности воздуха.

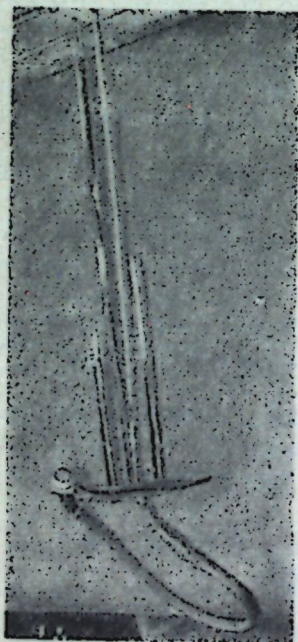


Рис. 1. Общий вид четырех-электродного датчика.

В качестве исполнительного реле использовались два типа промышленных реле МРЦ (паспорт № 10.171.8002, обмоточные данные 0,07 — 9000—1200) и РПН (паспорт Р 10.1.037, обмоточные данные 1000 — 13500—0,12).

Были сняты вольтамперные характеристики $I_{\text{дат.}} = (U_{\text{дат.}})$ и $I_{\text{цепи}} = f(U_{\text{цепи}})$. Зависимость тока от приложенного напряжения в обоих случаях линейная.

Проводились также исследования с целью выявления зависимости электропроводности межэлектродного промежутка от площади соприкосновения электродов с томатной массой. Выявлено, что увеличение площади на 8 см² приводит к увеличению тока на 1 ма.

Если в качестве исполнительного реле включено реле РПН, то оно срабатывает при токе 9 ма (что соответствует напряжению 12 в), если же включено реле МРЦ, то его ток срабатывания составляет 14 ма (что соответствует напряжению 20 в). При напряжении питания, равном 25 в, в обоих случаях имеется достаточный запас по параметрам срабатывания, что обеспечивает надежное включение аппаратуры.

После исследования приемлемой конструкции датчика была разработана вся схема регуляторов уровней для системы автоматизации узлов приема и перекачки дробленой массы томатов.

ОСНОВНЫЕ СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ

Система автоматизации узлов приема и перекачки дробленой массы томатов обеспечивает следующие функции:

а) автоматическое поддержание уровней томатной массы в баках в заданных пределах;

б) автоматическое отключение системы при достижении предельного уровня;

в) световую сигнализацию о нормальной работе системы;

г) звуковую сигнализацию о пуске системы в работу.

Автоматическое поддержание уровней в заданных пределах осуществляется средствами релейно-контактной автоматики с применением электродных датчиков (рис. 2).

Первоначальный запуск системы в работу производится вручную нажатием на кнопку 4КУ или 5КУ. Предусмотрено также ручное отключение системы в случае необходимости (нажатием на кнопку 1КУ, 2КУ, 3КУ).

При пуске системы в работу включаются двигатели насосов. Уровень томатной массы в баках начинает повышаться. При достижении пульпы концов электродов ЗДУ вследствие электропроводности пульпы замыкается электрическая цепь и срабатывает реле 1РУН.

Нормально открытые (н. о.) контакты 1РУН (2—36) включают реле 5РП. Двигатели насосов при этом не отключаются. Уровень пульпы в баке продолжает повышаться. При достижении пульпы концов электродов 2ДУ срабатывает реле 1РУВ.

Включается реле 4РП, которое размыканием своих нормально закрытых (н. з.) контактов 4РП(10—12) отключает двигатель от сети. Во время дальнейшей работы возможны два варианта:

а) если расход пульпы из бака меньше притока, обеспечиваемого работающими насосами, то уровень пульпы продолжает повышаться, достигая предельно допустимого уровня. Включаются реле 1РУП и 3РП, (н. з.) контакты 3РП(4—6) отключают все двигатели от сети. Подача пульпы в бак прекращается;

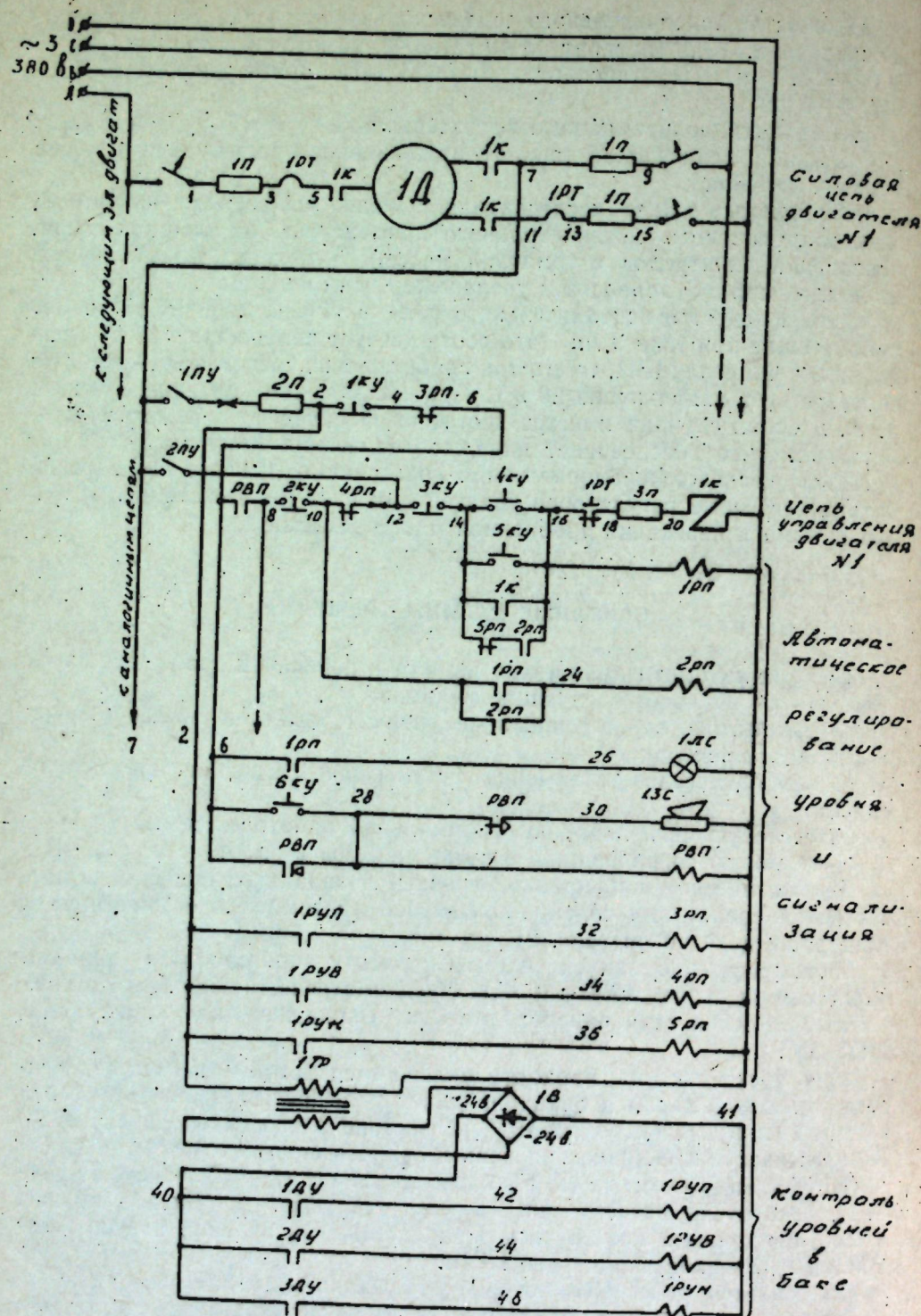


Рис. 2. Принципиальная схема автоматического управления.

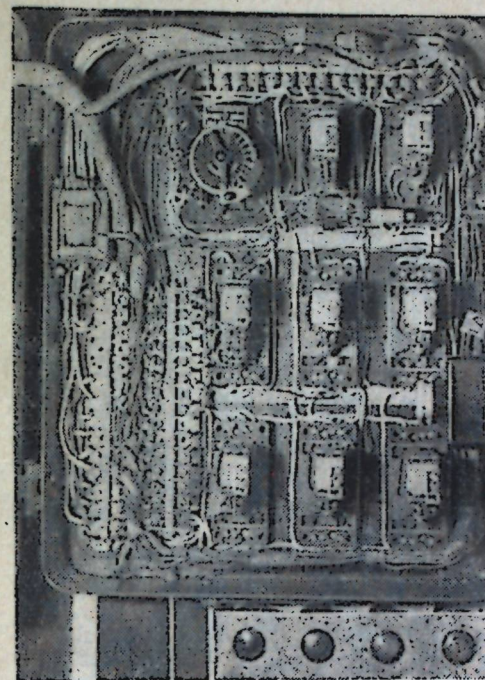


Рис. 3. Общий вид шкафа управления
(крышка откинута).

б) если расход пульпы из бака больше притока, то уровень пульпы в баке начинает падать. После того, как уровень опустится ниже отметки нижнего уровня, реле 5РП отключится, пусковая кнопка оказывается зашунтированной контактами 5РП (14—22) и 2РП (22—16). Двигатель 1Д включается в работу. Цикл повторяется аналогично описанному выше.

О работе двигателей сигнализируют сигнальные лампы (например, о работе двигателя 1Д сигнализирует лампа 1ЛС).

Первоначальный запуск двигателей в работу невозможен, пока не будет нажата кнопка 6КУ (6—28) и звуковой сигнализацией (сиреной 13С) обслуживающий персонал не будет предупрежден о предстоящем включении системы в работу.

Защита цепей осуществляется плавкими предохранителями и тепловыми реле.

Общий вид шкафа управления представлен на рис. 3.

Описанная система была установлена на действующей технологической линии Тираспольского консервного завода им. 1 Мая и в течении производственного сезона 1962 г. работала удовлетворительно.

Выводы

1. Разработанная и исследованная конструкция электродных датчиков оказалась приемлемой, так как показала удовлетворительные результаты в работе не только в лабораторных условиях, но и в производственных.
2. Позиционное регулирование уровней предложенными средствами релейно-контакторной автоматики с применением электродных датчиков производится удовлетворительно.
3. Разработанная система автоматизации обеспечивает как надежный контроль уровней, так и надежную работу технологического оборудования, которым управляет система автоматики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Чалый, Б. М. Бутенко. Автоматизация линий по переработке томатов. «Известия Академии наук МССР», 1962, № 9.
2. И. Е. Декабрун, Н. Р. Тедер. Справочник по элементам автоматики и телемеханики. Реле времени, программные устройства, реле счёта, искатели, М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
3. Справочник по элементам автоматики, под редакцией Б. С. Сотскова. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.

Ю. А. ШЧЕГЛОВ, Л. Г. ГОЛДЕНБЕРГ, А. А. ФАКТОРОВИЧ, К. Я. КРАСНОЛОБ

АУТОМАТИЗАЦИЯ НОДУРИЛОР ДЕ ПРИМИРЕ ШИ ПОМПАРЕ
А МАСЕЛОР ФЭРЫМИЦАТЕ ДЕ ТОМАТЕ

Резумат

Ын лукраре сынт експусе материалеле ку привире ла прелукраря, черчетаря ши ынтродучеря ын продукцие а системулуй де аутоматизаре а пунктелор де примире ши помпаре а маселор фэрымицате де томате пентру линиеле техноложиче ын прочесул препарэрий томателор.

Сынт детерминате каузеле, каре кондиционазэ утилитатя елаборэрий скемей индикате.

Лукраря поате фи фолоситэ де лукрэторий, че се окупэ ку проблема аутоматизэрий ынтреприндерилор де консерве.

СОДЕРЖАНИЕ

Б. Р. Лазаренко. Новые применения электрической энергии в промышленности и сельском хозяйстве	3
О. К. Базиленко. Преобразование информации вероятностными конечными автоматами	16
Г. В. Чалый. К вопросу о тенденциях развития систем возбуждения мощных синхронных генераторов и компенсаторов	26
Г. В. Чалый. Гашение магнитного поля в генераторах с инным возбуждением	42
В. Г. Журавлев. Использование некоторых статистико-вероятностных связей для определения перспективного уровня потребления электрической энергии в Молдавии	64
Г. М. Федорищенко, М. Л. Мисник. Использование методов математической статистики и теории вероятности при анализе графиков нагрузки молдавской	79

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
86	27 сверху	$af = const$	$(af)_{кр} = const$
89	11 снизу	Δf	Δt
90	8 сверху	c', c_2	C_1, C_2
90	15 сверху	$f < 1496 \text{ гц}$ и $f \lambda_{2d} < 6,04$	$f < 1496 \text{ гц}$ и $\lambda_{2d} > 6,04$
91	22 сверху	уменьшаются	уменьшаются с увеличением f .
93	8 сверху	при $W = 1,5 - 3 \text{ м/сек}$	при $J = 0,2 \text{ ватт/см}^2$ и $W = 1,5 - 3 \text{ м/сек}$

Академия Наук Молдавской ССР

ИЗВЕСТИЯ № 3

Редактор Р. Кашуткин. Художественный редактор В. Роман. Технический редактор Н. Жеманян. Корректор Т. Куруч.

Сдано в набор 29/III-1963 г. Подписано к печати 19/IX-1963 г. Формат бумаги $70 \times 108 \frac{1}{4}$. Печатных листов 9,60. Уч. изд. листов 8,45. Тираж 500. ЛБ06539. Цена 59 коп. Зак. № 901.

Государственное издательство «Карта Молдовеняскэ» Кишинев, ул. Жуковского, 44.

Кишинев, Полиграфкомбинат, Госпитальная, 32.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Чалый, Б. М. Бутенко. Автоматизация линий по переработке томатов. «Известия Академии наук МССР», 1962, № 9.
2. И. Е. Декабрун, Н. Р. Тедер. Справочник по элементам автоматики и телемеханики. Реле времени, программные устройства, реле счёта, искатели, М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
3. Справочник по элементам автоматики, под редакцией Б. С. Сотскова. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.

Ю. А. Ш

АУТОМА

Вн л
черчетар
ре а пун
мате пен
Сынт
скемей и
Лукра
аутомати

СОДЕРЖАНИЕ

Б. Р. Лазаренко. Новые применения электрической энергии в промышленности и сельском хозяйстве	3
О. К. Базиленко. Преобразование информации вероятностными конечными автоматами	16
Г. В. Чалый. К вопросу о тенденциях развития систем возбуждения мощных синхронных генераторов и компенсаторов	26
Г. В. Чалый. Гашение магнитного поля в генераторах с ионным возбуждением	42
В. Г. Журавлев. Использование некоторых статистико-вероятностных связей для определения перспективного уровня потребления электрической энергии в Молдавии	64
Г. М. Федорищенко, М. Л. Мисник. Использование методов математической статистики и теории вероятности при анализе графиков нагрузки молдавской энергосистемы	73
М. К. Болога, Г. М. Левин, Ю. Н. Пауков. Влияние колебаний на конвективную теплоотдачу	82
К. Я. Краснолоб, Б. А. Оргиян. Полярограф для автоматизации контроля и регулирования технологических процессов в химическом производстве по качественным показателям	99
Ю. А. Щеглов, Л. Г. Гольденберг, А. А. Факторович, К. Я. Краснолоб. Автоматизация узлов приема и перекачки дробленой массы томатов технологических линий по переработке томатов	107

Академия Наук Молдавской ССР

ИЗВЕСТИЯ № 3

Редактор Р. Кашуткин. Художественный редактор В. Роман, Технический редактор Н. Жеманян. Корректор Т. Куруч.

Сдано в набор 29/III-1963 г. Подписано к печати 19/IX-1963 г. Формат бумаги 70×108¹/₁₆. Печатных листов 9,60. Уч. изд. листов 8,45. Тираж 500. АБ06539. Цена 59 коп. Зак. № 901.

Государственное издательство «Карта Молдовеняскэ» Кишинев, ул. Жуковского, 44.
Кишинев, Полиграфкомбинат, Госпитальная, 32.