

БУЛЕТИНУЛ

АКАДЕМИЕЙ ДЕ ШТИИНЦЕ
А РСС МОЛДОВЕНЕШТЬ



ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК МОЛДАВСКОЙ ССР



физ-теор и математ

АКАДЕМИЯ НАУК МОЛДАВСКОЙ ССР

БУЛЕТИНУЛ

АКАДЕМИЕЙ ДЕ ШТИИНЦЕ
А РСС МОЛДОВЕНЕШТЬ

ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК МОЛДАВСКОЙ ССР

№ 3

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК
(энергетика)

РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ОТДЕЛ
АКАДЕМИИ НАУК МОЛДАВСКОЙ ССР
КИШИНЕВ, 1967

Г. В. ЧАЛЫН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Академик АН МССР Я. С. Гросул (главный редактор), В. А. Андрунакиевич (зам. главного редактора), член-корреспондент АН МССР Г. В. Чалый, кандидаты технических наук В. Г. Журавлев, В. С. Лернер, О. К. Базиленко

ЭНЕРГЕТИКЕ МОЛДАВИИ — ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ

Наша страна вступила в важнейший период своего развития — в период создания материально-технической базы коммунизма. Именно теперь гениальная формула Владимира Ильича Ленина «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны» приобретает особое значение. Энергетика, электрификация всегда были, есть и будут основой развития в всех отраслях народного хозяйства. Именно от темпов развития энергетики, от энерговооруженности производства в наибольшей, определяющей степени зависят темпы технического прогресса в любой отрасли народного хозяйства.

За годы Советской власти наша родина совершила гигантский скачок: из наименее технически оснащенной в дореволюционный период превратилась в одну из самых мощных и развитых стран в мире.

Пожалуй, наиболее разительны и показательны успехи СССР именно в области энергетики. Получив от царской России ничтожное энергетическое наследство (в 1913 г. во всей Российской империи было выработано всего 1,9 млрд. *квт-ч* электроэнергии, т. е. в два раза меньше, чем произведено в 1966 г. только в Молдавии), Советский Союз давно и далеко обогнал все страны мира, кроме США, как по суммарной мощности электростанций, так и по выработке электрической энергии. К 1967 г. мощность наших электростанций составила 125 млн. *квт*, за 1966 г. выработано 550 млрд. *квт-ч* электроэнергии.

По многим показателям электрификации наша родина вышла на самые высокие научные и технические рубежи. По гениальному плану В. И. Ленина создание энергетической мощи страны начиналось со строительства Волховской и Днепровской ГЭС, а к юбилейному году у нас построены крупнейшие в мире гидроэлектростанции — Волжская имени В. И. Ленина, Волжская имени XXII съезда КПСС и Братская ГЭС мощностью 4,05 млн. *квт*, крупнейшая в Европе Приднепровская ГРЭС мощностью 2,4 млн. *квт*. Недалек пуск гиганта гидроэнергетики — Красноярской ГЭС с уникальными гидроагрегатами по 500 тыс. *квт*; в 1967 г. будут введены в опытную эксплуатацию головные энергоблоки в 500 тыс. *квт* на Назаровской и в 800 тыс. *квт* на Славянской ГРЭС.

В Советском Союзе сооружены самые длинные линии электропередачи с самым высоким в мире напряжением — 500 тыс. *в* переменного тока и 800 тыс. *в* постоянного тока. Начаты работы по созданию линий электропередачи переменного тока на 750 тыс. *в* и постоянного тока на 1,5 млн. *в*. В нашей стране созданы первые в мире атомные электростанции.

158738

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Молдавской ССР

Теперь, планируя на ближайшие 15 лет новый колоссальный рост электроэнергетики, мы вступили в период завершения первого этапа полной электрификации всей страны.

Огромн, беспрецедентен рост молдавской энергетики за годы Советской власти. Позже всех — в 1940 г. — вступила в семью советских республик Молдавия, имея всего несколько маломощных электростанций. Так, общая мощность Кишиневской электростанции едва достигала тогда двух тысяч киловатт. В месяц она вырабатывала почти в два раза меньше электроэнергии, чем потребляет теперь столица Советской Молдавии за одни сутки.

При весьма высоком темпе развития энергетического хозяйства СССР (среднегодовой темп роста производства электроэнергии за последние десять лет составил 12,6 процента) энергетика Молдавии развивается в два с лишним раза быстрее. Уже в 1960 г. выработка электроэнергии составила 677 млн. *квт-ч*, а в 1966 г. — 3,7 млрд. *квт-ч*.

Высокие темпы электрификации планируются и на дальнейшее. К концу пятилетки производство электроэнергии в Молдавии составит 6,8 млрд. *квт-ч*, что в 2,4 раза больше, чем в 1965 г. Это позволит увеличить потребление электроэнергии в народном хозяйстве республики в 1,8 раза, в том числе в сельском хозяйстве в 3, в строительстве в 1,6, на коммунально-бытовые нужды в 1,4 раза.

Потребление электроэнергии промышленностью возрастет в Молдавии в 16 раз, сельским хозяйством — 47 раз, на коммунально-бытовые нужды будет отпускаться в 19 раз больше электрической энергии, чем в 1960 г.

Еще несколько лет назад суммарная мощность Молдавской энергосистемы составляла менее 100 тыс. *квт*, а уже в 1967 г. мощность Молдавской ГРЭС будет доведена до 1 млн. 200 тыс. *квт*. За пятилетку будут электрифицированы все населенные пункты республики.

В изучении и разработке вопросов наиболее рационального развития республиканской энергосистемы и ее элементов, рационального потребления электроэнергии, в изучении вопросов возможности и целесообразности широкого использования местных возобновляемых энергетических ресурсов особое участие принимали и ученые-энергетики сотрудники Академии наук Молдавской ССР*.

В настоящее время созданы предпосылки для широкого внедрения электроэнергии во все основные отрасли народного хозяйства, в том числе в сельскохозяйственное производство и быт сельского населения.

Полная электрификация Молдавии на базе централизованного электроснабжения открывает огромные перспективы для эффективного использования благоприятных природно-экономических условий республики. В частности, электрификация ряда энергоемких производственных процессов в сельском хозяйстве (где помимо электрификации процессов в полеводстве и животноводстве большое внимание должно быть уделено электрификации многих стационарных и мобильных процессов в садоводстве, виноградарстве и животноводстве) может дать большой эко-

* См. статьи Г. В. Чалого «Обзор, современные направления исследований и перспективы развития Отдела энергетической кибернетики Академии наук Молдавской ССР» и В. Г. Журавлева, Г. В. Чалого «О некоторых научных результатах и основных направлениях работы лаборатории математического моделирования энергосистем» в этом сборнике.

номический эффект и приведет к чрезвычайно резкому росту потребления электроэнергии.

Создание мощной энергетической базы позволит в дальнейшем широко использовать электрическую энергию для электромашинного орошения земель Молдавии, рационального электрообогрева парников, теплиц и открытого грунта, для круглогодичного хранения плодов в свежем виде и др.

Вопрос обеспечения республики электроэнергией по «Большому орошению» перерастает в крупную самостоятельную проблему. Дело в том, что только для обеспечения планируемого на перспективу орошения 730 000 га земель Молдавской ССР потребуется сооружение и ввод в эксплуатацию весьма значительных энергетических мощностей — порядка 1 млн. *квт*. При рациональном же, научно обоснованном осуществлении всего комплекса орошения и других энергоемких мероприятий, таких как электрообогрев парников и открытого грунта, эти мощности могут быть существенно уменьшены.

Установки крупного электромашинного орошения, так же как и электрообогрев значительного количества парников, теплиц и открытого грунта, при работе их преимущественно в ночные часы целесообразно использовать в качестве мощных потребителей-регуляторов графика нагрузки энергосистемы, способных существенно уменьшить неравномерность суточного потребления электроэнергии в республике и привести к значительной экономии топлива.

В установках крупного электромашинного орошения особенно целесообразным могло бы оказаться использование «обратимых» агрегатов, потребляющих электроэнергию в часы спада нагрузок для наполнения водой водохранилищ и производящих ее в часы пик (гидроаккумуляция). Опыт многих зарубежных стран свидетельствует о большой технико-экономической эффективности ввода в состав энергосистем таких насосно-аккумулятирующих гидроэлектростанций — ГАЭС. (Естественно, что для обеспечения должной экономической эффективности использования всех этих потребителей-регуляторов должен быть решен вопрос и о введении льготного ночного тарифа на электрическую энергию, которая, как это и принято повсеместно за рубежом, должна быть в 3—5 раз дешевле дневной — «пиковой»).

Рост электропотребления в промышленности республики должен идти не только за счет расширения производства, но и за счет электрификации ряда энергоемких тепловых процессов. Вторичное преобразование электрической энергии в тепловую на многих предприятиях Молдавской ССР может оказаться значительно более целесообразным, чем рассредоточенное производство тепловой энергии с помощью дорогого дальнепривозного топлива.

Для Молдавии, с ее относительно мягким климатом и практически полным отсутствием местных топливных ресурсов, большие перспективы может иметь электрическое отопление жилых и общественных зданий в сельских местностях (полное или частичное), при условии работы этих электронагревательных установок по рационально зарегулированному суточному графику, в основном в часы спада нагрузок (обязательно с применением поощрительных тарифов на электроэнергию). Эти потребители электроэнергии также могут быть отнесены к группе достаточно мощных потребителей-регуляторов нагрузки в энергосистеме.

Существует много других важных и насущных вопросов развития электрификации Молдавии, требующих быстрого научного разреше-

ния. Проектные институты нуждаются, например, в разработке научно обоснованных удельных нормативов потребления электроэнергии в различных отраслях народного хозяйства для уровней 1970, 1975 и 1980 годов. Ставятся вопросы повышения пропускной способности существующих распределительных сетей высокого напряжения, повышения надежности и бесперебойности электроснабжения сельских потребителей качественной электроэнергией.

Давно назрела необходимость разработать рациональный топливно-энергетический баланс республики, решить многие теплоэнергетические задачи, в частности на предприятиях пищевой промышленности и на сахарных заводах, и многое другое.

Однако, помимо решения этих частных, хотя и очень важных для республики, задач, нужно прежде всего обеспечить своевременное решение проблемы наиболее рационального развития всей Молдавской энергосистемы как единого целого.

Эта задача весьма сложна, потому что энергосистема Молдавии имеет свою ярко выраженную специфику, резко выделяющую ее даже из родственных ей по величине и структуре республик и экономических районов. К числу таких особенностей следует отнести как настоящую ее структуру и режим (тупиковая система с относительно слабыми связями с энергосистемой Украины, весьма крупный дефицит реактивных мощностей*, слабо развитые распределительные сети), так и особенности ее будущего развития — развития всего нашего энергетического района (Молдавия и часть юго-запада Украины). В будущей энергосистеме, рациональное поэтапное развитие которой нужно разработать и научно обосновать, должны быть крупные тепловые и гидравлические электростанции (частично с обратимыми агрегатами), насосно-аккумулирующие гидроэлектростанции, пиковые газогенераторные станции, крупные потребители-регуляторы. Должны быть усилены связи с юго-западом Украины и с соседними странами.

Специфичным будет и режим энергосистемы, на который, в частности, будет оказывать существенное влияние периодическая потребность в значительных количествах электроэнергии на орошение крупных площадей.

Правильное решение перечисленных задач по электрификации Молдавии, в том числе проблемы наиболее рационального поэтапного развития Молдавской энергосистемы и ее режимов, представляет значительные трудности и требует проведения не только больших проектных, но и крупных специальных научно-исследовательских работ при широком применении методов физического и математического моделирования с использованием электронной вычислительной техники.

Однако в настоящее время в Молдавии нет научно-исследовательского учреждения, которое смогло бы заняться разрешением всех этих чрезвычайно насущных для Молдавии проблем.

Единственное в республике научно-исследовательское учреждение, в той или иной степени имеющее отношение к энергетике и электрификации Молдавии, — это относительно небольшой Отдел энергетической кибернетики Академии наук Молдавской ССР. В нем исследуются весьма актуальные темы, связанные в основном с проблемой применения кибернетики в энергетических системах (математическое моделирование

* Вследствие чего потребители практически повсеместно до сих пор получают электроэнергию низкого качества (чрезмерно велико понижение напряжения в часы пик).

энергосистем) и проблемами генерации, распределения и использования электроэнергии (оптимизация параметров элементов электроэнергетики)*. По второй проблеме (по вопросам изучения возможности и целесообразности повышения промышленного переменного тока в отраслях народного хозяйства) Отдел выделен головной организацией в Союзе.

Однако в Отделе могут решаться только очень немногие из указанных «молдавских» задач в области энергетики и электрификации. Быстрейшее решение всех, или по крайней мере большей, основной части энергетических задач, специфических для Молдавии, совершенно необходимо и под силу только комплексному, хорошо оснащенному современному научным оборудованием энергетическому научно-исследовательскому институту. Необходимость в таком институте давно назрела.

Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О мерах по улучшению деятельности Академии наук СССР и академий наук союзных республик» определяется необходимость «...сосредоточить деятельность Академии наук СССР и академий наук союзных республик на решении следующих главных задач:

...осуществление перспективных научных исследований, непосредственно связанных с развитием промышленного и сельскохозяйственного производства и, в первую очередь в таких определяющих областях технического прогресса, как электрификация всей страны...»

Следует отметить, что Молдавия — единственная в Союзе республика, в которой нет института энергетики (ни академического, ни отраслевого), и что перечисленные выше конкретные задачи электрификации Молдавии не решаются ни в одном из крупных специализированных энергетических институтов страны. Необходимо быстро и радикально решить этот вопрос, так как именно от темпов развития энергетики зависят темпы развития всех без исключения отраслей народного хозяйства республики.

* См. статью Г. В. Чалого «Обзор, современные направления исследований и перспективы развития Отдела энергетической кибернетики Академии наук Молдавской ССР» в этом сборнике.

Г. В. ЧАЛЫН

ОБЗОР, СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТДЕЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ АКАДЕМИИ НАУК МОЛДАВСКОЙ ССР

Отдел энергетической кибернетики с его теперешней тематикой организован в 1963 г. До этого в Молдавском филиале Академии наук СССР с 1957 по 1961 г. существовал Отдел энергетики, развившийся в 1961 г. в Институт энергетики и автоматики.

В небольшом вначале Отделе энергетики велся большой комплекс исследовательских работ, непосредственно связанных с энергетикой Молдавии, в том числе по рациональному использованию местных возобновляемых энергетических ресурсов, по ветроэнергетике (определение полного ветроэнергетического кадастра республики, разработка конкретных рекомендаций по использованию различных ветродвигателей в сельском хозяйстве, в частности на животноводческих фермах), геотермической энергетике (определение достоверного солнцезапасного кадастра республики, разработка солнечных нагревательных установок, солнечных сушилок, теплиц и т. п.), биоэнергетике (использование некормовых отходов сельского хозяйства для получения метана и высококондиционного удобрения), гидроэнергетике (комплексное, в том числе энергетическое, использование водных ресурсов Молдавии. Именно здесь была впервые предложена и разработана идея «Большого орошения» Молдавии).

В Отделе энергетики разрабатывался комплекс вопросов по электрификации сельского хозяйства Молдавии, в том числе методы и средства электрического обогрева закрытого и открытого грунта, электрообогрева виноградных саженцев при их стратификации, по применению электричества для борьбы с летающими вредителями садов и виноградников, нормативы потребления электроэнергии для характерных природно-экономических зон Молдавии.

В Отделе в 1959—1960 гг. проводились также работы по автоматизации энергетики (централизованное устройство аварийных электрических защит для электростанций), автоматизации производственных процессов в пищевой промышленности, телеуправлению вентиляционными установками шахт по добыче пильного камня.

Значительная часть работ велась в тесном содружестве с производителями. Удельные нормативы электропотребления для уровня 1965 г. были использованы специалистами института Молдгипросельхозстрой при разработке проектов распределительных сетей и электрификации отдельных колхозов и совхозов в разных природно-экономических зонах Молдавии. Вопросы электрообогрева закрытого грунта разрабатывались в 1961 г. в электропарниковых хозяйствах Тираспольского райо-

на. Новый способ электрообогрева стратификационных ящиков виноградных прививок, разработанный в Отделе, впервые испытывался в 1961 г. в колхозе им. Мичурина села Трушены Страшенского района, а автоматическая электростратификационная установка, получившая затем широкое распространение, была создана и впервые испытана весной 1962 г. совместно со специалистами питомниководческого совхоза «Цветущая Молдавия» Каларашского района. В творческом содружестве с работниками Тираспольского консервного завода им. Первого мая создавались система и средства автоматизации томатного цеха.

К 1960 г. работы по гидроэнергетике и автоматике настолько расширились, что в составе Отдела энергетики были организованы лаборатории водохозяйственных проблем и автоматики. Однако несмотря на довольно большой круг отдельных вопросов, над которыми работал Отдел, он не мог решить всех необходимых задач по электрификации республики*, комплексному использованию водных ресурсов, по внедрению комплексной механизации и автоматизации производственных процессов в основных отраслях промышленного и сельскохозяйственного производства Молдавии.

В проблему полной электрификации Молдавии входил большой и весьма специфический комплекс, начиная от вопросов, связанных с величиной и спецификой потребления электроэнергии в различных районах республики самыми различными потребителями на различных этапах электрификации, и кончая вопросами режима работы будущей энергосистемы, объединенной с энергосистемами соседних экономических областей.

Полностью выпадали из цикла научных исследований вопросы теплоэнергетики. В то же время необходимо было решать задачи рационального тепло- и массообмена на многих предприятиях пищевой и сахарной промышленности, а также задачи, связанные с топливно-энергетическим балансом республики.

Следовало резко расширить и ускорить исследовательские работы по проблеме комплексного использования водных ресурсов, в которую, помимо орошения максимально возможного количества земель на всей территории Молдавии для обеспечения высоких и устойчивых урожаев, входят задачи предотвращения паводковых затоплений и заболачивания большого количества плодородных пойменных земель, получения значительных количеств электроэнергии от гидроэлектростанций, обеспечения населенных пунктов качественной водой, развития речного транспорта, охраны водных ресурсов и др.

В период 1958—1960 гг. в Молдавии началось интенсивное развитие пищевой, легкой, электротехнической промышленности, промышленности строительных материалов и других отраслей. Проектировались новые предприятия, для которых нужно было разрабатывать новые оптимальные технологические схемы и современное автоматизированное оборудование. На построенных ранее предприятиях вводилась комплексная механизация и автоматизация производственных процессов с частичной заменой старого оборудования и с полной или частичной автоматизацией отдельных узлов и элементов технологического оборудования. Требовалось создание новейших методов и средств автоматизации, ранее не раз-

* Отдел был в то время единственным в Молдавской ССР научно-исследовательским учреждением в области энергетики, электрификации и автоматики; в области энергетики и электрификации он и остался единственным.

работавшихся систем управления и регулирования производственных процессов, многих новых автоматических датчиков, регуляторов, автоматизированных и автоматически регулируемых электроприводов для самых различных промышленных объектов и сельскохозяйственного производства.

Необходимость решения этого сложного и специфического для Молдавии комплекса важнейших задач предопределила создание в 1960—1961 гг. на базе Отдела энергетики МФ АН СССР Института энергетики и автоматики с лабораториями электрификации народного хозяйства, теплоэнергетики, гидроэнергетики и гидротехнических сооружений, автоматики. Предполагалось, что в лабораториях Института энергетики и автоматики будут исследоваться и решаться все перечисленные, столь важные для республики вопросы.

Однако уже во второй половине 1962 г. началась реорганизация научно-исследовательских учреждений, выразившаяся в выводе из состава Академии наук «прикладных» институтов и отделов. Для Института энергетики и автоматики этот процесс закончился в начале 1963 г. преобразованием его в Институт электрофизических проблем (этот институт был уже в конце 1963 г. преобразован в Институт прикладной физики).

Из тематического плана Академии наук были полностью исключены, как «неакадемические», исследования по гидроэнергетике, теплоэнергетике, по топливно-энергетическому балансу, электрификации сельского хозяйства и по автоматике.

Из состава бывшего Института энергетики и автоматики сохранилась лишь небольшая группа электроэнергетиков, официально оформившаяся в начале 1963 г. в Отдел энергетической кибернетики.

Для Отдела была разработана новая тематика. Основными задачами вновь созданного Отдела стала разработка:

теоретических основ рационального комплексного развития районных (республиканских) энергосистем, имеющих специфическую структуру и режим;

теоретических основ мероприятий по обеспечению качества электроэнергии в районных (республиканских) энергосистемах;

теоретических основ применения напряжения повышенной частоты в энергосистемах и в отдельных отраслях народного хозяйства;

методики и средств автоматизации объектов энергетических систем.

Разработки должны были проводиться с широким применением методов и средств физического и математического моделирования с помощью вычислительной техники.

Эти направления работ Отдела были официально одобрены и включены в план Научного совета по проблеме «Кибернетика» при Президиуме АН СССР и Отделения физико-технических основ энергетики Академии наук СССР.

С конца 1963 г. Отдел, по рекомендации Комиссии АН СССР, был временно включен в состав Института математики АН Молдавской ССР; в мае 1965 г. Отдел был выделен из Института математики в самостоятельный Отдел энергетической кибернетики АН Молдавской ССР с двумя лабораториями: математического моделирования энергетических систем и оптимизации параметров в энергетике.

Эти лаборатории выполняют, соответственно, две темы:

«Разработка теоретических основ рационального развития республиканских энергосистем» и «Разработка научных основ применения переменного тока повышенной частоты в отраслях народного хозяйства».

Цель работ по первой теме — поиск и разработка вариантов рекомендаций оптимального плана поэтапного развития и оптимизации республиканских энергосистем, имеющих специфическую структуру и режим, при условии ликвидации крупного дефицита активной и реактивной мощности, с учетом радикального поэтапного изменения объема и структуры потребления электроэнергии различными отраслями народного хозяйства республики и с учетом объединения с энергетическими системами соседних экономических районов и стран. Результаты исследований по этой теме приведены в отдельной работе*.

Целью работ по второй теме «Разработка основ применения повышенной частоты (по всей теме)** является:

— определение объектов в электроэнергетике, для которых возможно и целесообразно применение промышленного переменного тока повышенных частот (100—400 гц);

— определение параметров, характеристик и технико-экономических показателей основных видов энергетического и электротехнического оборудования и основных элементов энергосистем при частотах 100—400 гц;

— нахождение, разработка и исследование принципиально новых возможностей использования повышенной частоты (100—400 гц) для различных технологических процессов с целью их максимальной оптимизации;

— исследование и решение вопроса о возможности и целесообразности применения переменного тока повышенных частот в основных отраслях народного хозяйства;

— разработка научно обоснованных, целесообразных с технико-экономической и общегосударственной точек зрения вариантов возможного применения тока повышенной частоты (или частот) для конкретных элементов электроэнергетики в основных отраслях народного хозяйства. Это, по существу, конечная цель всех исследований по проблеме повышения частоты.

Бывший Государственный комитет по координации научно-исследовательских работ Совета Министров СССР, учитывая актуальность этой темы, признал необходимым широко развить в Союзе работы по определению возможности и целесообразности повышения частоты в отраслях народного хозяйства. Комитет, по представлению Отдела, привлёк к участию в работах 57 учебных, научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов, СКБ и заводов. Отдел энергетической кибернетики был выделен головной — координирующей и обобщающей — организацией по всей теме.

В 1965 г. Отделом была произведена разработка и согласование тематик для всех 57 организаций-соисполнителей, вылившиеся в одобренный и утвержденный бывшим ГККНИР «Сводный план научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по определению возможности и целесообразности применения переменного тока повышенной частоты в отраслях народного хозяйства».

«Сводный план» разбит на 11 разделов, каждый из которых объединяет основные вопросы темы, специфические для отдельных элементов электроэнергетики («синхронные и асинхронные двигатели», «трансфор-

* См. статью В. Г. Журавлева и Г. В. Чалого в этом сборнике.

** Более подробно см.: Г. В. Чалый «Проблема определения оптимальной частоты промышленного переменного тока». В сб.: Электроэнергетика и автоматика, вып. 1. Кишинев, РИО АН МССР, 1965.

маторы», «электропривод переменного тока», «преобразователи частоты» и т. д.). Каждый раздел «Сводного плана» возглавляет соответствующий крупный специалист — научный руководитель всех работ по данному разделу (доктора технических наук профессора В. А. Веников, А. И. Бертинов, Ю. Г. Толстов, член-корреспондент АН СССР Г. Н. Петров, академик ВАСХНИЛ И. А. Будзко и др.).

Кроме общего координационного совещания представителей всех организаций-соисполнителей по теме, Отделом энергетической кибернетики проведен ряд региональных координационных совещаний по отдельным разделам темы. Отдел также собирает и обобщает материалы, получаемые от отдельных организаций-соисполнителей.

Лаборатория оптимизации параметров в энергетике, помимо работ по координации исследований, непосредственно выполняет следующие научно-исследовательские работы по теме:

- разработка общей методики сравнительной оценки технико-экономической эффективности повышения частоты в отраслях народного хозяйства;

- исследования влияния повышения частоты на параметры и энергетические показатели характерных электроприводов переменного тока в сельскохозяйственном производстве;

- исследования влияния повышения частоты на основные параметры и технико-экономические показатели распределительных сетей среднего и низкого напряжения;

- исследования преобразователей частоты средней и малой мощности.

К участию в исследованиях, ведущихся непосредственно в лаборатории оптимизации параметров в энергетике, Отдел привлек ряд организаций и крупных специалистов: сотрудников Института экономики АН СССР и Научно-исследовательского института стандартов, кафедру промышленной электроники Харьковского политехнического института, ГСКБ по сельскохозяйственным машинам (Кишинев), ГСКБ по погружным насосам (Кишинев), некоторых докторов и кандидатов технических наук.

Разработка общей методики сравнительной оценки технико-экономической эффективности повышения частоты для отраслей народного хозяйства ведется лабораторией вместе с Научно-исследовательским институтом стандартизации и сотрудниками Института экономики АН СССР.

Остальные работы лаборатории, в соответствии с рекомендациями Отделения физико-технических проблем энергетике АН СССР, связаны пока с исследованиями влияния повышения частоты переменного тока на параметры, характеристики и технико-экономические показатели основных элементов электроэнергетики сельскохозяйственных районов: сельских распределительных сетей, преобразователей частоты на пунктах отбора мощности и характерных сельскохозяйственных электроприводов. В дальнейшем разработку и исследование рациональных способов и средств использования переменного тока повышенной частоты предполагается вести в лаборатории в первую очередь именно для этой группы элементов электроэнергетики.

Исследовалось влияние частоты тока на параметры и энергетические показатели характерных сельскохозяйственных электроприводов переменного тока (в диапазоне 50—400 гц).

В лаборатории разрабатываются общие критерии объективной оценки технико-экономической целесообразности повышения частоты тока для электроприводов переменного тока (в первую очередь, для приводов сельскохозяйственного назначения, в том числе для низкоскоростных механизмов, имеющих скорости рабочих органов в пределах 0—200—750 об/мин).

Изучалось влияние частоты на режим работы и энергетические показатели асинхронных приводов. Проведено исследование конкретных, наиболее характерных групп электроприводов в сельскохозяйственном производстве (применительно к Молдавии). Собраны и изучены технологические карты сельскохозяйственных работ, данные по количеству и типам машин в ведущих отраслях сельского хозяйства республики, по новым типам машин для садов и виноградников, а также технические характеристики некоторых групп машин (виноградоборочные машины и др.). Проведена их систематизация и анализ с целью отбора механизмов, получения энергетических характеристик машин и выявления степени целесообразности использования электроприводов повышенной частоты; проведена классификация рабочих органов в зависимости от скорости и мощности.

Анализ показал, что для рассмотренных групп машин, имеющих сложные механические передачи, целесообразно применение электропривода повышенной частоты (200—400 гц); электропривод при частоте тока 50 гц в большинстве случаев нецелесообразен.

При разработке методики выбора рационального электропривода повышенной частоты для групп сельскохозяйственных машин, имеющих вращающиеся дисковые рабочие органы с шарнирно-закрепленными ножами при вертикальной оси диска, получены экспериментально (в полевых условиях) нагрузочные диаграммы впервые сконструированной машины ППЛ-2,5 и ее механические характеристики (совместно с ГСКБ и ВНИИВиВ «Магарач»).

Собраны и систематизированы материалы по погружным насосам (для водоснабжения из артезианских скважин в сельскохозяйственных районах) с асинхронным приводом. Изучаются вопросы целесообразности применения для погружных насосов высокоскоростных асинхронных двигателей повышенной частоты. Разработана методика, составлен алгоритм и отлажена программа расчетов на ЭЦВМ по определению основных параметров, характеристик и технико-экономических показателей погружных насосов с электроприводом переменного тока повышенной частоты.

Проведен анализ статистических данных по определению влияния диаметра скважин и фильтров на дебит воды. Определена целесообразность создания высокопроизводительных насосов малого диаметра с малогабаритными высокоскоростными асинхронными двигателями повышенной частоты. Применение таких насосов позволит значительно увеличить дебит многих существующих и проектируемых скважин, а также сэкономить большое количество металла на обсадных трубах, удешевить и ускорить бурение скважин.

Определены (предварительно) основные параметры погружных насосов с электроприводом 100 гц. Установлено, что вес агрегатов с таким приводом по сравнению с агрегатом, имеющим привод 50 гц, уменьшается примерно в 2—2,5 раза, а диаметр скважин — на 30%.

Технико-экономические расчеты показывают, что уже повышение частоты тока для высокоскоростных погружных насосов с 50 только до

100 гц даст существенный положительный экономический эффект, даже если каждый агрегат будет снабжен индивидуальным преобразователем частоты.

Полученные данные позволят в дальнейшем определить технические условия для проектирования оптимальных высокопроизводительных погружных насосов с высокоскоростным электроприводом повышенной частоты.

Разработана методика определения оптимальных параметров и характеристик асинхронных двигателей повышенной частоты, в том числе коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, удельного расхода металла. Разработана методика определения оптимальной частоты для асинхронных двигателей.

Проведены теоретические исследования различных методов определения механических потерь у высокоскоростных асинхронных двигателей, заполненных жидкостью, с учетом дисковых потерь и потерь трения цилиндра, в зависимости от величин зазора между цилиндрами и коэффициентом кинематической вязкости жидкости. Рекомендована методика расчета потерь, составлен алгоритм, отработана программа расчета механических потерь (для БЭСМ-2М). Разрабатывается методика определения добавочных электрических потерь в асинхронных двигателях повышенной частоты, в том числе на поверхности ротора от зубцовых гармонических магнитодвижущей силы статора, и пульсационных потерь в зубцах статора при холостом ходе, в клетке ротора от пульсаций потока в зазоре, добавочных потерь в обмотке статора.

Разработана методика определения прогиба вертикальных валов двигателей удлиненной формы, необходимая для расчета оптимальных высокоскоростных двигателей повышенной частоты вертикального исполнения (в том числе для погружных насосов), составлен алгоритм и программа для расчета прогиба на БЭСМ-2М.

Разработана методика экспериментального определения характеристик резинометаллических подшипников, а также влияния изгибной жесткости роторов двигателей повышенной частоты для погружных насосов на величину междужелезного зазора.

Начаты разработки алгоритма для расчета серии и оптимизации параметров герметизированных асинхронных двигателей повышенной частоты (с заполнением машины агрессивными жидкостями).

Исследовалось влияние частоты на основные параметры, характеристики и технико-экономические показатели сельских распределительных сетей.

Проведено теоретическое исследование влияния повышения частоты на реактивные и активные сопротивления проводов с учетом эффекта близости и др., дана количественная оценка этого влияния на различные типы проводов, применяющихся в распределительных сетях.

Исследовалось влияние частоты (в диапазоне 50—400 гц) на потерю напряжения в радиальных неразветвленных линиях напряжением 0,4; 6; 10; 35 и 110 кв для смешанной активно-индуктивной нагрузки с разными коэффициентами мощности, для разного сечения проводов, с учетом возможного расщепления проводов и применения установок компенсации падения напряжения.

Исследовались параметры и характеристики низковольтной сети при одновременном повышении частоты (с 50 до 400 гц) и напряжения (с 380 до 660 в) для различных коэффициентов мощности.

Предварительные исследования показали, что для сетей 110, 35, 10(6) кв оптимальной оказывается частота порядка 140 гц, а для распределительных сетей низкого напряжения (при одновременном повышении этого напряжения до 660 в) — частота около 200 гц*.

Начаты исследования влияния повышения частоты на технико-экономические показатели распределительных сетей (высоковольтных и низковольтных) для конкретного сельскохозяйственного района Молдавской ССР.

Систематизированы и проанализированы возможные рациональные схемы статических преобразователей частоты переменного тока с 50 до 100—400 гц для использования их на пунктах отбора мощности — на низительных трансформаторных подстанциях и на трансформаторных питательных пунктах.

Разрабатывается теория статических преобразователей средней и малой мощности, в частности вопросы регулирования напряжения автономных инверторов с искусственной коммутацией в условиях работы на пунктах отбора мощности — при питании смешанных групповых потребителей.

Совместно с кафедрой промышленной электроники Харьковского политехнического института ведется разработка и теоретическое обоснование рациональных схем и систем управления преобразователей частоты средней и малой мощности с непосредственной связью (без применения звена постоянного тока). Разработаны принципиальные схемы и теория вентильных умножителей частоты с огибающей кривой, в том числе бестрансформаторных — малой и средней мощности. Разработана теория и произведено определение основных энергетических показателей умножителей с однофазным и трехфазным выходом на стороне повышенной частоты. Проведены первые экспериментальные исследования таких утроителей частоты. Исследования подтвердили возможность создания вентильных умножителей частоты с непосредственной связью, обладающих рядом существенных достоинств.

С помощью аналоговой вычислительной машины начаты исследования комплекса: питающая сеть 50 гц — преобразователь частоты на пункте отбора мощности — распределительная сеть повышенной частоты — потребитель. Исследования комплекса будут проведены для всех нормальных и аварийных режимов с целью выбора оптимальных для условий работы на пунктах отбора мощности преобразователей частоты.

Начаты также предварительные работы по исследованию искажений формы напряжения и тока, вносимых преобразователями частоты, и влияния этих искажений на линии передачи, линии связи и на потребителей (как на стороне 50 гц, так и на стороне повышенной частоты).

В ближайшем будущем в лаборатории начнутся работы по обобщению результатов исследования вопросов возможности и целесообразности повышения частоты переменного тока по всем основным элементам электроэнергетики, полученные от всех организаций-соисполнителей по теме. В лаборатории должны быть разработаны алгоритмы, связывающие все элементы электроэнергетики (или их группы, в различных сочетаниях) во всех требуемых аспектах (в том числе с учетом потребляемой перестройки промышленности и энергетического хозяйства). Реализация этих алгоритмов с помощью вычислительных машин для раз-

* См. статью Г. М. Верина, В. Г. Журавлева, Б. А. Зубарева и Г. В. Чалого в этом сборнике.

личных вариантов частоты (и вариантов возможного сочетания различных частот) позволит выработать несколько основных научно обоснованных, целесообразных с технико-экономической и общегосударственной точек зрения вариантов рекомендаций возможного повсеместного или частичного внедрения той или иной частоты (или частот) в народном хозяйстве страны — для конкретных элементов электроэнергетики в основных отраслях народного хозяйства.

Помимо указанных разделов темы, в лаборатории разрабатывается комплексное устройство (специализированная управляющая машина) для аварийных электрических защит объектов электростанций. Выполнена теоретическая часть работы, изготовлены и испытаны три варианта лабораторных образцов устройства дифференциально-фазной защиты (с дискретным измерением величины сдвига фаз) трехфазного двухполюсного объекта (например, двухобмоточного трансформатора). Устройства реализованы на трехтактных ферритдиодных логических элементах. В 1966 г. лабораторный образец устройства прошел успешные испытания на Дубоссарской ГЭС. В дальнейшем предполагается разработка модификации такого устройства для частот в диапазоне 100—400 гц.

Составлен алгоритм, отработана программа и проведены на ЭЦВМ расчеты вероятности ошибки при передаче некоторых кодов с малым числом информационных символов по двоичному симметрично-марковскому каналу. Рассмотренные коды перспективны для использования в устройствах защиты с телеизменяемой уставкой, а также в системах телеуправления некоторыми энергетическими объектами.

В лаборатории начата подготовка к постановке новой крупной теоретической работы — разработке и исследованию методов и средств управления элементами энергосистем при использовании принципов блочной информационно-управляющей системы.

В Отделе энергетической кибернетики уже теперь широко применяется вычислительная техника при решении практически всех вопросов, входящих в тематику Отдела, — и в работы по оптимизации структуры и режимов энергосистем, и в работы по проблеме определения оптимальной (повышенной) частоты для отраслей народного хозяйства.

Так, в Отделе разрабатываются и реализуются на ЭЦВМ алгоритмы следующих основных задач:

частные и комплексные вопросы оптимизации параметров, структуры и режимов энергосистем — элементарных, сложных и объединенных систем, содержащих теплоцентрали, гидравлические и мощные блочные конденсационные электрические станции, гидроаккумулирующие электростанции, станции-регуляторы, сложнозамкнутые — магистральные и распределительные — электрические сети напряжением от 500 до 6—10 кв. В том числе разрабатываются алгоритмы, связанные с наиболее целесообразным распределением нагрузки между параллельно работающими электростанциями в смешанных энергосистемах, алгоритмы целесообразного размещения источников активной и реактивной мощности в энергосистемах, с расчетом потокораспределения активной и реактивной мощности в сложных электрических сетях;

оптимизация структуры энергосистем по надежности;

поиск оптимальной стратегии развития структуры и параметров энергосистемы во времени;

моделирование статических преобразователей частоты различных систем и схем (при работе их на комплексных групповых потребителей

с учетом всех нормальных и аварийных режимов электрической сети до и после преобразователей);

расчет параметров, характеристик и технико-экономических показателей высокоскоростных асинхронных двигателей повышенной частоты; моделирование характерных электроприводов переменного тока повышенной частоты с их рабочими органами, в том числе для погружных насосов и различных мобильных сельскохозяйственных машин;

начинается применение ЭВМ для исследования влияния повышения частоты на параметры, характеристики и технико-экономические показатели магистральных и распределительных электрических сетей;

начата подготовка к моделированию влияния высших гармоник тока и напряжения на основные группы потребителей, распределительные сети и линии связи;

подготавливается моделирование элементов электроэнергетики, участков энергосистем и отраслей промышленности при работе их на повышенной частоте с целью определения технической возможности и технико-экономической целесообразности повышения частоты переменного тока;

подготавливаются алгоритмы для исследования степени оптимальности разрабатываемых в Отделе кибернетических устройств управления элементами энергосистем и по разработке новейших методов управления режимами энергосистем с помощью аналого-цифрового комплекса.

Для успешного выполнения перечисленных работ Отделу энергетической кибернетики уже в 1967—1968 гг. понадобится аналого-цифровой вычислительный комплекс, состоящий, как минимум, из цифровой вычислительной машины «Минск-22» с двойным объемом оперативной памяти, аналоговой вычислительной машины МН-17 с блоком следящих систем, расчетного стола переменного тока РС-2, электронного логического регистрирующего устройства ЭЛРУ-2М, преобразователя аналого-число и число-аналог, общего пульта управления и дешифратора команд. Такой аналого-вычислительный комплекс стал бы необходимой материальной базой дальнейшего развития исследований в Отделе.

Как видно из изложенного, работы, проводимые в Отделе по двум весьма крупным актуальным научно-исследовательским темам, достаточно четко определяют место Отдела энергетической кибернетики Академии наук Молдавской ССР в разработке современных проблем электроэнергетики.

Однако, как уже говорилось, в Молдавии совершенно необходимо разрабатывать также и специфические «молдавские» задачи в области гидроэнергетики, теплоэнергетики, электрификации сельскохозяйственно-го производства и топливно-энергетического баланса.

п 58738
 Центральная научная
 БИБЛИОТЕКА
 Академии наук Киргизской ССР

В. Г. ЖУРАВЛЕВ, Г. В. ЧАЛЫП

О НЕКОТОРЫХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ И ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ РАБОТЫ ЛАБОРАТОРИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Лаборатория математического моделирования энергосистем Отдела энергетической кибернетики образовалась как самостоятельное подразделение лишь в августе 1965 г., однако работы, проводимые в ней в настоящее время, были начаты еще в 1962 г. в Институте энергетике и автоматике*.

Основной базой для развития работ по математическому моделированию послужила сначала ЦВМ «Минск-1» Кишиневского политехнического института, а с 1965 г. — ЦВМ БЭСМ-2М, принадлежащая Академии наук Молдавской ССР.

Наша лаборатория сотрудничает с Молдглавэнерго, с сектором перспективного развития энергосистем Львовского отделения института Энергосетьпроект, с Кишиневским филиалом института ВНИИПИСельэлектро, с молдавским институтом Гипроводхоз. Отдел поддерживает тесные творческие связи с кафедрами гидроэнергетики и электрических систем (Московский энергетический институт), электрических сетей и систем (Киевский политехнический институт), электрических сетей (Уральский политехнический институт), электроснабжения промышленных предприятий (Кишиневский политехнический институт), вычислительной техники (Кишиневский госуниверситет) и др.

Лаборатория проводит исследования по проблеме «Кибернетика и управление энергетическими системами». Ее официальная тема — «Разработка теоретических основ рационального комплексного развития районных (республиканских) энергосистем». Основное внимание уделяется созданию новых алгоритмов оптимизации структуры и режимов энергосистем, их совершенствованию и внедрению в практику. Разумеется, силы лаборатории недостаточны для полного решения этой сложной проблемы. Поэтому тематика лаборатории охватывает лишь несколько частных аспектов данного вопроса. Они схематично изображены на рис. 1. Структура этих разделов и их взаимосвязь складывались постепенно, по мере развития исследований. «Зона охвата» тематики лабораторией строилась так, чтобы не дублировать работу других научно-исследовательских организаций. Известно, что оптимизацией структуры систем занимается СибЭНИН, Энергосетьпроект, ЭНИН, МЭИ, ВНИИЭ,

* См. статью Г. В. Чалого «Обзор, современные направления исследований и перспективы развития Отдела энергетической кибернетики Академии наук Молдавской ССР» в настоящем сборнике.

КазНИИЭ. Параллельная работа и «конкуренция» с такими мощными институтами была бы явно не под силу относительно малочисленной лаборатории и вряд ли целесообразной. Поэтому зачастую приходилось отказываться от работы над некоторыми интересными вопросами только потому, что над ними уже работают более мощные коллективы.

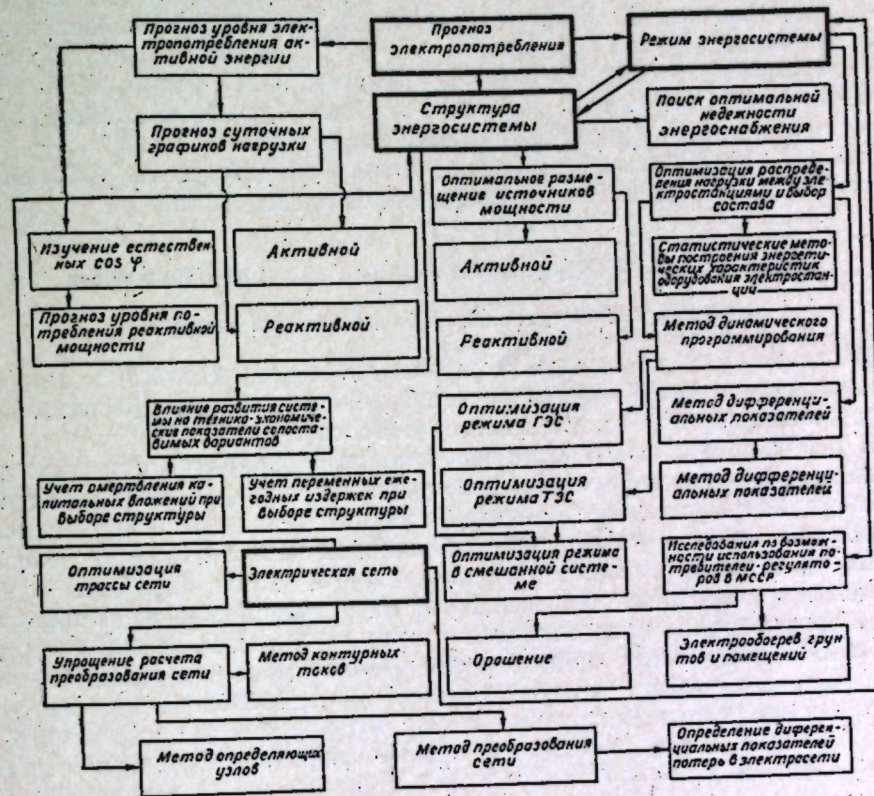


Рис. 1. Основные направления научно-исследовательских работ лаборатории математического моделирования энергосистем

В области координации исследований по данной теме в нашей стране сделано еще очень мало. Интересные мысли по содержанию проблемы и основным направлениям ее развития высказывал академик АН КазССР Т. Л. Золотарев, однако преждевременная смерть помешала ему осуществить их.

Тема лаборатории, согласно схеме, охватывает четыре раздела:

- а) прогнозирование уровня и режима электропотребления;
- б) оптимизация режимов работы энергосистемы;
- в) оптимизация структуры энергосистемы;
- г) некоторые вопросы, связанные с оптимальным проектированием сети и расчетом ее режимов.

В свою очередь, каждый из этих разделов рассматривает не все, а только некоторые частные вопросы. И, естественно, что без применения «чужих» методических приемов, дополняющих наши исследования, решить эти задачи было бы практически невозможно. С другой стороны,

и результаты исследований, ведущихся в Академии наук Молдавской ССР, вероятно, смогут войти составной частью в алгоритмы, применяемые исследователями других институтов.

Планомерность исследований и творческая взаимосвязь различных институтов и лабораторий страны, отсутствие «фирменных секретов» широкий обмен информацией — важные преимущества нашего социалистического строя. И наша лаборатория хорошо это чувствует. Такие ученые-энергетики, как Т. Л. Золотарев, В. А. Веников, Л. А. Мелентьев, Х. Ф. Фазылов, Н. А. Мельников, Л. В. Цукерник, В. И. Попков, И. М. Маркович, В. И. Обрезков, Л. А. Крумм, Ю. П. Сыров, Л. А. Солдаткина, Д. О. Сейфулла и др. много помогли Отделу в постановке и проведении исследований, в обсуждении их результатов.

Ниже кратко излагаются основные научные результаты работы лаборатории и пути дальнейшего направления исследований.

1. Прогнозирование уровня и режима электропотребления

Прогнозирование суточных графиков активной нагрузки

Были изучены данные об электропотреблении республики за длительный период (1956—1965 гг.) и определены численные характеристики режимов (суточного, недельного, годового).

В результате статистически-вероятностной обработки суточных режимов потребления определены осредненные (типовые) графики активной нагрузки с некоторым доверительным интервалом, имеющим заданную обеспеченность [1]*. При планировании по верхней границе доверительного интервала составляется рациональный баланс мощностей энергосистемы при прохождении максимума нагрузки, по нижней выбирается состав оборудования и проверяется его режим в ночное время, по средней линии планируется суточное потребление и выработка станций. Применение доверительных интервалов дает более обоснованные методы планирования режима нагрузки. На рис. 2 показаны типовые зимний и летний графики нагрузки нормального рабочего дня Молдглавэнерго с указанием доверительного интервала.

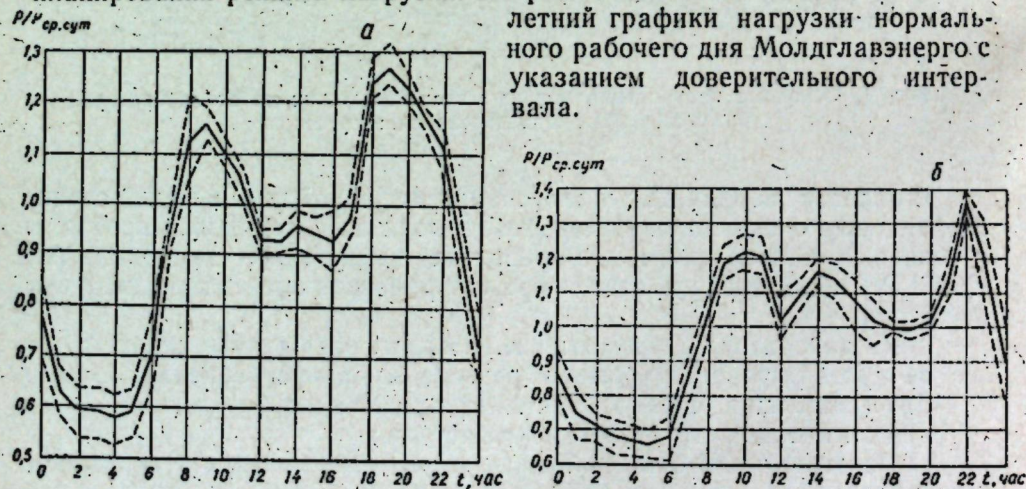


Рис. 2. Типовые графики активной нагрузки Молдглавэнерго: а — декабрь; б — июль.

Прогнозирование уровня потребления активной электроэнергии

При прогнозировании уровня потребления активной энергии использовались корреляционные связи между уровнями электропотребления и общим валовым выпуском промышленной продукции республики [1]. Для учета влияния структуры потребителей используются корреляционные связи между потреблением энергии в данной отрасли и выпуском продукции. Пример такой связи для некоторых отраслей промышленности Молдавской ССР приведен на рис. 3.

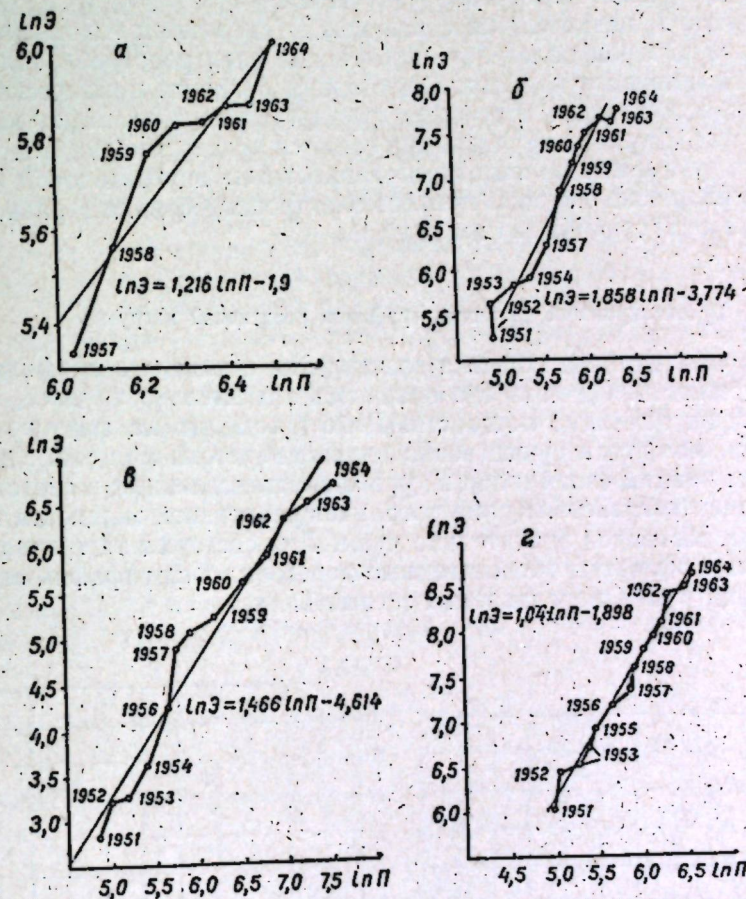


Рис. 3. Связь между потреблением электрической энергии и выпуском продукции:

- а — легкая промышленность;
- б — пищевая промышленность;
- в — машиностроение и металлообработка;
- г — вся промышленность республики

На основании полученных закономерностей и численных характеристик разработана и начинает применяться методика прогноза режимов электропотребления для небольших (республиканских) энергосистем на срок до пяти лет (краткосрочный прогноз) с использованием принципа непрерывности производства и планирования не только внутри интервала один год, но и в расширенном интервале по смежным годам.

* Расчеты выполнены М. Л. Мисником при участии Л. А. Пословской.

В небольших энергосистемах годовые приросты электропотребления сильно отличаются от среднесезонных, поэтому применение среднесезонных приростов для прогнозирования приводит к большим ошибкам. Ошибки существенно уменьшаются, если годовой прирост разделить на две части: естественный прирост, образующийся за счет ввода потребительских мощностей в предыдущем году, и внутригодовой прирост, зависящий от ввода потребительских мощностей в текущем году. Сезонные изменения режима нагрузки носят устойчивый характер и величина внутригодового прироста предыдущего года равна величине естественного прироста следующего прогнозируемого года.

Существует непрерывная связь между смежными годовыми приростами, учет которой облегчает определение электропотребления и максимальной мощности на ближайшее время. Наличие циклических колебаний прироста пиковых нагрузок в двухлетнем периоде было выявлено и в ФРГ [2]. Двухлетние циклы появляются вследствие указанной выше связи между смежными годовыми приростами: внутригодовой прирост нагрузки влияет на годовой прирост электропотребления в равной мере на данный и следующий за ним год.

Прогнозирование суточных графиков реактивной нагрузки

Была предпринята попытка составления и типового графика реактивной мощности. Сделать это оказалось значительно труднее, чем типовой график активной мощности. Дело в том, что на форму графика реактивной мощности существенно влияют перетоки мощности по межсистемным линиям связи и общий уровень установленных в системе компенсирующих устройств. Кроме того, учет реактивной мощности в энергосистемах поставлен значительно хуже. Для составления типового графика были исключены межсистемные перетоки, а сам график строился лишь для нагрузки, передаваемой сетями 110 кв.

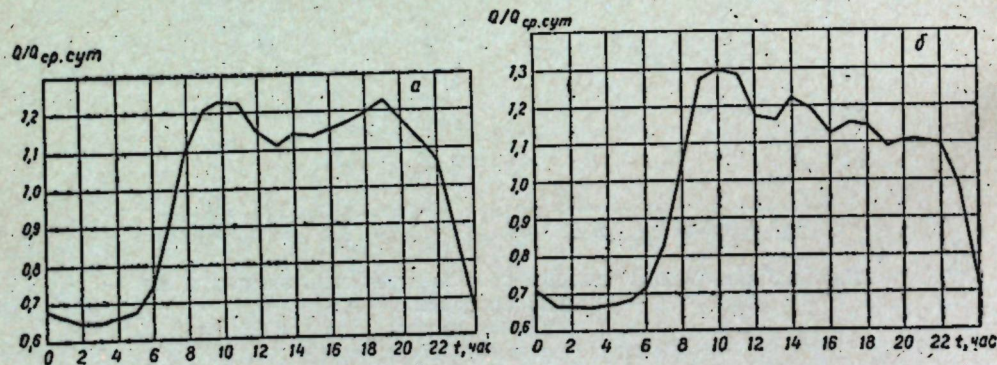


Рис. 4. Типовые графики реактивной нагрузки Молдглавэнерго:
а — декабрь; б — июль

Установить величину доверительного интервала не удалось из-за незначительного периода наблюдений (1962—1966 гг.). Форма типового графика для зимы и лета показана на рис. 4. Составление типового графика реактивной мощности и разработка методики прогнозирования уровня потребления реактивной энергии позволяют более обоснованно

определять баланс мощностей и правильно размещать источники реактивной мощности в энергосистеме.

Весьма полезным оказался совместный анализ графиков активных и реактивных мощностей. Выяснилось, что существует тесная связь между формой графиков реактивной нагрузки энергосистемы и активной промышленной нагрузки. График реактивной нагрузки энергосистемы определенным образом корректируется. В часы пик при корректировке снимается осветительнобытовая нагрузка (сравнением графиков рабочего и воскресного дней). В ночное время учитывается генерация реактивной энергии линиями электропередач и изменение соотношения активных и реактивных потерь в трансформаторах. Полученный график промышленной нагрузки позволяет сравнивать его с типовыми графиками и проверить их представительность. Эти графики позволяют судить об эффективности мероприятий по уплотнению графика нагрузки энергосистемы.

Определение естественных коэффициентов мощности ряда отраслей

Были изучены естественные коэффициенты мощности 54 предприятий, относящихся к пяти характерным для Молдавии отраслям промышленности*. На этих предприятиях были сняты суточные графики активной и реактивной мощности нагрузок и график напряжения. Замеры производились в наиболее загруженный день недели (пятница) и определялись по часовым показателям счетчиков (среднечасовые величины). Стабильность коэффициентов мощности для отрасли оценивалась с помощью вычисления среднеквадратичного отклонения. Если напряжение в момент замера было низким, то результаты пересчитывались на номинальное напряжение с использованием типовых статических характеристик.

В результате были получены значения естественных коэффициентов мощности [3], величина которых в ряде случаев меньше значений, рекомендуемых институтом Энергосетьпроект (данные приведены в таблице):

Промышленность	Естественный коэффициент мощности	
	по данным замеров	по данным института Энергосетьпроект
Трикотажная и швейная	0,730	0,75
Электротехническая	0,799	0,80
Легкая	0,732	0,75
Пищевая	0,576	0,75

Особенно велико расхождение в пищевой промышленности. Мы надеемся, что повторение этих исследований внесет ясность и уточнит полученные цифры. Однако уже сейчас видно, что использование типовых величин естественного коэффициента мощности в ряде случаев может привести к большому дефициту реактивной мощности.

* Обработку и анализ данных энергосбыта Молдглавэнерго провели инженеры Д. И. Гороховир и А. Г. Панфилова.

II. Вопросы оптимизации режимов энергосистемы

Методы построения энергетических характеристик агрегатов

Исходными данными для оптимизации режимов параллельной работы служат энергетические (расходные) характеристики электромеханического оборудования электростанций. Они получаются в результате специально проводимых довольно сложных и дорогих энергетических испытаний или по данным аналогичных (типовых) установок. Последние данные не очень достоверны. Отметим, что и характеристики, вычисленные в результате специальных наблюдений, не дают гарантии в их точности, хотя и считаются в настоящее время наиболее достоверными. Их снимают при специальном очень устойчивом режиме. Фактически в процессе эксплуатации неизбежны переходные режимы. Для регулирующих станций весь режим работы — сплошной переходной режим, а этого не учитывают характеристики, полученные при устойчивом режиме.

В лаборатории был разработан метод вычисления энергетических характеристик и гидравлических агрегатов по данным нормальной эксплуатации*. Построение энергетических характеристик агрегата по данным нормальной эксплуатации из-за большой трудоемкости расчетов осуществляется на БЭСМ-2М. За основу берутся часовые нагрузки исследуемого агрегата за несколько суток (из диспетчерских ведомостей) и суммарный расход топлива.

Искомая энергетическая характеристика представляется в виде полинома высокой степени; коэффициенты которого пока неизвестны. Зная электрическую нагрузку каждого часа, можно подсчитать расход топлива, который имел бы место, если бы энергетическая характеристика точно отвечала принятой зависимости. Разница между фактическим и вычисленным расходом топлива за сутки образует невязку.

Коэффициенты полинома выбирают таким образом, чтобы сумма квадратов этих невязок была минимальной. Решение задачи сводится к решению большой системы линейных уравнений [4]. Аналогично строится характеристика и для гидроагрегатов. Дополнительные исходные данные дает график изменения напора ГЭС за сутки, поскольку расход ресурса (воды) зависит здесь не только от мощности, но и от напора. (Функция двух переменных). Для теплофикационных агрегатов следует учесть несколько переменных.

Анализ точности распределения нагрузки по методу дифференциальных показателей

Было показано, что уравнение наивыгоднейшего распределения нагрузки, записанное в форме И. М. Марковича [5], может быть упрощено для электростанций, связанных однородной электрической сетью [6]. В сокращенном виде уравнение имеет вид:

$$\frac{b_{i1}(1-\sigma_1)}{1-\sigma_1-\sigma_1^2} = idem,$$

где b — дифференциальный показатель расхода топлива (воды) на электростанции;

λ — цена топлива на ТЭС или коэффициент энергетической эффективности использования гидроресурса (для ГЭС)

* Метод разработал инженер М. В. Гродецкий.

$\sigma = \frac{\partial P^n}{\partial N}$ — дифференциальный показатель активных потерь P^n в сети;

$\sigma^Q = \frac{\partial Q^n}{\partial N}$ — дифференциальный показатель реактивных потерь Q^n в сети.

В отличие от формулы И. М. Марковича это уравнение содержит только две (вместо четырех) трудноопределимые частные производные по потерям в сети. Оно может быть использовано почти всегда, так как параллельная работа линий высокой неоднородности оказывается неэкономичной и не может быть рекомендована без проведения специальных мероприятий.

Использование сокращенной записи позволило оценить величину абсолютной и относительной ошибок, вызванных часто встречающимся на практике неучетом дифференциального показателя реактивных потерь σ^Q . Удалось оценить и суммарную максимально возможную ошибку определения дифференциального показателя расхода топлива, приведенного к шипам потребительской подстанции Δb^{pp} [7].

$$\Delta b^{pp} = \Delta b_* + \Delta \lambda_* + \frac{\Delta \sigma^Q \sigma}{1 - \sigma^Q} + \frac{\Delta \sigma^Q \cdot \sigma^Q + \Delta \sigma \sigma}{1 - \sigma - \sigma^Q}.$$

здесь Δb_* — относительная ошибка определения дифференциального показателя расхода топлива (воды) на станции;

$\Delta \lambda_*$ — относительная ошибка определения коэффициента энергетической эффективности расхода топлива (цен) ресурса;

$\Delta \sigma$ и $\Delta \sigma^Q$ — относительная ошибка в определении дифференциального показателя соответственно для активных и реактивных потерь.

Было показано, что основная ошибка вносится двумя первыми членами. Вероятная погрешность величины Δb^{pp} может быть определена по приближенной формуле.

$$\Delta b^{pp} = (1,6 \div 1,8) \Delta b_*.$$

Вероятная ошибка позволила дать приближенные формулы для оценки перерасхода топлива. В этом направлении и продолжается сейчас работа.

Применение метода динамического программирования для оптимизации режима и выбора состава работающего оборудования

Оказалось весьма эффективным применение этого метода для оптимизации внутростанционного распределения нагрузки с одновременным выбором наивыгоднейшего состава работающего оборудования. Если два агрегата с характеристиками $Q_1 = Q(N_1)$ и $Q_2 = Q(N_2)$ покрывают нагрузку P , то расход воды (топлива) станции определяется из соотношения

$$Q_{\Sigma} = Q_1(N_1) + Q_2(P - N_1),$$

поскольку при произвольной нагрузке первого агрегата, равного N_1 , нагрузка второго агрегата может быть равна лишь $P - N_1$, что следует из баланса мощности.

Перебирая, с постоянным шагом, все возможные значения нагрузки N_1 , можно найти то единственное значение N_1^0 , которое соответствует минимуму целевой функции $Q_{эс}$. Изменяя в допустимых пределах нагрузку P , можно получить ряд значений оптимальной мощности первого агрегата и определить зависимость минимального расхода Q^0 от нагрузки. Это будет эквивалентная характеристика двух агрегатов (первого и второго)

$$Q^0 = f(N_1^0).$$

Она построена при оптимальном распределении нагрузки между этими агрегатами. При этом некоторым значениям нагрузки P могут соответствовать нулевые оптимальные нагрузки одного из агрегатов. Если считать, что агрегат с нулевыми нагрузками отключается, то эквивалентная характеристика (одновременно с наимыгоднейшим распределением нагрузки) определяет оптимальный состав работающего оборудования, вычисленный, однако, без учета пусковых расходов.

Для поиска оптимальной нагрузки третьего агрегата рассматриваются полученные эквивалентная и его энергетическая характеристики. В результате рассчитывается эквивалентная характеристика трех агрегатов. Так последовательным сведением к схеме двух машин происходит оптимальное распределение нагрузки электростанции. Окончательные нагрузки каждого агрегата находятся «обратным ходом», типичным для метода динамического программирования.

В процессе построения эквивалентной характеристики автоматически выбирается и оптимальный состав работающего оборудования. Это натолкнуло на мысль использовать метод и для выбора оптимального состава с учетом пусковых расходов. Для этого пришлось сочетать метод динамического программирования с итерационными методами*.

Проиллюстрируем работу такого алгоритма на примере оптимизации режима работы ГЭС. Сначала выбирается состав агрегатов и назначается режим их работы без учета пусковых расходов (как это описано выше). Такой расчет проводится последовательно за все часы суток. Для каждой машины определяются часы простоя и работы. Методами последовательных приближений вводится уточнение в границы простоя, для чего несколько сокращают интервал простоя. Это приводит к последующему сокращению пусковых расходов (за счет сокращения времени остывания агрегата), но увеличивает расход топлива в моменты, когда нарушен оптимальный состав работающего оборудования. Находится такое изменение границ простоя, которое приводит к максимальному сокращению расхода топлива.

Проверяя затем режим последующей работы агрегата и возможность его замены каким-либо другим, уточняют момент включения и отключения первого исследуемого агрегата. Его режим работы фиксируется и уточняются режимы работы следующего агрегата сначала без учета пусковых расходов, а затем уже описанным способом уточняются его границы простоя и т. д.

Наиболее характерной для такого алгоритма оптимизации режима и состава работающего оборудования является вариация режима не только по мощности, как это обычно и делалось, но и по времени как по

* Метод разработал инженер С. Г. Злотник при участии В. А. Шмольской, Г. В. Спиридоновой, Л. С. Пятковой, П. Г. Краккера и др.

независимой переменной. Использование переменного времени для оптимизации режима по методу дифференциальных показателей встречается также в работе чехословацкого инженера В. Менкина [8].

В лаборатории был разработан алгоритм оптимизации состава и режима работы и для гидроэлектрической станции (рис. 5). Для ГЭС характерна независимость пусковых расходов от времени простоя.

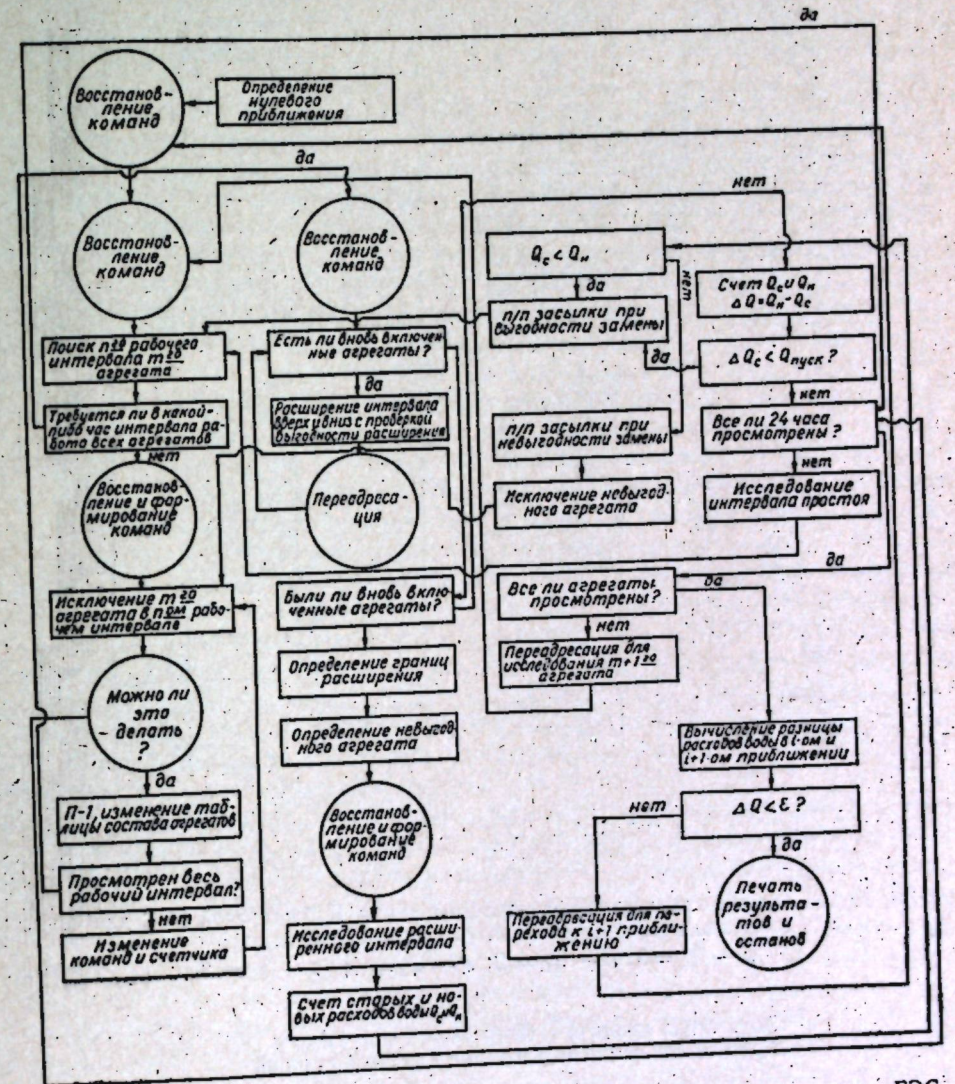


Рис. 5. Блок-схема алгоритма оптимизации внутростанционного режима ГЭС

На рис. 6 показан пример оптимизации состава и распределения нагрузки для одного суточного режима между агрегатами четырехагрегатной Дубоссарской ГЭС при четырех значениях пусковых расходов. Точками показаны часы, в которые данный агрегат включен. Пример был просчитан на ЦВМ БЭСМ-2М. В настоящее время проводится усовершенствование указанных программ и просчет некоторых реальных режимов (в том числе и для некоторых других ГЭС).

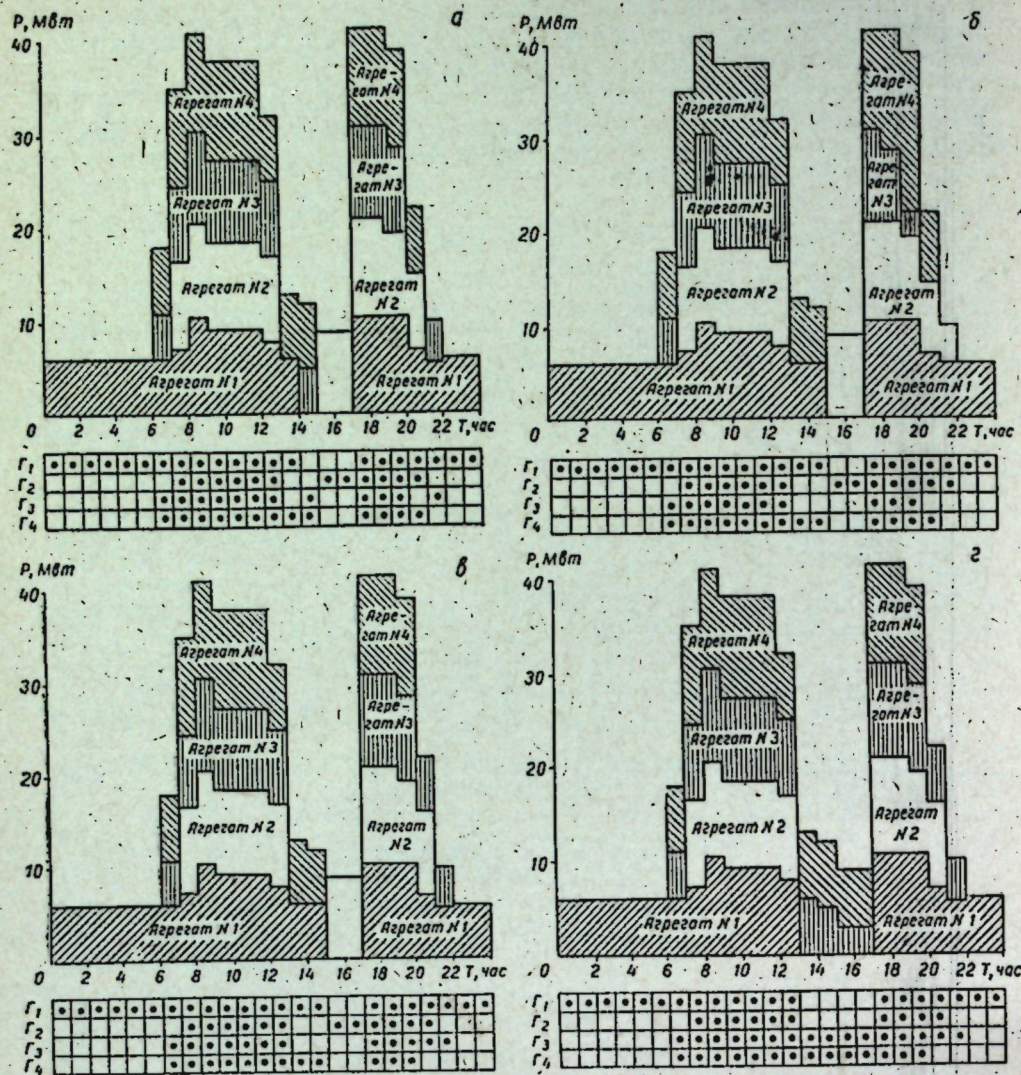


Рис. 6. Пример оптимизации одного суточного режима Дубоссарской ГЭС для четырех значений пускового расхода (в условных единицах):

$$а - Q_n = 0; б - Q_n = 2; в - Q_n = 4; г - Q_n = 8.$$

Энергетика орошения. Потребители-регуляторы.
Круглогодичное использование насосных станций

При осуществлении орошения в Молдавии одной из серьезнейших явится проблема рационального электроснабжения насосных станций, так как для этого потребуются весьма большие мощности. Так, по подсчетам Харьковского филиала института Гидропроект только для орошения Бельцкой степи необходима мощность порядка 300 тыс. квт, для орошения юга Молдавии — свыше 440 тыс. квт. Общая установленная мощность трансформаторных подстанций при полном орошении превысит, по-видимому, 1 млн. квт с годовой потребностью около 2—2,5 млрд. квт·ч.

Единичные мощности насосных станций также велики. По тем же данным, у села Вертужаны предполагается строительство насосной станции мощностью 230 тыс. квт. Это в пять раз превысит мощность Дубоссарской ГЭС. Такие большие мощности существенно повлияют на развитие высоковольтных сетей, на их трассы и напряжения, радиусы охвата и расположение подстанций, темпы ввода и места установки новых генерирующих мощностей и потребуют значительных капитальных вложений.

До последнего времени нагрузки орошения не учитывались при составлении энергетического баланса Молдавской ССР и юга Украины. В «Генеральной схеме орошения Молдавии», составленной в 1965 г. Укргидропроект, вопросы энергоснабжения не рассматриваются. Перспективная схема электроснабжения Молдавии, разработанная ВНИИПИСельэлектро, также не учитывает нагрузок крупномасштабного машинного орошения. Не входят эти нагрузки и в перспективную схему электроснабжения, разрабатываемую Львовским отделением института Энергосетьпроект. По нашему мнению, следовало бы уже сейчас учесть режим оросительной нагрузки юга Молдавии при проектировании ЛЭП от Молдавской ГРЭС в Народную Республику Болгарию.

Рационализация электроснабжения оросительных систем с целью сокращения капитальных вложений представляет важную народнохозяйственную проблему и требует проведения широких комплексных научных исследований. Предварительные проработки, проведенные в Академии наук Молдавской ССР и в Отделе водохозяйственных проблем Госземводхоза Молдавской ССР, показывают, что рациональное вписывание режима насосных станций в общесистемный график электрической нагрузки может дать ощутимый народнохозяйственный эффект. Он заключается в снижении установленной электрической мощности энергосистемы за счет принудительного уплотнения графика и использования насосных станций как потребителей-регуляторов и насосно-аккумулирующих станций. Это приведет к круглогодичному использованию насосных станций, то есть к значительному повышению эффективности капитальных вложений. Кроме того, оросительные станции могут явиться крупным источником пиковой мощности для молдавской энергосистемы, что, вместе с регулированием графика, приведет к улучшению режима тепловых станций, к повышению надежности электроснабжения и к экономии топлива на тепловых станциях систем. При таком режиме насосных станций существенно сокращаются капитальные вложения в электрические сети и подстанции, уменьшаются потери энергии.

Для реализации этих преимуществ режима следует установить на ряде насосных станций обратимые гидроагрегаты и снабдить станции относительно небольшими бассейнами суточного регулирования. Однако технико-экономическое обоснование такого варианта орошения, как уже было сказано, требует серьезного комплексного научного исследования с использованием математических методов и вычислительной техники. Комплексные исследования должны проводиться с привлечением ученых-экономистов, энергетиков, мелиораторов, гидроэнергетиков, геологов и др. Значение этих работ для Молдавии трудно переоценить. Следует особенно подчеркнуть, что осуществить такую работу без привлечения дополнительных средств и новейшего научного оборудования не представляется возможным. Неоднократные попытки «глазомерного» решения этой сложной проблемы, требующей серьезных расчетов, подтвердили полную несостоятельность такого подхода.

Другими перспективными потребителями-регуляторами в Молдавии могут служить электропарники, а также электрообогрев производственных помещений и открытого грунта. Начаты работы по проверке теплоаккумулирующей способности электропарников с одновременной доработкой их конструкции*.

III. Оптимизация структуры энергосистем

Поиск оптимальной надежности энергоснабжения от энергосистемы

Работы в этой области еще только начались. Первый круг исследований касался выбора оптимальной степени надежности энергоснабжения. Полученные здесь результаты следует считать сугубо приближенными.

Индекс надежности, принятый в США, равен 0,999, индекс надежности в СССР выше — равен 0,9999. Обе цифры экономически не обоснованы. Академик Л. А. Мелентьев считает, что сам по себе выбор оптимальной надежности энергоснабжения не является важной проблемой, поскольку при изменении надежности на одну десятичную количество резервных агрегатов меняется мало [9]. Противоположной точки зрения придерживается И. М. Маркович. Он считает определение оптимальной надежности одной из важных задач [5].

Для проверки этих утверждений была составлена математическая модель развития энергосистемы, подобной Молдглавэнерго, на двадцатилетний срок. Причем для простоты предполагалось, что система будет наращивать свои мощности путем ввода блоков 200 мва. Составлялся прогноз нагрузки по постоянной величине годового прироста максимальной мощности потребителей. Ход годового максимума принимался по синусоидальной кривой согласно [10]. Блок-схема расчета оптимальной надежности приведена на рис. 7.

Составлялся график ремонтов оборудования, вычислялась величина располагаемой мощности системы и находилось число резервных агрегатов, необходимое для поддержания заданной надежности. Оценивался ущерб, связанный с отключением всех резервных и одного, двух, трех и т. д. рабочих агрегатов. Перестройкой типовых суточных графиков в график продолжительности нагрузки определялась продолжительность аварийного отключения и вычислялось количество аварийно недоданной энергии. Стоимость ущерба определялась с учетом действия автоматической частотной разгрузки, отключающей в первую очередь потребителей с низкой стоимостью ущерба.

По типовым энергетическим характеристикам оборудования и среднесуточной нагрузке определялся месячный расход топлива и вычислялась величина дополнительного омертвления капитальных вложений, вызванная более ранним включением генерирующих мощностей при более высоком стандарте надежности. Полученные предварительные результаты**, которые еще требуют проверки, свидетельствуют о целесообразности некоторого снижения стандарта надежности до величины 0,99—0,999 при принятых стоимостях ущерба.

* Исследование выполняет к. т. н. Н. Н. Романенко при участии Н. Ф. Морозовой.
** Расчеты выполнены Л. Ф. Герасимовой.

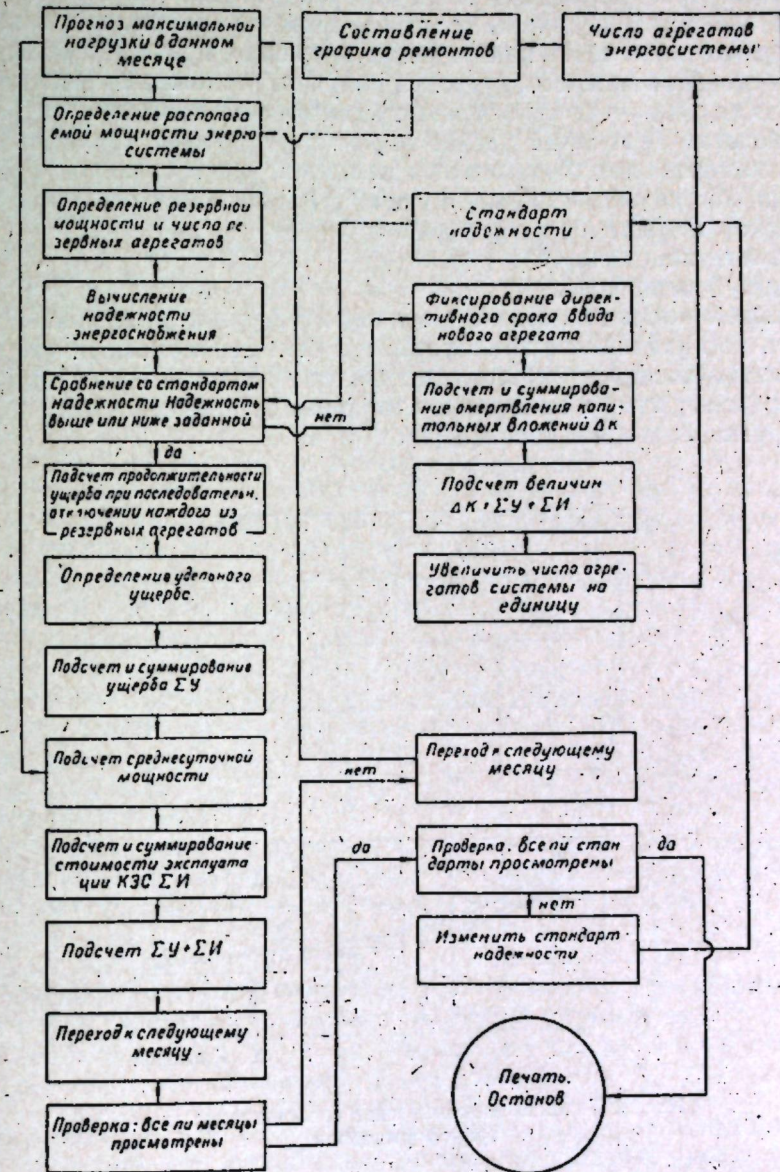


Рис. 7. Блок-схема алгоритма расчета оптимальной надежности электроснабжения

Влияние развития энергосистемы на технико-экономические показатели сопоставимых вариантов

При математическом моделировании развития энергосистем не всегда учитывают постепенный характер нарастания нагрузки, хотя период освоения установленной мощности подстанций и линий электропередач составляет часто 5—10 лет. Это приводит к недоиспользованию вложенных средств, повышает себестоимость передачи электрической энергии.

Приняв простую модель роста нагрузки, характеризующуюся неизменным значением величины годового прироста, и считая, что полезно используется лишь часть капитальных вложений, пропорциональная величине освоенной мощности, удалось получить несложные аналитические зависимости для учета омертвления капитальных вложений [11]. Был проведен иллюстративный расчет выбора типоразмера трансформатора с учетом омертвления капитальных вложений при постоянном росте нагрузки и последующей реконструкции*. Рассматривалось четыре случая (рис. 8). Выбирался трансформатор:

меньшей мощности (1);

большой мощности (2);

меньшей мощности. После его полной загрузки он демонтировался и взамен устанавливался трансформатор большей мощности (3);

меньшей мощности, но устанавливался в ячейке, допускающей установку трансформатора следующего габаритного размера. После его полной загрузки он демонтировался (4).

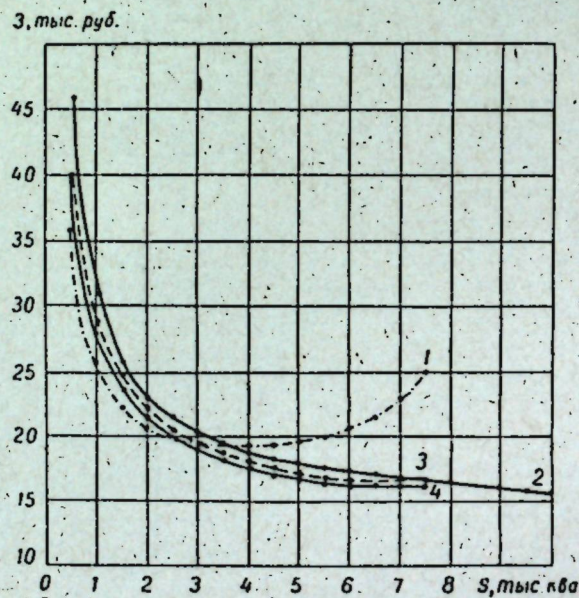


Рис. 8. Техничко-экономическое сопоставление двух трансформаторов

Для того чтобы сделать сопоставимым вариант 1 со всеми остальными, условно считалось, что после полной загрузки трансформатора к нему дополнительно подключается новый условный трансформатор, мощность которого равна разнице мощностей большого и малого трансформаторов, а удельные капиталовложения и удельные потери такие же, как и у большого трансформатора.

При сопоставлении учитывались начальные и последующие капитальные вложения, омертвление средств, потери активной и реактивной энергии в стали и меди, затраты на демонтаж и ликвидная стоимость оборудования. Годовой прирост нагрузки был принят постоянным

* В работе принимала участие И. И. Лумер.

(12,5%). Учет омертвления был проведен по методике, разработанной в [11] (использовалась формула сложных процентов).

Расчет проводился на ЦВМ для всей старой серии трансформаторов, данные о которых приведены в [12]*. Для иллюстрации были сопоставлены два трансформатора мощностью 7500 и 10 000 кВА (рис. 8). Графики построены в осях: расчетные затраты Z, начальная загрузка трансформатора S. В указанном случае установка трансформатора малой мощности целесообразна, если начальная нагрузка не превышает ~30% номинальной мощности большого трансформатора. Полученные цифры отличаются от рекомендаций, изложенных в [13], где омертвление капитальных вложений не учитывалось. Там рекомендуется применять трансформатор большей мощности в случае, если начальная нагрузка превышает 80%.

Обычно технико-экономическое сопоставление производится при неизменной величине ежегодных издержек, связанных с эксплуатацией варианта, что для энергетики не характерно. Рост нагрузки приводит к непрерывно возрастающим ежегодным издержкам. Для сопоставления вариантов применяется эквивалентирование, то есть замена переменных затрат условно-постоянными эквивалентными затратами. Д. А. Арзамасцев [14] предложил метод эквивалентирования с одновременным выбором срока сопоставления вариантов. Наши работы показывают, что для предварительных расчетов можно приводить переменные затраты к постоянным за нормативный срок [15]. Это не снимает трудностей, связанных с теоретическим обоснованием длительности расчетного периода.

Идея учета омертвления капитальных вложений можно применить и к оценке деятельности строительного предприятия. Рентабельность его работы можно оценивать по величине омертвления государственных средств, вызванных срывом сроков ввода объекта или окончания его отдельных циклов [16].

По нашему мнению, величину начальной нагрузки и предполагаемый темп ее роста следовало бы учитывать при обосновании экономической плотности тока. Это согласуется с выводами работы [17].

IV. Некоторые вопросы, связанные с оптимальным проектированием электрической сети и расчетом ее режимов

Оптимизация трассы сети

Возможна оптимизация трассы воздушной линии электропередач, предназначенной для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей второй и третьей категорий. В этом случае электроснабжение выполняется по магистральной схеме ветвящейся ЛЭП с отпайками. Предполагается, что точка разветвления сети может или совпадать или не совпадать с одним из нагрузочных узлов.

Оптимальной считалась сеть с минимальными расчетными затратами на ее сооружение и эксплуатацию (с учетом потерь энергии). При сооружении сети должны быть учтены ограничения и затруднения по трассе. Место установки, мощность и коэффициент мощности потребителей считались заданными. Ущерб от перерыва электроснабжения не учитывался [18].

* Получить все данные о трансформаторах новой серии в то время не удалось.

Алгоритм реализуется на ЦВМ БЭСМ-2М*. Принят итерационный метод расчета. Его особенность заключается в нанесении ряда промежуточных трасс на план местности для последующего учета ограничений и запретов. При реализации алгоритма были использованы некоторые результаты работ Н. Г. Гейнина, В. К. Плюгачева, М. С. Левина, А. Э. Каждана, И. Б. Моцкуса и проработки, проведенные в Отделе энергетической кибернетики АН Молдавской ССР. Ниже приводится последовательность операций при построении оптимальной трассы сети.

1. По одному из известных алгоритмов (например, по алгоритму Д. Бержа) строится дерево кратчайшей длины, связывающее все нагрузочные узлы. В большинстве случаев его построение целесообразнее осуществлять вручную. Полученное дерево разбивается на «ветки» таким образом, чтобы каждая вершина графа была соединена не более чем с двумя другими вершинами. Дерево кратчайшей длины дает оптимальную последовательность обхода точек.

2. На основании принятого порядка обхода точек строится ветвящаяся сеть кратчайшей длины, связывающая все пункты электроснабжения. Она не является оптимальной по расчетным затратам. Такая сеть называется «псевдооптимальной сетью» и используется как нулевое приближение оптимальной сети. Она состоит из нескольких ветвящихся на три луча участков. Угол между разветвляющимися участками или в точности равен 120° или больше этой величины. Построение такой сети описано ниже — в пункте 6.

3. Выбирается тип или мощность потребительских трансформаторов, сечение участка линий (по экономической плотности тока) и производится электрический расчет сети и уточнение выбранных сечений по допустимому падению напряжения. Электрический расчет и выбор параметров сети производится по алгоритму, напоминающему алгоритм расчета сельских распределительных сетей, разработанный в ВИЭСХе под руководством М. С. Левина [19].

4. Определяются расчетные затраты, приходящиеся на 1 км сети на каждом участке.

5. Вычисляются $\angle \alpha$ — оптимальный угол расхождения отпаяк и $\angle \beta$ — оптимальный угол отклонения отпайки от направления магистрали [18].

6. Определяются координаты центров оптимального разветвления сети. Для определения точек разветвления за основу было принято графическое построение, предложенное А. Э. Кажданом [20]. Для реализации этого алгоритма на ЦВМ его пришлось перевести на язык аналитической геометрии. При переводе возникли трудности, связанные с выбором нужного решения из большого числа возможных. По этому же алгоритму строится и «псевдооптимальная сеть». Различие заключается в том, что эта сеть является частным случаем оптимальной сети (случай $\angle \alpha = \angle \beta = 120^\circ$).

7. Полученные центры ветвления наносятся на план местности и определяют собой первое приближение оптимальной трассы.

8. Наносятся и уточняются все ограничения и запреты на прохождения линий. Выявляются участки, на которых условия трассы значительно влияют на величину расчетных затрат. Уточняется величина расчетных затрат.

9. Повторяется пункт 6 до удовлетворительного совпадения.

* В работах принимали участие Б. И. Чиник, М. А. Чиник и А. И. Мухина.

В настоящее время заканчивается отладка основных блоков программы. Предварительные результаты свидетельствуют о том, что время счета для ЛЭП с 40—50 точками ветвления будет незначительным. Экономия по расчетным затратам составит около 7—12% по сравнению с результатом, полученным опытным проектировщиком. Указанный алгоритм позволяет, кроме того, более обоснованно подойти к выбору места расположения районной подстанции.

Некоторые методы расчета потокораспределения

Расчет потокораспределения в сложносвязанной электрической сети является сегодня неперенным элементом расчета энергосистем. Однако существующие методы решения этой задачи, из которых наиболее распространены для ЦВМ метод узловых напряжений [21], не могут считаться окончательно отработанными и дающими надежные результаты. До сих пор нет способа, позволяющего установить в достаточно общем виде, имеет ли указанная нелинейная система с коэффициентами и переменными, записанными в виде комплексных чисел, решение или такого решения нет. Единственный критерий здесь — счет на ЦВМ. Если спустя некоторое (достаточно большое) время итерационный процесс не заканчивается и машина не останавливается, говорят, что процесс не сходится. Косвенным контролем является проверка полученных напряжений в узлах. Если они значительно ниже по сравнению с допустимыми, продолжать итерационный процесс бессмысленно.

Учет статистических характеристик нагрузки несколько улучшает процесс сходимости, но многие исследователи возражают против их учета при решении проектных задач. Их возражения основываются на том, что проектируемые нагрузки должны относиться не к номинальному, а к эксплуатационному напряжению. Были предприняты поиски более простых методов расчета распределения. Очень перспективным оказалось использование определяющих напряжений [22].

На рис. 9 приведен пример простой схемы, содержащей шесть узлов. Узел 1 выбран в качестве балансирующего, напряжение в нем предполагается известным и неизменным. Для расчета потокораспределения по методу узловых напряжений нужно рассчитать систему из пяти нелинейных уравнений и определить пять значений напряжений в узлах 2—6. С учетом комплексности чисел придется решить систему из десяти уравнений. Однако, чтобы однозначно определить потокораспределение, достаточно знать только два узловых напряжения: в узлах 2 и 4. В самом деле, зная напряжение узлов 1 и 4, можно определить поток мощности на участке 1—4, а зная напряжение узлов 2 и 4, — поток на участке 2—4. Используя баланс токов в узле 4, найдем поток по линии 4—3 и напряжение узла 3 и т. д. Напряжение в узлах 2 и 4 однозначно определяет потокораспределение всей схемы, отчего узлы и были названы определяющими (по аналогии с определяющими токами). Название предложено проф. Н. Г. Максимова [23].

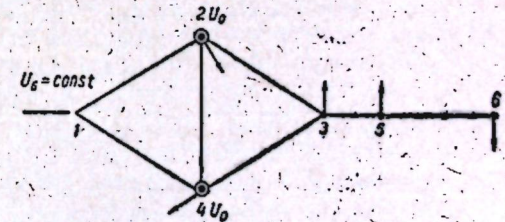


Рис. 9. Участок схемы сети с указанием определяющих узлов

Поиск этих определяющих узлов в сложных многоузловых схемах — сравнительно трудоемкая задача. Ее удалось решить при помощи ЦВМ БЭСМ-2М для сети, содержащей 150 узлов*. Следует подчеркнуть, что поиск определяющих узлов проводится только один раз, поскольку их положение зависит лишь от пассивной схемы соединения сети.

Использование определяющих узлов может резко сократить число независимых переменных n , кроме того, дать богатый информационный материал о поведении реальных энергосистем при различных режимах.

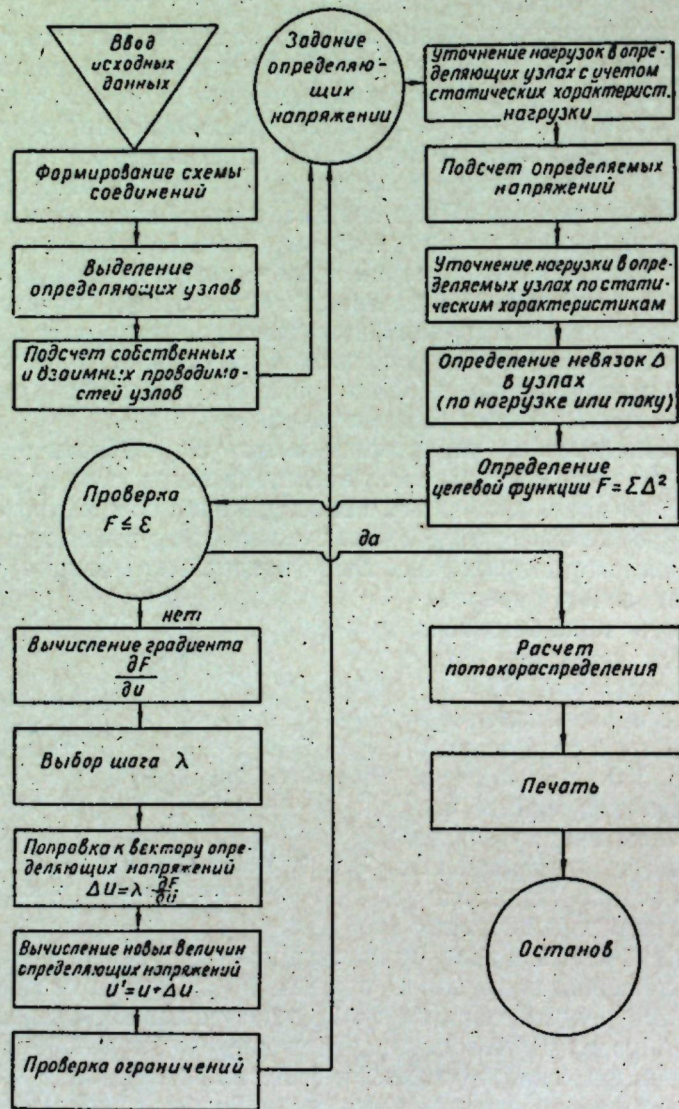


Рис. 10. Блок-схема алгоритма расчета потокораспределения сложной замкнутой сети по методу определяющих напряжений

* В работе принимали участие инженер М. А. Грицай, М. А. Чиник, А. Петрович, Г. В. Спиридонова.

С учетом этого было разработано несколько программ расчета потокораспределения. На рис. 10 приводится блок-схема разработанного в лаборатории алгоритма расчета потокораспределения по методу определяющих узлов путем сведения к задаче минимизации, решаемой стандартным градиентным методом.

Логика расчета. Сначала выявляются номера определяющих узлов и в них задается произвольная величина напряжения (нулевая итерация). Подсчитываются напряжения в остальных (определяемых) узлах и определяются небалансы мощности в некоторых узлах. Число узлов, в которых будет небаланс, значительно меньше полного числа узлов системы и равно количеству определяющих узлов. Сумма квадратов небалансов составляет целевую функцию, которая минимизируется изменением напряжения определяющих узлов. В настоящее время идет отладка такой программы.

Другой путь связан с использованием метода контурных токов. Удалось создать несложный алгоритм выбора оптимальной системы контурных уравнений, сводящийся к построению кратчайшего связующего дерева [22]. Это создает известные перспективы для применения этого метода.

Метод преобразования сети считался малопримемлемым для решения на ЦВМ. Однако удалось найти достаточно простую стратегию преобразования сложных схем путем многократного сведения к схеме ЛЭП с двусторонним питанием, одним концом которой служит балансирующий узел, другим — исследуемый.

Такой метод не может, по-видимому, считаться точным, но подход дает возможность, используя критерий Х. Ф. Фазылова [24], проверить устойчивость нагрузки в узле. Это, в свою очередь, позволит внести некоторую ясность в вопрос о сходимости и решаемости систем. Кроме того, применение указанного метода позволяет достаточно просто вычислять дифференциальные показатели потерь в энергетической сети σ и σ^Q (см. раздел II). Этот же метод оказался удобным для поиска оптимального размещения источников активной и реактивной мощности с использованием так называемых экономических потенциалов [25]*.

Работы лаборатории математического моделирования, основные результаты которых схематично и весьма кратко изложены в настоящей статье, явятся предварительной основой для разработки конкретных рекомендаций по поэтапному целесообразному развитию районных (республиканских) энергосистем, оптимизации их структуры и режимов.

Мы надеемся, что результаты исследований, проводимых в нашей лаборатории, представляют интерес не только для Молдавской, но и для других энергосистем страны, а частично, и для «большой энергетики».

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. М. Федорищенко, М. Л. Мисник. Использование методов математической статистики при анализе графиков нагрузки энергосистемы. Научно-техническое совещание по применению вероятностных и статистических методов при проектировании и эксплуатации энергетических систем и электрических сетей. Киев, 1963.
2. Fischer Klaus-Dieter. Die Belastungsentwicklung in der öffentlichen Elektrizitätversorgung der Bundesrepublik. Elektrizitätswirtschaft, 1964, 63, Nr. 18.
3. Д. И. Гороховир, А. Г. Панфилова. Экспериментальное определение естественных коэффициентов мощности некоторых отраслей промышленности Молдавии. «Изв. АН МССР», 1964, № 2.

* Расчеты выполнены инженером Д. И. Гороховиром.

4. М. В. Гродецкий. Алгоритм вычисления статических характеристик энергетических и других объектов. Тезисы докладов второй научно-технической республиканской конференции «Применение математических методов и вычислительной техники в народном хозяйстве Молдавии». Кишинев, 1965.
5. И. М. Маркович. Режимы энергетических систем. Изд. 3-е. М.-Л., 1963.
6. В. Г. Журавлев. Сокращенная запись уравнения наивыгоднейшего распределения нагрузки между электростанциями, связанными однородной электрической сетью. «Электричество», 1965, № 9.
7. В. Г. Журавлев. О допустимой ошибке величин, входящих в уравнение наивыгоднейшего распределения нагрузки. «Изв. АН СССР» (энергетика и транспорт), 1965, № 1.
8. Mankyna Vladimir. Kompletné koordinačné vzťahy pre optimálne rozdelenie zariadení a pre optimálny čas spúšťania a odstavenia vodných elektrární v zmiesanej elektrizačnej sústave. Strojnicky časopis SAV (1964), čís. 1, s. 66—76.
9. Л. А. Мелентьев, Е. О. Штейнгауз. Экономика энергетики СССР. М., Госэнергоиздат, 1963.
10. Т. Л. Золотарев. Гидроэнергетика. М., Госэнергоиздат, 1950.
11. В. Г. Журавлев. Технико-экономическая оценка периода освоения энергетических агрегатов большой и средней мощности. «Теплоэнергетика», 1964, № 9.
12. Справочник энергетика промышленных предприятий. М., Госэнергоиздат, т. 1, 1963.
13. Б. И. Клетеник. О выборе экономически целесообразного совещанию по вопросам совместной работы дальних электропередач и промежуточных систем. Новосибирск, 1963.
14. Д. А. Арзамасцев. Сравнение вариантов капиталовложений при изменяющихся во времени годовых эксплуатационных расходах. «Изв. вузов», (энергетика), 1964, № 8.
15. В. Г. Журавлев. По поводу статьи Д. А. Арзамасцева «Сравнение вариантов капиталовложений при изменяющихся во времени годовых эксплуатационных расходах». «Энергетика», 1966, № 3.
16. В. Г. Журавлев. Оценка деятельности строительного предприятия, сооружающего энергетический объект, по величине замораживания капитальных вложений при срыве сроков ввода сооружаемого объекта. В сб.: Электроэнергетика и автоматика, вып. 2. Кишинев (в печати).
17. В. А. Дале, З. П. Кришан, О. Г. Паэгле. Оптимизация электрических сетей при росте нагрузки. Рига, 1964.
18. В. Г. Журавлев, М. А. Чиник, Б. И. Чиник. Об определении оптимального угла расхождения отпаяк от высоковольтной линии электропередач. Электроэнергетика и автоматика, вып. 1. Кишинев, РИО АН МССР, 1965.
19. М. С. Левин. Расчеты распределительных сетей с помощью ЦВМ «Минск-1». «Электричество», 1963, № 4.
20. А. Э. Каждан. К определению оптимальной конфигурации электрической сети. «Изв. вузов» (электромеханика), 1964, № 4.
21. Н. А. Качанова, В. В. Умедьян. Расчеты установившихся режимов сложных энергосистем (на ЦВМ «Урал-2»). «Изв. АН СССР» (энергетика и транспорт), 1963, № 4.
22. М. А. Грицай. Преобразование матрицы проводимостей электрической цепи для нахождения определяющих узловых напряжений. «Изв. АН МССР», 1966, № 5.
23. Н. Г. Максимович. Линейные электрические цепи и их преобразования. М., Госэнергоиздат, 1961.
24. Х. Ф. Фазылов. Методы режимных расчетов электрических систем (к единому алгоритму расчетов). Ташкент, 1964.
25. Д. И. Гороховир, В. Г. Журавлев. Электрическая модель технико-экономических расчетов выбора оптимальной величины и размещения источников электрической энергии. «Изв. АН МССР», 1965, № 5.

М. Л. МИСНИК

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРОГНОЗ НАГРУЗКИ МОЛДАВСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Изменения электрической нагрузки отражают условия, специфические для каждого района: структуру потребителей, характер промышленного производства, быт населения, метеорологические и климатические особенности. Была поставлена задача исследовать изменения электрических нагрузок Молдавской энергосистемы, выявить их характерные особенности, дать количественную оценку с целью определения тенденций изменения нагрузки на перспективу. В качестве исходного материала использовались ежесуточные диспетчерские графики активной нагрузки энергосистемы с 1956 по 1965 г., что обеспечивает необходимую гарантию в правильности результатов.

Основные положения метода

Чтобы систематизировать огромное количество данных без потери достоверности информации, применялись вероятностно-статистические методы. Электрическая нагрузка энергосистемы для интервала времени Δt рассматривается как сумма большого числа взаимно независимых случайных величин, приемников электропередачи, ни один из которых не характеризуется исключительно большой по сравнению с другими дисперсией. При этом получаем нормальный закон распределения случайной величины. Нормальность распределения нагрузки как случайной величины была подтверждена во многих работах по электрическим нагрузкам и нигде не подвергалась сомнению.

Нормальный закон распределения характеризуется плотностью вида:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}},$$

где m — математическое ожидание (среднее значение для нормального распределения) случайной величины;
 σ — среднее квадратическое отклонение, характеризующее рассеяние нагрузки от среднего значения (σ^2 — дисперсия).
 При нормальном распределении нагрузка как статистическая величина в интервале времени полностью определяется средним значением и величиной среднеквадратичного отклонения от средней

$$P_t = P_{cp} \pm k\sigma,$$

где k — функция от вероятности $k = f(E)$;
 E — вероятность (принималось $E = 0,025$ [1]).

Систематизация исходных данных

Внутригодовые изменения режима потребления электроэнергии имеют следующие основные периодические колебания нагрузок:

а) суточные характеризуют изменение потребляемой мощности в течение суток;

б) недельные отражают изменения в суточном потреблении электроэнергии по дням недели;

в) годовые (сезонные) колебания характеризуют изменение потребления электроэнергии, среднесуточной мощности или максимума, зависящие от времени года.

По характеру внутринедельных периодических колебаний выделяются три основных типа суточных графиков: нормального рабочего дня; выходного и праздничного дня; послевыходного рабочего дня. При введении сокращенного рабочего дня с 1959 г. появился еще график сокращенного рабочего дня.

Воздействие одних и тех же факторов на величину нагрузки в разное время года неодинаково. Изменение температуры больше сказывается зимой, осенью и весной, когда заканчивается отопительный сезон. Весной на колебания нагрузки влияют также парники на электрообогреве (в зависимости от температуры и освещенности). Летом и осенью возрастает нагрузка на предприятиях, перерабатывающих сельскохозяйственное сырье. Их нагрузка зависит от типа и обеспеченности перерабатываемым сырьем, от погодных условий. Колебания подобного рода влияют на суточный график, а также на недельные колебания нагрузки. Поэтому не только нагрузка в течение суток рассматривается как случайная величина, но и внутринедельные ее изменения носят случайный характер. На рис. 1 показаны значения коэффициентов внутринедельной неравномерности за несколько лет по месяцам. Их колебания внутри месяца вокруг среднего значения имеют случайный характер и могут быть охарактеризованы средним значением и отклонением от него:

$$K_n^2 = K_{n, \text{cp}} \pm k\sigma; \quad K_v = K_{v, \text{cp}} \pm k\sigma.$$

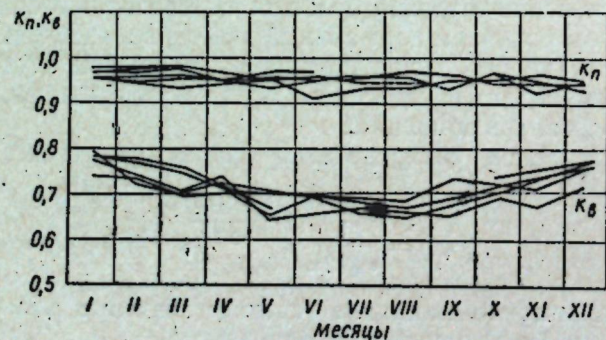


Рис. 1. Изменения коэффициентов внутринедельной неравномерности:

$$K_n = \frac{\bar{W}_n}{\bar{W}_{\text{н. р. д.}}}, \quad \bar{W}_n - \text{электропотребление за послевыходной и сокращенный рабочий день};$$

$$K_v = \frac{\bar{W}_v}{\bar{W}_{\text{н. р. д.}}}, \quad \bar{W}_v - \text{электропотребление за выходной и праздничный день}.$$

Есть колебания, которые действуют более длительное время и оказывают существенное влияние на потребление электроэнергии. Например, ранняя весна уменьшает расход электроэнергии на различные тепловые процессы, а дождливое лето и весна — на полив. В зависимости от погодных условий изменяются сроки созревания и переработки сельскохозяйственной продукции и т. д. Эти факторы больше влияют на годовой график. Следовательно, график сезонных изменений нагрузки также подвержен влиянию случайных причин, которые нельзя предвидеть даже на год вперед, но которые в каждом году по-своему влияют на годовой график. Поэтому его тоже можно представлять средним значением и отклонением от среднего. В качестве типового для энергосистемы следует брать средний график за несколько лет [2].

Получается единообразный подход к оценке всех величин, характеризующих электрическую нагрузку, и единая оценка, которая более полно отражает физический смысл и представляет электрическую нагрузку как случайную величину не только внутри суток, но и в интервале недели и в годовом интервале. При рассмотрении годового электропотребления за длительный период отклонение электропотребления за какой-либо год от общей линии, характеризующей тенденцию роста, также рассматривается как случайное.

При таком методе можно получать сравнимые данные об изменчивости отдельных параметров, характеризующих нагрузку энергосистемы, можно сравнивать эти параметры не только по абсолютной величине, но и по их устойчивости и сопоставлять эти величины с другими энергосистемами. Этот метод требует особого подхода к систематизации и группировке материала, чтобы исключить влияние периодических колебаний и непрерывного роста нагрузки на величину случайных колебаний σ .

Группируя графики внутри года по месяцам, получаем характерные графики для каждого месяца. Внутри месяца графики группируются по характерным дням с учетом внутринедельных изменений нагрузок. Для нормальных рабочих дней делается выборка в десять дней из средних чисел месяца для уменьшения влияния сезонных изменений. По этой выборке определяется средняя нагрузка для каждого часа и пересчитывается в относительные величины, приведенные к среднесуточной мощности нормального рабочего дня, по формуле

$$P_t^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{ti} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где P_t — нагрузка для часа t ;
 $\bar{P}_{\text{н. р. д.}}$ — среднесуточная нагрузка за нормальный рабочий день, определяемая по формуле

$$\bar{P}_{\text{н. р. д.}} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_{tj}. \quad (2)$$

По другим характерным дням выборка меньше 10 дней. Средние графики за эти дни также приводятся к $\bar{P}_{\text{н. р. д.}}$. В результате получается конфигурация суточных графиков нагрузки за характерные дни для каждого месяца. За базовый принимается график нормального рабочего дня.

Если есть необходимость в определении величины колебаний нагрузки за смежные дни одного месяца, что требуется при оперативном планировании нагрузки, для нормальных рабочих дней определяют не только средние значения, но и среднеквадратичное отклонение для каждого часа. Величина среднеквадратичного отклонения характеризует устойчивость графиков для данного месяца по смежным дням недели и возможную точность соответствия планируемого графика действительному. Повысить эту точность можно только учитывая случайные факторы (погодные, особенности работы схемы и т. д.). Для каждого часа эта величина различна и имеет в себе элемент случайности.

Обычно при использовании относительных единиц суточные графики нагрузки приводят к максимуму. В данном случае все нагрузки следует приводить к среднему значению, определяемому по (2). Это вызвано следующими причинами:

1) с точки зрения теории статистики суточный максимум для какого-то часа находится в таких же условиях, как и всякая другая нагрузка для своего часа и тоже подвержена влиянию случайных факторов. Средняя нагрузка (как средняя величина) варьирует меньше и является более стабильной;

2) при группировке приведенных графиков с интервалом в 12 месяцев за ряд лет.

$$P_i = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n P_{i+(l-1)12}$$

при наступлении максимума в одном часу получается, что максимум 100% одинаков за все годы и дисперсия равна нулю, а для минимальных нагрузок она значительно увеличена;

3) если вечерний и утренний максимум по величине различаются мало, то бывает период, когда максимум переходит с вечера на утро, а это вызывает дополнительные неудобства.

Аналогичное явление могло бы получиться и при осреднении суточных графиков за смежные дни, но здесь проводится осреднение в абсолютных величинах мощности и пренебрегаются изменения нагрузки, вызываемые непрерывным аперриодическим ростом [3]. При этом, строго говоря, допускается, какая-то ошибка, ее величина зависит от скорости нарастания нагрузки внутри месяца за осредняемый промежуток. Чтобы исключить влияние аперриодического роста, следует вначале привести каждый суточный график к своей среднесуточной мощности ($P_{ср}$) и потом уже, в относительных величинах, определять среднее значение графика нагрузки для каждого часа P_i и величину среднеквадратичного отклонения σ .

Изменение конфигурации графиков нагрузки энергосистемы с 1956 по 1965 г.

На рис. 2. построены суточные графики декабря за некоторые годы исследуемого периода. Хотя графики и близки по форме, но отличаются между собой, причем никакой тенденции в изменении по годам нет и нет оснований говорить о росте пиковости или об уплотнении суточных графиков нагрузки энергосистемы. В таблице приведены значения коэффициентов $\gamma = \frac{P_{ср}}{P_{макс}}$ и $\beta = \frac{P_{мин}}{P_{макс}}$.

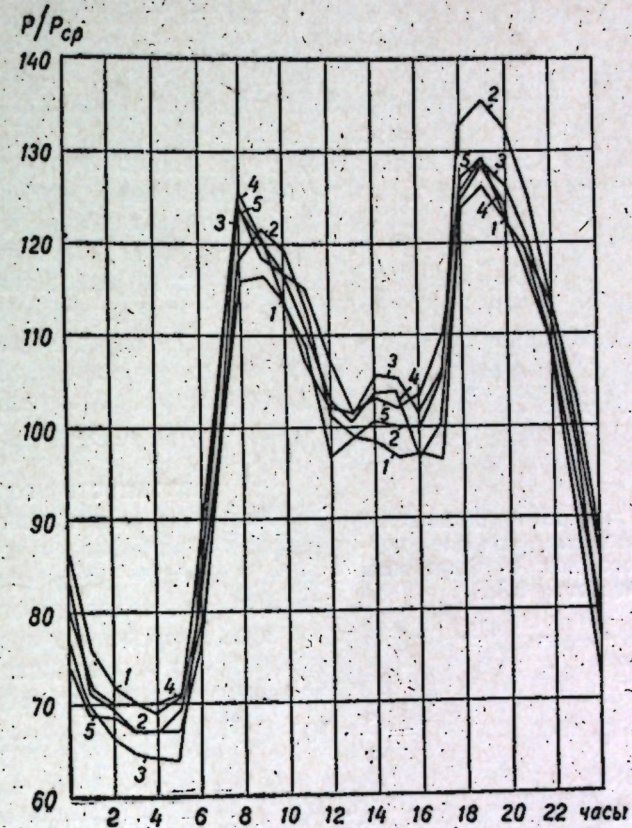


Рис. 2. Среднесуточные графики активной нагрузки декабря за 1956—1965 гг.: 1—1956; 2—1958; 3—1960; 4—1962; 5—1965

Изменение коэффициентов γ и β зимних суточных графиков по годам

Год	γ	β
1956	0,7837	0,5454
1957	0,7326	0,4703
1958	0,7369	0,4952
1959	0,7692	0,5446
1960	0,7740	0,4969
1961	0,7812	0,5266
1962	0,7776	0,5443
1964	0,7806	0,5621
1965	0,7722	0,5181

Значения этих коэффициентов указывают на отсутствие тенденции в изменении графиков. Только после 1958 г. отмечается небольшой рост утреннего пика и сдвиг его на час вперед (с 9 на 8 часов). С 1960 г. заметных изменений в утреннем и вечернем пиках нагрузки не произошло. Сдвиг и небольшой подъем утреннего пика по времени совпадает с переходом на семичасовой рабочий день. Это единственное устойчивое изменение в зимнем графике нагрузки энергосистемы, которое произошло за

данный период, поэтому можно предполагать, что такой сдвиг вызван сокращением рабочего дня. Исходя из этого можно ожидать, что переход на восьмичасовой рабочий день не окажет существенного влияния на конфигурацию суммарного графика активной нагрузки Молдавской энергосистемы для нормального рабочего дня.

Определение роста пиковости или уплотнения графиков нагрузки усложняется тем, что нагрузка, а следовательно, и коэффициенты, характеризующие плотность, являются случайной величиной. Если значения коэффициентов γ и β не выходят за пределы доверительного интервала, определенного для них за ряд лет (рис. 3), то на данном вероятном уровне нельзя говорить о существенном изменении плотности графиков.

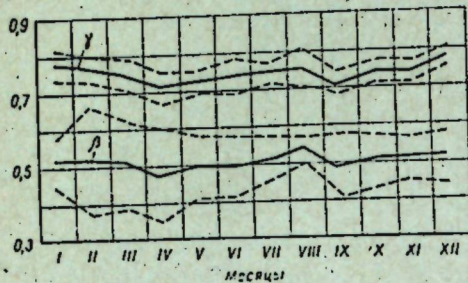


Рис. 3. Годовые изменения показателей суточных графиков нагрузки для нормального рабочего дня с диапазоном вероятности 0,975

$$\left(\gamma = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{макс}}}, \beta = \frac{P_{\text{мин}}}{P_{\text{макс}}} \right)$$

В зависимости от различных условий величины, характеризующие нагрузку, колеблются одни больше, другие меньше. При представлении величин, характеризующих нагрузку, в виде средней и отклонения от нее просто определяется степень варьирования их по коэффициенту вариации, который равен $\sigma^* = \frac{\sigma}{x} \cdot 100$ (x — среднее значение исследуемой величины).

В результате расчета был получен ряд, где величины расположены по мере увеличения коэффициента вариации (уменьшения устойчивости):

- 1) коэффициент $\gamma = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{макс}}}$ среднемесячных графиков нагрузки;
- 2) суточные потребления электроэнергии за последовательные дни одного месяца;
- 3) суточные максимумы нагрузки;
- 4) числа часов использования годового максимума;
- 5) суточные графики за последовательные рабочие дни месяца;
- 6) осредненные многолетние суточные графики;
- 7) коэффициент $\beta = \frac{P_{\text{мин}}}{P_{\text{макс}}}$.

Этот порядок не является неизменным и окончательным. Например, при дефиците мощности максимум нагрузки варьирует меньше, а между некоторыми значениями σ^* разница совсем незначительна, но представление о свойствах этих величин данный ряд дает.

Прогнозирование графиков нагрузки

Метод определения графиков нагрузки на несколько лет вперед естественно вытекает из анализа исследованных графиков нагрузки за прошедший период (1956—1965 гг.). Результаты этого анализа показали следующее:

- а) конфигурация суточных графиков нагрузки за прошедшие 10 лет,

несмотря на то что абсолютный максимум системы увеличился более чем в 10 раз, практически не изменилась;

б) величины, характеризующие режимы нагрузки, можно рассматривать как случайные и характеризовать их средним значением и отклонением от средней величины;

в) переход на восьмичасовой рабочий день с двумя выходными в неделю существенно не изменит форму графика нагрузки нормального рабочего дня, изменится только количество выходных дней, исчезнут графики сокращенного рабочего дня.

Отсюда можно сделать выводы:

1. Поскольку в республике согласно плану развития существенных сдвигов в структуре народного хозяйства не произойдет, то определенные статистически многолетние графики нагрузки Молдавской энергосистемы не изменят своих показателей и на близкую перспективу.

2. Для перспективного планирования нужно экстраполировать средние многолетние графики с допустимым интервалом отклонений как типовые для Молдавской энергосистемы. Это уменьшает суммарную ошибку в прогнозе конфигурации графиков. При определении допустимого интервала отклонений следует учитывать влияние увеличения суммарной мощности на величину коэффициента вариации [4].

3. Дополнительные крупные потребители с особыми режимами потребления электроэнергии (машинное орошение и пр.), которые могут оказать влияние на суммарный график энергосистемы, должны изучаться и учитываться отдельно.

Метод прогноза основывается на экстраполяции формы графиков с учетом роста потребления электроэнергии. Прогноз годового графика осуществляется непрерывно по годам с учетом уровня, достигнутого в году, предшествующем планируемому. Исходя из планируемого годового прироста потребления электроэнергии на определяемый год строится его годовой график, по которому и определяется среднесуточная мощность нормального рабочего дня $P_{\text{н.р.д.}}$ для каждого месяца. Значения этой мощности умножаются на ординаты соответствующего типового графика и получается суточный график в абсолютных единицах. Возможные отклонения определяются величиной среднеквадратичного отклонения от средних значений с принятой вероятностью $k\sigma$.

Построение перспективного годового графика основывается на делении годового прироста нагрузки на две части:

- 1) естественный прирост, зависящий от ввода дополнительных мощностей потребителей в предыдущем $n-1$ году;
- 2) дополнительный (внутригодовой) прирост, зависящий от ввода новых мощностей в определяемом n году [5, 6].

$$\Delta \bar{W}_r = \bar{W}_{\text{ест}} + \bar{W}_{\text{доп}},$$

где $\Delta \bar{W}_r$ — годовой прирост электропотребления;
 $\bar{W}_{\text{ест}}$ и $\bar{W}_{\text{доп}}$ — естественный и дополнительный годовые приросты.

Принимается, что дополнительный прирост в течение года происходит равномерно: в начале года он равен нулю, в конце — максимальный. Естественный прирост в начале года максимальный, в конце года равен нулю. Расчет ведется для нормального рабочего дня (н.р.д.). Начальную точку января определяемого n года получаем из среднего значения

потребления электроэнергии за н. р. д. декабря $n-1$ года плюс величина дополнительного прироста для января:

$$\bar{W}_{я(n)} = \bar{W}_{д(n-1)} k' + \Delta \bar{W}_{доп.я}, \quad (3)$$

где $\bar{W}_{я(n)}$ — среднесуточная выработка за н. р. д. января n года;
 $\bar{W}_{д(n-1)}$ — среднесуточная выработка за н. р. д. декабря $n-1$ года;

$\Delta \bar{W}_{доп.я}$ — величина дополнительного прироста за n год, приходящаяся на январь (составляет 4% от величины дополнительного прироста на конец n года);

k' — коэффициент, учитывающий неодинаковость среднесуточной выработки за декабрь $n-1$ года и январь n года (определяется по статистическим данным).

Величину годового прироста электроэнергии в относительных единицах можно записать:

$$w_r = \frac{\bar{W}_{я(n)}}{\bar{W}_{я(n-1)}} - 1,$$

где $\bar{W}_{я(n)}$ и $\bar{W}_{я(n-1)}$ — среднесуточное потребление электроэнергии в n и $n-1$ году (для н. р. д.).

Величину естественного прироста $w_{ест}$ на начало n года можно выразить:

$$w_{ест(n)} = \frac{\bar{W}_{я(n)}}{\bar{W}_{я(n-1)}} - 1,$$

где $\bar{W}_{я(n)}$ и $\bar{W}_{я(n-1)}$ — среднесуточное потребление электроэнергии января в n и $n-1$ году.

Заменяя $\bar{W}_{я(n)}$ на $\bar{W}_{д(n-1)} \cdot k'$, из равенства (3) получим

$$w_{ест(n)} = \frac{\bar{W}_{д(n-1)} \cdot k'}{\bar{W}_{я(n-1)}} - 1. \quad (4)$$

Здесь все величины известны.

Величину дополнительного прироста на конец года можно выразить как

$$w_{доп(n)} = \frac{\bar{W}_{д(n)}}{\bar{W}_{д(n-1)}} - 1, \quad (5)$$

где $\bar{W}_{д(n)}$ и $\bar{W}_{д(n-1)}$ — среднесуточное потребление электроэнергии декабря в n и $n-1$ году.

Тогда годовой прирост можно выразить через величину естественного прироста на начало определяемого n года и через величину дополнительного прироста на конец этого года по формуле:

$$w_r = \frac{1}{2} (w_{ест} + w_{доп}). \quad (6)$$

Подставив в формулу (6) планируемое значение w_r и $w_{ест}$, определенное из уравнения (4), получим значение $w_{доп}$ на конец планируемого года.

Поскольку мы применяем среднемесячные суточные расходы электроэнергии, то среднедекабрьский дополнительный прирост составит $0,96 w_{доп}$, а среднеянварский $0,04 w_{доп}$. На остальные месяцы дополнительный прирост распределяется равномерно в соответствии с формулой

$$w_{доп_i} = C(m_i - 1), \quad (7)$$

где C — постоянная, определяемая по формуле

$$C = \frac{w_{доп}}{11}; \quad (8)$$

m_i — порядковый номер месяца;

$w_{доп_i}$ — дополнительный прирост для i месяца.

Эти величины дополнительного прироста прибавляем к соответствующим ординатам типового статического графика годового изменения нагрузки и получаем динамический график годового изменения нагрузки в относительных величинах.

Для января n года дополнительный прирост в формуле (3) определяется по выражению

$$\Delta \bar{W}_{доп.я} = 0,04 w_{доп(n)} \cdot \bar{W}_{д(n-1)}.$$

Подставляя это значение в равенство (3), получаем электропотребления для н. р. д. января планируемого года.

Таким образом, динамический график годового изменения нагрузки в относительных величинах и электропотребление в январе в абсолютных рассчитаны (для остальных месяцев электропотребление для н. р. д. определяется просто).

Для прогнозирования годового графика на следующий $n+1$ год в качестве исходного берется полученный динамический график n года и т. д. Для определения электропотребления за другие характерные дни используются коэффициенты внутринедельной неравномерности K_n, K_b .

Этот метод применим как при постоянных, так и при переменных годовых приростах, что в действительности имеет место в небольших энергосистемах. Использование его в Молдавской энергосистеме показало, что несовпадение фактических и прогнозируемых графиков нагрузки происходит в большей степени из-за несоответствия годовых приростов электроэнергии. Поэтому в дальнейшем необходимо изучить возможности более точного определения предполагаемых величин электропотребления при текущем планировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. М. Федорищенко, М. Л. Мисник. Использование методов математической статистики при анализе графиков нагрузки энергосистемы. Научно-техническое совещание по применению вероятностных и статистических методов при проектировании и эксплуатации энергетических систем и электрических сетей. Киев, 1963.
2. Г. М. Федорищенко, М. Л. Мисник. Использование методов математической статистики и теории вероятности при анализе графиков нагрузки Молдавской энергосистемы. «Изв. АН МССР», 1963, № 3.

3. Ю. С. Коновалов. Некоторые вопросы получения информации о нагрузках энергосистем для оптимизации оперативных режимов. Автореферат кандидатской диссертации. М., 1966.
4. М. Л. Мисник. О влиянии величины максимальной нагрузки энергосистемы на ее вариацию. В сб.: Электроэнергетика и автоматика. Вып. 1. Кишинев, РИО АН МССР, 1965.
5. М. Л. Мисник. Прогнозирование выработки электроэнергии по составляющим ее годового прироста. «Изв. АН СССР» (энергетика и транспорт), 1965, № 1.
6. Б. А. Гуревич, В. А. Гадиева, Б. К. Понкратов, Б. М. Цветков. К вопросу об определении перспективных режимов нагрузки энергетических систем и объединений. Информационное письмо № 10, ЭНИН АН СССР, 1959.

Г. М. ВЕРИН, В. Г. ЖУРАВЛЕВ, Б. А. ЗУБАРЕВ, Г. В. ЧАЛЫП

О ВОЗМОЖНОСТИ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ ТОКА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Некоторые авторы высказывают мнение о возможности получить положительный эффект при применении тока повышенной частоты в отдельных областях электроэнергетики [1—3]. Уже сейчас, до проведения глубоких и всеобъемлющих исследований, известны потребители, для которых повышение частоты тока оказывается эффективным или даже необходимым по характеру потребителя или из-за уменьшения весовых и габаритных размеров электрооборудования [3, 4].

В связи с этим целесообразно изучить влияние повышения частоты на основные характеристики и экономические показатели воздушных распределительных электрических сетей, на которые приходится около 40% от общих капиталовложений в электроэнергетику. Был рассмотрен вопрос о влиянии повышения частоты тока (100—400 гц) на потерю напряжения в линиях распределительных сетей, определены некоторые возможные способы компенсации потерь напряжения, произведена оценка экономичности сетей с учетом изменения стоимости соответствующего электротехнического оборудования.

Потери напряжения в линиях распределительных сетей при повышенных частотах определялись без учета влияния поверхностного эффекта на активное сопротивление алюминиевых проводов из-за незначительной его величины в диапазоне рассматриваемых частот [5], а изменения величины индуктивного сопротивления и емкостной проводимости линий принимались пропорциональными изменению частоты.

Сети напряжением 6, 10, 35 и 110 кв

Для выявления характера изменения потерь в линии при возрастании частоты переменного тока в диапазоне от 100 до 400 гц рассматривались частные случаи радиальных неразветвленных линий различного напряжения без учета трансформаторов для смешанной активно-индуктивной нагрузки ($\cos \varphi = 0,8$).

Расчет производился при использовании П-образной схемы замещения по следующей методике:

1) выбиралось сечение проводов линии при работе на частоте 50 гц по экономической плотности тока с последующей проверкой на потерю напряжения;

2) определялись потери напряжения в линии с учетом продольной и поперечной составляющих при повышенных частотах;

3) если потеря напряжения превышала допустимую величину, то ранее выбранное сечение проводов заменялось на большее сечение, и потери напряжения при различных частотах определялись вновь;

4) в случае неудовлетворительного эффекта от увеличения сечения проводов для линий напряжением 35 и 110 кВ применялось расщепление проводов с последующим определением потерь напряжения при различных частотах.

Расчеты показали, что с ростом частоты потери напряжения в линиях рассматриваемых напряжений возрастают и при частоте 400 Гц превышают потери при 50 Гц примерно на 30% в линии напряжением 6 кВ, 20% — в линии 10 кВ, 30% — в линии 35 кВ и 12% — в линии 110 кВ. Увеличение сечения проводов снижает потери напряжения весьма незначительно, а использование расщепленных фазных проводов снижает потери на величину порядка 15% в линиях 35 кВ и на 8% в линиях 110 кВ (рис. 1, 2). Причем в линии 110 кВ с расщепленными проводами наибольшие потери напряжения наблюдаются при частоте 250—300 Гц.

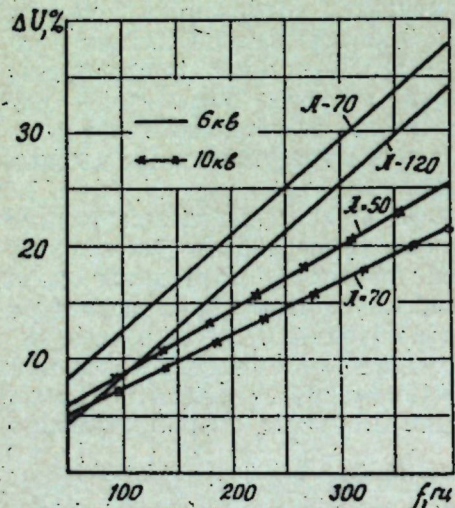


Рис. 1. Потери напряжения в линиях 6 и 10 кВ в зависимости от частоты тока

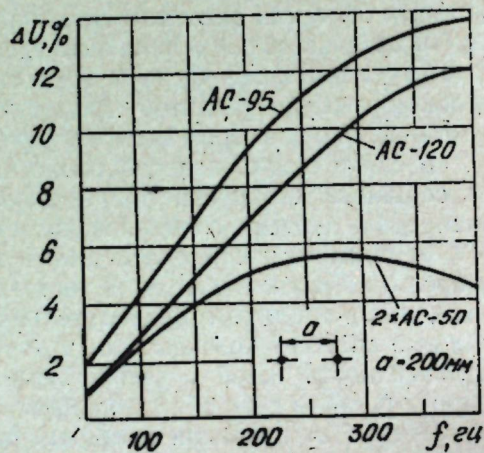


Рис. 2. Потери напряжения в линии 110 кВ в зависимости от частоты тока

Вероятно, одним из способов обеспечения допустимых отклонений напряжения в линиях 6—35 кВ при повышенных частотах может быть применение установок продольной емкостной компенсации (УПЕК).

Для определения экономического эффекта от применения УПЕК была рассмотрена реальная радиальная разветвленная линия напряжением 10 кВ, питающая 26 сельских потребительских подстанций мощностью от 50 до 1000 кВА каждая при среднем $\cos \varphi = 0,92$. Вопрос о месте установки УПЕК не рассматривался. Расчет линии на потерю напряжения в ней при наибольшей возможной нагрузке показал, что уже при частоте 150 Гц потери напряжения превышают допустимые на 15%.

Мощность батарей конденсаторов УПЕК определялась при условии сохранения потерь напряжения в линии при повышенных частотах на том же уровне, что и при 50 Гц, то есть реактивное сопротивление батарей конденсаторов равно величине превышения реактивного сопротивления линии при повышенной частоте над реактивным сопротивлением при

частоте 50 Гц. Из литературы известно, что при повышении частоты тока стоимость конденсаторов и силовых трансформаторов несколько снижается. В [1] приведена ориентировочная величина снижения стоимости 1 квар мощности конденсаторов и стоимости трансформаторов при изменении частоты в диапазоне 100—400 Гц.

Величина снижения стоимости в относительных единицах $K_{*f} = \frac{K_f}{K_{50}}$ приблизительно выражается зависимостями:

$$K_{*f}^c = \left(\frac{f}{50}\right)^{-0,58} \quad \text{— для конденсаторов;}$$

$$K_{*f}^T = \left(\frac{f}{50}\right)^{-0,23} \quad \text{— для трансформаторов,}$$

где f — рассматриваемая повышенная частота.

С учетом этих изменений стоимости затраты на УПЕК определяются:

$$Z_f^c = Q_f \cdot K_c (K_{уст} + K_{упр} + K_{*f}^c),$$

где Q_f — мощность батареи УПЕК (квар), необходимая при частоте f ; $K_c = 3$ руб/квар — стоимость единицы мощности конденсаторов при частоте 50 Гц [6];

$K_{уст} = 0,33$ — коэффициент, учитывающий затраты на оборудование и установку УПЕК [6];

$K_{упр} = 0,10$ — коэффициент, учитывающий затраты на защиту и управление УПЕК [6];

K_{*f}^c — коэффициент, учитывающий изменение стоимости конденсаторов с изменением частоты.

Затраты на трансформаторы питательных пунктов при изменении частоты определяются:

$$Z_f^T = K_{*f}^T \cdot Z_{50}^T,$$

где: K_{*f}^T — коэффициент, учитывающий изменение стоимости трансформаторов с изменением частоты;

Z_{50}^T — суммарная стоимость трансформаторов питающих пунктов при частоте 50 Гц [7].

Экономия на капитальные вложения в распределительную сеть при повышении частоты тока и использовании УПЕК, отнесенная к суммарной стоимости питающих трансформаторов сети при частоте 50 Гц, определится

$$\varepsilon = \frac{Z_{50}^c - Z_f^c - Z_f^T}{Z_{50}^T} \cdot 100\%.$$

Эта зависимость в функции от частоты тока подсчитана и приведена на рис. 3. Он показывает, что наибольший экономический эффект наблюдается при частоте тока 150—200 Гц и для рассматриваемой сети достигает величины порядка 9%.

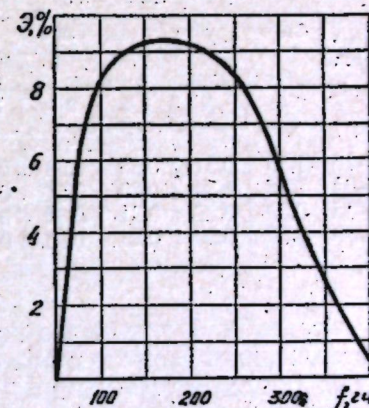


Рис. 3. Экономия на капитальные вложения в распределительную сеть 10 кВ при использовании УПЕК в процентах от суммарной стоимости трансформаторов сети при 50 Гц в зависимости от частоты тока

Низковольтные линии

Для выявления влияния повышения частоты на основные характеристики и экономические показатели низковольтных воздушных линий рассматривалась трехфазная четырехпроводная линия длиной 100 м с нагрузкой на конце линии и средним геометрическим расстоянием между проводами линии 400 м. Рассмотрены варианты линии с проводами марок А-16, А-25, А-35, А-50 при $\cos \varphi$ нагрузки равном 0,8 и 0,9 в диапазоне частот 50—400 гц.

Рост индуктивного сопротивления линии при незначительной величине генерируемой линией реактивной мощности с повышением частоты тока от 50 до 400 гц ведет к ухудшению технико-экономических показателей низковольтных линий. Однако работы [2, 8] показывают, что с повышением частоты тока до 100—400 гц может оказаться целесообразным и достаточно безопасным повышение «низкого» напряжения с 380 до 660 в (а может быть и до 1000 в). В связи с этим в расчетах принято напряжение 660 в и произведено сравнение полученных результатов с результатами расчета рассматриваемых вариантов линии при напряжении 380 в и частоте 50 гц.

Для определения влияния частоты тока на потерю напряжения в линии рассчитаны удельные потери напряжения $\left(\frac{\Delta U, \%}{\text{квт-км}}\right)$ при частотах 50—400 гц (табл. 1).

Таблица 1

Марка провода	Удельные потери напряжения, $\frac{\Delta U, \%}{\text{квт-км}}$											
	$\cos \varphi = 0,8$						$\cos \varphi = 0,9$					
	380 в		660 в				380 в		660 в			
Частота тока, гц												
50		50	100	200	300	400	50	50	100	200	300	400
А-16	1,53	0,51	0,56	0,68	0,79	0,91	1,47	0,49	0,52	0,6	0,67	0,75
А-25	1,04	0,34	0,40	0,51	0,62	0,73	0,99	0,33	0,36	0,44	0,50	0,58
А-35	0,79	0,27	0,31	0,42	0,52	0,63	0,73	0,24	0,28	0,34	0,40	0,48
А-50	0,59	0,20	0,25	0,35	0,45	0,55	0,53	0,18	0,21	0,28	0,34	0,41

Из табл. 1 видно, что потери напряжения значительно возрастают с повышением частоты и при 400 гц превышают потери при 50 гц в 1,5—2,2 раза при $\cos \varphi = 0,9$ и в 1,8—2,7 раза при $\cos \varphi = 0,8$. Однако удельные потери напряжения при 660 в даже при частоте 400 гц составляют 0,51—0,78 при $\cos \varphi = 0,9$ и 0,6—0,93 при $\cos \varphi = 0,8$ от удельных потерь при напряжении 380 в и частоте 50 гц. Таким образом, повышением напряжения линий до 660 в достигаются во всем принятом диапазоне частот меньшие удельные потери напряжения, чем при напряжении 380 в и частоте 50 гц.

Потери реактивной мощности прямо пропорциональны частоте тока и обратно пропорциональны квадрату напряжения. Следовательно, при напряжении линии 660 в до частоты 150 гц потери реактивной мощности не превышают, а при частоте 150 гц равны потерям при напряжении 380 в и частоте 50 гц.

Результаты расчета потерь реактивной мощности в процентах от передаваемой активной мощности, отнесенные к 1 квт-км активного момента нагрузки, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Марка провода	Удельные потери реактивной мощности											
	$\cos \varphi = 0,8$						$\cos \varphi = 0,9$					
	380 в		660 в				380 в		660 в			
Частота тока, гц												
50		50	100	150	300	400	50	50	100	150	300	400
А-16	0,36	0,12	0,24	0,36	0,72	0,96	0,28	0,09	0,19	0,28	0,56	0,76
А-25	0,35	0,12	0,23	0,35	0,69	0,92	0,27	0,09	0,18	0,27	0,54	0,72
А-35	0,33	0,11	0,22	0,33	0,66	0,88	0,26	0,08	0,17	0,26	0,52	0,70
А-50	0,32	0,10	0,21	0,32	0,64	0,85	0,25	0,08	0,17	0,25	0,50	0,67

Активные потери мощности при повышении частоты тока до 400 гц для рассматриваемых вариантов линии можно с инженерной степенью точности считать независимыми от частоты.

Была произведена оценка влияния повышения частоты тока на экономичность рассматриваемых вариантов линии. Анализ проведен методом расчетных затрат, которые в настоящее время являются общепризнанным критерием экономического сопоставления различных технических решений [9].

Расчетные затраты на передачу электроэнергии по линии определены без учета ежегодных расходов на ее обслуживание, принятых постоянными для всех рассматриваемых вариантов [7, 10]:

$$Z = \frac{P_{II} + P_{ам}}{100} K_{II} + \frac{P'_{II} + P'_{ам}}{100} K_{ст.к} \cdot \Delta Q + C_{II} \cdot \Delta P \cdot \tau,$$

- где K_{II} — капитальные вложения в линию, руб [11];
 P_{II} — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений 12,5% [9];
 $P_{ам}$ — коэффициент амортизационных отчислений линий на деревянных пропитанных опорах, 3,3% [12];
 $P'_{ам}$ — коэффициент амортизационных отчислений батарей статических конденсаторов, 10% [13];
 $K_{ст.к}$ — стоимость единицы мощности батарей статических конденсаторов, руб/квар [1, 13];
 ΔQ — потери реактивной мощности в линии, квар;
 ΔP — потери активной мощности в линии, квт;
 τ — годовое время максимальных потерь, 750 ч;
 C_{II} — отпускная стоимость электроэнергии, 0,04 руб/квт. ч [10].

Поскольку экономичность передачи электроэнергии определяется нагрузкой линии, произведен расчет вариантов линии с нагрузками, при которых потеря напряжения ($\Delta U, \%$) составляет 0,5; 0,75 и 1% номинального напряжения на 100 м линии. Нагрузка, при которой $\Delta U = 0,5\%$ при частоте 50 гц, соответствует для принятых расчетных условий рекомендуемой некоторыми авторами плотности тока [10, 14], а нагрузка, при которой $\Delta U = 1\%$, соответствует существующим предельным экономическим плотностям тока.

Так как электроэнергию, потребляемую приемниками при различных уровнях напряжения, нельзя считать равноценной, выявление повышения частоты на экономичность линии произведено из условия сохранения $\Delta U = \text{const}$ во всем принятом диапазоне частот. Условию $\Delta U = \text{const}$ при неизменной передаваемой активной мощности и $\cos \varphi$ соответствуют варианты линий с неизменным полным сопротивлением, что может быть достигнуто, при повышении частоты тока и отсутствии каких-либо средств компенсации, увеличением сечения проводов линии.

Результаты вычисления расчетных затрат $\frac{Z_f}{Z_{50}} \cdot 100\%$ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные затраты по линии, %

Потеря напряжения, %	$\cos \varphi = 0,8$					$\cos \varphi = 0,9$				
	380 в		660 в			303 в		660 в		
	Частота тока, гц									
	50	50	200	280	350	50	50	200	400	550
0,50	135	100	104	110	118	126	100	105	111	121
0,75	129	100	100	102	108	121	100	102	105	112
1,00	123	100	95,5	94,5	98	115	100	97,5	98	102

Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет заключить, что при существующих стоимостных показателях и нагрузках рассматриваемых вариантов линии, соответствующих $\Delta U = 1\%$, расчетные затраты имеют минимум при частотах 200—300 гц. С уменьшением нагрузки до $\Delta U = 0,75\%$ на 100 м линии минимум расчетных затрат сдвигается в сторону частот 100—150 гц. При нагрузке, соответствующей $\Delta U = 0,5\%$ на 100 м, расчетные затраты с повышением частоты растут и при частоте 200 гц превышают на 2—4% расчетные затраты при частоте 50 гц.

Сопоставление полученных данных с результатами расчетов рассматриваемых вариантов линии при напряжении 380 в и частоте 50 гц показывает, что расчетные затраты при напряжении 660 в во всем принятом диапазоне частот значительно ниже расчетных затрат при напряжении 380 в и частоте 50 гц.

Таким образом, первые предварительные расчеты позволяют сделать вывод, что применение повышенной частоты (100—200 гц) в низковольтных линиях возможно без дополнительных затрат при одновременном повышении напряжения от 380 до 660 в.

ЛИТЕРАТУРА

1. Венкатаратнам. Пудипеди. К вопросу об оптимальном проектировании систем электроснабжения потребителей в районах с малой плотностью нагрузки. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Московский энергетический институт, 1964.
2. Г. И. Китаенко. Повышение частоты переменного тока и нахождение ее оптимального значения для дальнейшей электрификации СССР. «Электричество», 1965, № 2.

3. В. С. Кулебакин, В. А. Веников. Повышение частоты переменного тока и нахождение ее оптимального значения для дальнейшей электрификации СССР. «Электричество», 1963, № 3.
4. Г. В. Чалый. Проблема определения оптимальной частоты промышленного переменного тока. В сб.: Электроэнергетика и автоматика, вып. 1. Кишинев, РИО АН МССР, 1965.
5. В. И. Григель. Разработка теоретических основ применения напряжения повышенной частоты в энергосистемах и в различных отраслях народного хозяйства. Научный отчет Отдела энергетической кибернетики АН МССР. Кишинев, 1964.
6. К. М. Поляков. Регулирование напряжения в электрических сетях сельских районов. М., изд-во «Энергия», 1965.
7. Электротехнический справочник, т. II. Госэнергоиздат, 1965.
8. Б. И. Кадыков, Б. В. Орлов. Исследование действия переменного тока различной частоты на животный организм. В сб.: Судовая электротехника и связь, вып. 1. Л., 1958.
9. Основные методические положения технико-экономических расчетов в энергетике. «Электричество», 1959, № 10.
10. Л. А. Вааг, С. Н. Захаров. Методы экономической оценки в энергетике. Госэнергоиздат, 1962.
11. Министерство коммунального хозяйства РСФСР. Порайонные преysкуранные цены на строительство и монтаж электрических сетей. М., Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1961.
12. И. А. Будзко, В. Н. Степанов. Электрические линии и сети сельскохозяйственного назначения, М., Изд-во сельскохозяйственной литературы, 1962.
13. Л. В. Литвак. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. Госэнергоиздат, 1963.
14. В. А. Дале, З. П. Кришан, О. Г. Паэгле. Оптимизация электрических сетей при росте нагрузок. Рига, Изд-во Академии наук Латвийской ССР, 1964.

Н. Н. РОМАНЕНКО

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВЫРАЩИВАНИЯ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

(В условиях Молдавской ССР)

В последние 12 лет (1956—1967 гг.) в результате перевода сельских потребителей Молдавской ССР на централизованное электроснабжение от республиканской энергосистемы созданы необходимые условия для широкого использования электрической энергии в таких отраслях сельского хозяйства Молдавской ССР, как овощеводство, виноградарство, садоводство и табаководство. Предусмотренный государственным планом рост производства винограда, фруктов, овощей, табака и других ценных технических культур требует выращивания из года в год все большего количества рассады и саженцев. Основным фактором интенсификации производства посадочного материала этих однолетних и многолетних растений является создание оптимальных температурных условий в первоначальной стадии их развития до высадки в грунт.

В течение многих лет в сельском хозяйстве Молдавии используются для этой цели в овощеводческих и табаководческих хозяйствах парники на биотопливе, а в питомниководческих — теплицы с центральным отоплением. Начиная с 1958 года передовые совхозы и колхозы Молдавской ССР стали применять все в более широком масштабе электрический обогрев, имеющий значительные преимущества по сравнению с другими техническими способами обогрева и с обычным, пока что наиболее распространенным, биологическим. Необходимость перехода с биологического на электрический обогрев диктуется также все возрастающим дефицитом биотоплива.

Исследования и опытно-промышленные испытания, проводившиеся нами в течение 1961—1966 гг. по вопросам использования электрообогрева для интенсификации выращивания посадочного материала, дали возможность уточнить режимы работы электропарников в условиях Молдавии, разработать новые конструкции автоматических электроустановок для обогрева стратификационных ящиков и парников на пониженном напряжении, определить перспективы использования этих энергоемких установок в качестве потребителей-регуляторов для выравнивания суточного графика электронагрузок в сельскохозяйственных районах.

Структура и режим электропотребления парниковых и питомниководческих хозяйств

Заготовка рассады и стратифицированных прививок до высадки их в открытый грунт производится в Молдавской ССР, как правило, в феврале, марте и апреле. Потребление электроэнергии для этой цели носит,

следовательно, сугубо сезонный характер. В овощеводческих колхозах и совхозах нижнего Приднестровья удельный вес электропотребления на выращивание рассады томатов, капусты, перцев, баклажанов и других овощей в общегодовом электропотреблении всего хозяйства достигает 15—20%, концентрируясь в относительно коротком весеннем периоде. Значительная часть других сельскохозяйственных нагрузок, в отличие от промышленных, также распределяется неравномерно в течение года. Поэтому для правильного планирования сельской электрификации и разработки проектов электрификации отдельных хозяйств и районов требуется основательное знание структуры и режима их электропотребления в суточном и годовом разрезе.

Первые работы в этом направлении были выполнены Отделом энергетики Молдавского филиала АН СССР в 1958—1959 гг. Для четырех колхозов различных природно-экономических зон Молдавской ССР были составлены макеты электрификации по производственным и бытовым нагрузкам и разработаны удельные нормативы электропотребления для первого расчетного уровня электрификации [1], который и был достигнут большинством колхозов и совхозов Молдавии к 1965—1967 гг. В одном из передовых по электрификации колхозов структура и режим электропотребления были изучены по фактическим данным двух лет и на их основании составлены годовой и суточные графики нагрузок для различных периодов года [2]. Исследования показали, что для определения потребляемой мощности больше подходит метод годового, месячного и суточного коэффициентов неравномерности электропотребления, предлагаемый некоторыми научно-исследовательскими учреждениями, чем метод среднего коэффициента участия в максимуме:

$$P_{\max} = \frac{W_r}{8760 \gamma_r \cdot \gamma_m \cdot \gamma_c}, \text{ квт.} \quad (1)$$

Для Молдавской ССР на первом уровне электрификации численные значения коэффициентов неравномерности составили по макетным данным:

$$\gamma_r = 0,67; \quad \gamma_m = 0,84; \quad \gamma_c = 0,60.$$

В последующие годы теми же авторами (В. Т. Парута, Н. Н. Романенко) исследовались удельные нормативы электронагрузок для четырех уровней электрификации сельскохозяйственного производства и быта сельского населения. Расчеты производились по тем же четырем основным природно-экономическим зонам Молдавии, отличающимся преобладанием тех или других отраслей сельского хозяйства и различной плотностью сельского населения. В южных степных районах республики плотность населения значительно ниже, чем в центральных и северных. В районах нижнего течения Днестра и Прута с широко развитым овощеводством наблюдается значительное повышение электропотребления за счет машинного орошения и электрообогрева парников. В центральных районах некоторый рост электропотребления объясняется более развитыми здесь виноградарством и табаководством (табл. 1).

Данные табл. 1 рассчитаны с определенной степенью приближенности и потребуют дальнейшего уточнения по мере включения в номенклатуру электрифицированных процессов новых видов применения электроэнергии на основе достижений науки и техники в области сельской электрификации.

Таблица 1

Удельное потребление электроэнергии и плотность нагрузки на различных уровнях электрификации

Районы	Удельное потребление, <i>квт/га</i> в год				Плотность нагрузки, <i>квт/км²</i>			
	Уровни электрификации				Уровни электрификации			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Южные	203	495	908	1488	8,6	16,0	22,5	30,0
Северные	259	627	1180	1975	11,0	20,0	29,5	39,5
Центральные	274	666	1240	2050	11,6	21,0	31,0	41,0
Нижнее Приднестровье и Припутье	334	822	1480	2350	14,0	26,0	37,0	47,0

Особенности потребления электроэнергии в хозяйствах различных природно-экономических зон Молдавской ССР находят свое отражение

и в годовых графиках нагрузок (рис. 1). В зоне нижнего Приднестровья (колхоз им. Ленина с. Парканы Тираспольского района) наибольшее потребление электроэнергии по фактическим данным наблюдается в периоды электрообогрева парников для овощной рассады и орошения огородов и садов. А в колхозе им. Мичурина с. Трушены Страшенского района максимум нагрузки приходится, как и в большинстве хозяйств, на зимний период. В настоящее время оба хозяйства почти достигли второго уровня электрификации.

В отношении структуры электропотребления намечается неуклонный рост удельного веса тепловых нагрузок как производственных, так и бытовых. Потребление электроэнергии на тепловые процессы, по предварительным расчетам, будет возрастать с 18% на первом уровне электрификации до 77 на четвертом. Такой рост вполне закономерен и подтверждается данными электрифицированных сельских районов ряда зарубежных стран.

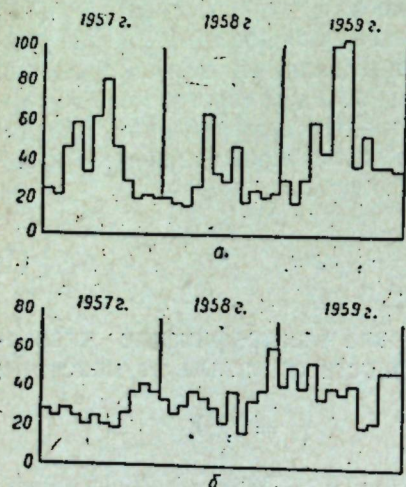


Рис. 1. Годовые графики электрических нагрузок в хозяйствах различного производственного профиля (тыс. *квт·ч*): а — колхоз им. Ленина с высокоразвитым овощеводством и садоводством; б — колхоз им. Мичурина с высокоразвитым виноградарством

Электрообогрев парников для овощной и табачной рассады

Наиболее распространенным электрифицированным тепловым производственным процессом в сельском хозяйстве Молдавской ССР является в настоящее время электрический обогрев парников для выращивания рассады ранних овощей. Впервые опыт эксплуатации электропарников был обобщен сотрудниками Отдела энергетики Молдавского филиала АН СССР весной 1961 года на примере трех хозяйств зоны консервной промышленности нижнего Приднестровья [3].

Исследования температурного режима парников на электрообогреве подтвердили целесообразность их оборудования в условиях Молдавской ССР только подпочвенными нагревательными элементами. Так, в колхозе имени Ленина (село Парканы Тираспольского района) удельная мощность подпочвенных нагревательных элементов в 130 *вт* на парниковую раму оказалась достаточной для поддержания заданной температуры почвы и воздуха в парнике в течение всего периода выращивания рассады томатов. При этом подпочвенные электронагревательные элементы эффективно работали около 46% общего времени электрообогрева (февраль—апрель).

Из-за отсутствия автоматики регулирование температуры почвы в парниках проводилось вручную. По заданию агронома-овощевода в почве поддерживалась температура 25—28° до начала марта и 17—18° в последующий период; температура наружного воздуха в феврале и начале марта по сроку наблюдения 7 часов утра колебалась от —4 до +3° (рис. 2). Таким образом, электрообогрев обеспечил превышение температуры в парнике по сравнению с наружной температурой в 30° для почвы и в 20° для воздуха под парниковыми рамами.

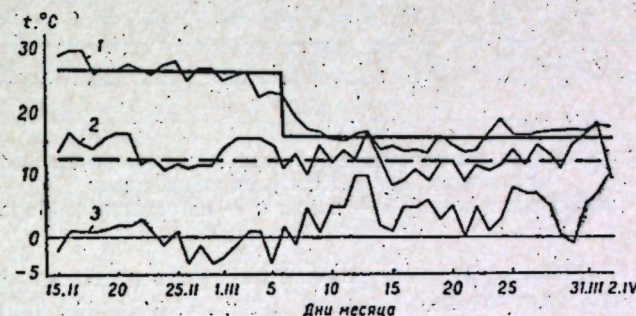


Рис. 2. Колебания температуры почвы (1), воздуха (2) в парниках с почвенным электрообогревом и наружного воздуха (3).

Проведенные исследования выявили существенные недостатки в конструкции подпочвенных нагревательных элементов, которые пагубно сказываются на режиме эксплуатации электропарников. Согласно типовым проектам, электропарники строились и продолжают строиться в Молдавской ССР в основном с тремя нагревательными элементами в асбоцементных или гончарных трубах, что не обеспечивает равномерного прогревания почвы парника в поперечном разрезе. Разница температуры почвы в 5—6° между центральной и боковыми частями парника приводит к неравномерному развитию рассады по всей его рабочей площади, то есть пагубно сказывается на ее качестве. Более равномерное прогревание почвы получается при использовании четырех или шести нагревательных элементов с условием, что крайние элементы укладываются в ложе парника на расстоянии не более 100—150 *мм* от стенок (рис. 3).

Двадцатирамные парники, строящиеся в Молдавской ССР по типовому проекту Гипросельэлектро [4], имеют мощность в 8,1 *квт* при включении нагревательных элементов шести парников по схеме «треугольник» с фазовым напряжением 380 *в* и 3,45 *квт* при включении их по схеме «звезда» с фазовым напряжением 220 *в*. Эти мощности сильно завышены, что пагубно сказывается на эксплуатационных показателях электропарников. Так, при работе по схеме «треугольник» температура стальной

нагревательной проволоки, уложенной в трубы, достигает 300—330°, что приводит к частому ее перегоранию и потерям посадочного материала, а также к ничем не оправданному завышению мощности трансформаторных подстанций. Лучшие эксплуатационные показатели получают у двадцатипятирамных парников с четырьмя трубчатыми нагревательными элементами мощностью 6,85 кВт и, соответственно, 2,80 кВт, по типу парников, построенных в 1959 г. в колхозе имени XX партсъезда (село Слободзея Тираспольского района) [3]; хотя и эти мощности несколько завышены.

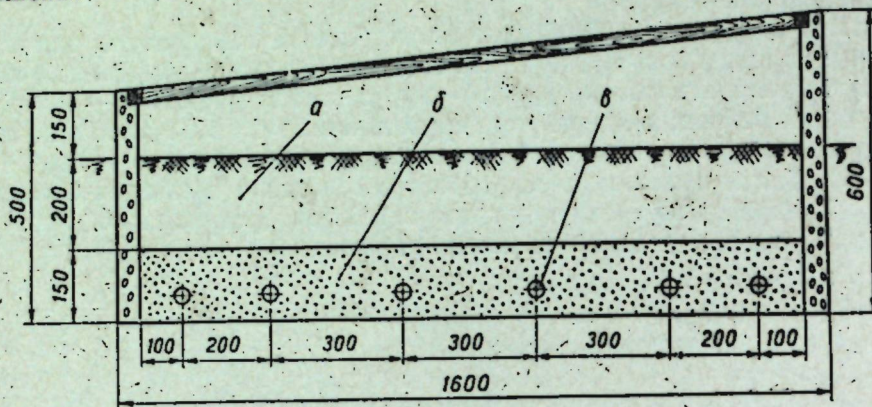


Рис. 3. Поперечный разрез парника на электрическом обогреве с шестью подпочвенными нагревательными элементами:
а — питательная почва; б — песок; в — нагревательный провод

Расчеты и изучение режима работы парников на электрообогреве [3] показывают, что для условий средней зоны Молдавской ССР достаточно оборудовать двадцатипятирамные парники нагревательными элементами мощностью 5 кВт для начального периода (конец января—февраль) при соединении их в «треугольник» и 2 кВт для более теплого периода (март—апрель) при переключении их на «звезду» [4]. Предлагается поэтому оборудовать парники не тремя, а четырьмя нагревательными элементами, обеспечивая этим более равномерное прогревание почвы в парнике; для нагревательных элементов брать стальную оцинкованную проволоку диаметром 2,5 мм для мощности 6,85 кВт при соединении в «треугольник» и диаметром 2,0 мм для мощности 5,0 кВт. Расчет элементов при этих диаметрах проволоки легче всего производить с помощью номограммы (рис. 4) зависимости их удельной мощности на погонный метр от удельного падения напряжения на погонный метр [5].

В случае использования проволоки диаметром 2,0 мм переключение на «звезду» можно производить в условиях Молдавии только в конце марта, когда мощность двадцатипятирамного парника в 2 кВт оказывается достаточной для поддержания необходимой температуры. Если используется проволока диаметром 2,5 мм, мощность парника при соединении в «звезду» составляет 2,80 кВт. В этом случае переключение на «звезду» можно производить значительно раньше — в первой декаде марта.

Условия производства овощной рассады, в частности томатов, требуют, чтобы в начальный период (февраль — первая половина марта) использовалось в рассадниках только около 30% парников для выращивания сеянцев. Остальные же 70% парников начинают работать с середины марта и используются для дальнейшего выращивания пикированных

сеянцев. Поэтому, на основании проведенных исследований, предлагается иметь в электропарниковых хозяйствах для выращивания рассады ранних овощей только одну треть парников, рассчитанных на работу в зимних условиях и с возможностью переключения нагревательных элементов «треугольника» на «звезду». Остальные две трети парников, используемых с середины марта, могут быть облегченной конструкции с нагревательными элементами, с самого начала соединенными на «звезду». Такие парники подходят и для табачных рассадников.

Конструкция этих «полутеплых» парников значительно упрощается, если питать их нагревательные элементы на пониженном (безопасном) напряжении. В 1965 и 1966 гг. были сооружены и испытаны в ряде хозяйств опытные электронагревательные установки с рабочим напряжением 36 в для обогрева парников в табачных и овощных рассадниках [6]. Чтобы получить необходимую мощность электропарника при шести нагревательных элементах (см. рис. 3), их удельная мощность на погонный метр должна равняться 16,5—17,0 вт, что для проволоки диаметром 2,5 мм соответствует удельному падению напряжения 0,88 в (см. рис. 4). При соединении нагревательных элементов в «звезду» длина проволоки одной фазы составит:

$$l = \frac{36}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{0,88} = 24 \text{ м.}$$

Таким образом, для обогрева двенадцатипятирамных парников, широко используемых при выращивании табачной рассады и пикированных сеянцев томатов, требуется очень простое нагревательное устройство, состоящее из трех кусков стальной проволоки длиной 24—25 м. Эти куски проволоки укладываются в виде петель непосредственно в грунт или в теплоаккумулирующий слой песка толщиной 10—15 см (см. рис. 3). Три конца этих проволок соединяются наглухо между собой (нейтральная точка «звезды»), а другие три подсоединяются к понижительному трансформатору со стороны напряжения 38 в.

Как показали производственные испытания 1965—1966 гг., описанные выше электропарники имеют значительные преимущества по сравнению с широко используемыми в настоящее время парниками с тремя нагревательными элементами в асбоцементных или керамических трубах и рабочим напряжением 380 в. Сооружение электропарников на пони-

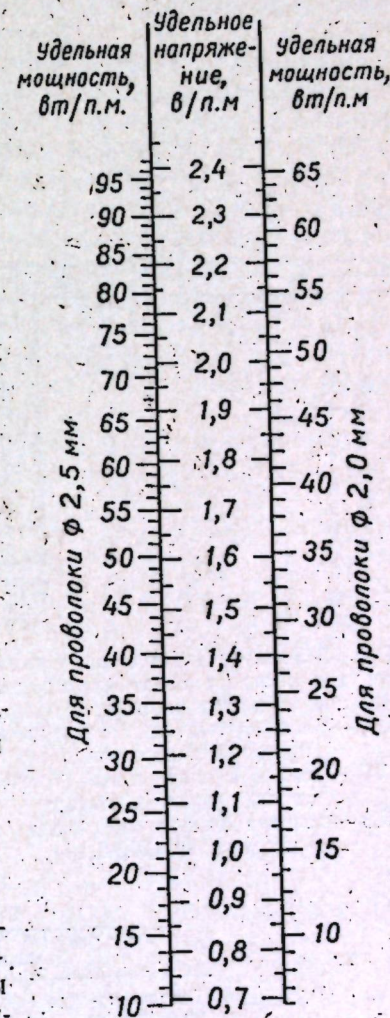


Рис. 4. Номограмма для определения удельной мощности нагревательных элементов из голой стальной оцинкованной проволоки (вт/пог.м)

женном напряжении с шестью нагревательными элементами требует значительно меньших затрат, такие парники более просты и надежны в эксплуатации.

Электростратификационные установки

На основании исследований, проведенных нами в 1961 и 1962 гг., электрический обогрев стал применяться питомниководческими хозяйствами Молдавской ССР в процессе стратификации виноградных прививок. Для осуществления электрообогрева стратификационных ящиков в 1962 году была создана и испытана в производственных условиях автоматическая электронагревательная установка [7], основанная на той же электрической схеме, что и установка для обогрева парников на пониженном напряжении (рис. 5).

Для внутреннего обогрева стратификационных ящиков с виноградными прививками наиболее подходящим оказался нагревательный провод марки ПОСХВ-1,1 (табл. 2), который был разработан по специальному заказу в 1961 году Всесоюзным научно-исследовательским институтом кабельной промышленности и производство которого было освоено в 1963 году заводом «Молдавкабель».

Таблица 2

Характеристика нагревательного провода марки ПОСХВ-1, 1

Падение напряжения на погонный метр, в	Рабочий ток, а	Мощность на погонный метр, вт	Внешняя температура пластмассовой оболочки провода, °С
0,6	4,8	2,9	28,4
0,8	5,7	4,55	31,8
1,0	6,4	6,4	33,6
1,2	7,0	8,4	39,5

Согласно агротехническим требованиям, для интенсификации срастания компонентов виноградных прививок (привоя и подвоя) при помощи их обогрева необходимо создавать и поддерживать в течение 2—3 недель внутри стратификационных ящиков определенный температурный режим: 24—26° в зоне спайки привоя с подвоем и 14—16° у основания прививок. Для этого стратификационные ящики оборудуют одним или

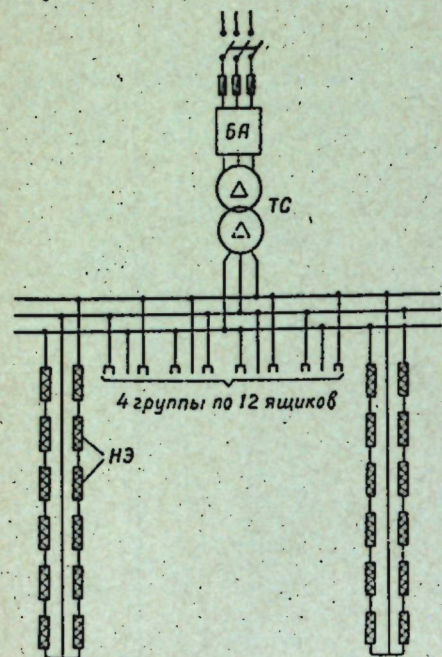


Рис. 5. Электрическая схема установки для обогрева стратификационных ящиков на пониженном напряжении: БА — блок автоматики с защитно-пусковой аппаратурой; ТС — силовой трехфазный понижающий трансформатор; НЭ — нагревательные элементы из провода ПОСХВ-1,1

двумя нагревательными элементами из провода ПОСХВ-1,1. При температуре в стратификационном помещении не ниже 12° достаточно иметь один верхний нагревательный элемент, расположенный несколько ниже зоны спаяк или над верхушками прививок; при температуре ниже 12° необходим и второй нагревательный элемент, расположенный ниже основания прививок, меньшей мощности чем верхний.

Исследования показали, что для внутреннего обогрева стратификационных ящиков стандартных размеров (0,17 м³) необходимо иметь, при температуре в помещении 12° и выше, верхний нагревательный элемент мощностью около 25 вт, а при температуре в помещении от 1 до 11° — верхний нагревательный элемент мощностью около 35 вт и нижний мощностью около 15 вт. Чтобы избежать ожога прививок при их соприкосновении с нагревательным проводом внутри ящика, не следует допускать поднятия температуры пластмассовой оболочки провода выше 33°. Для провода марки ПОСХВ-1,1 это соответствует рабочему току 6,2 а, удельному падению напряжения 0,95 в и удельной мощности около 5,5—6,0 вт на погонный метр. Чтобы получить при таком рабочем токе необходимую мощность верхних нагревательных элементов, длина нагревательного провода одного элемента должна составлять 5—6 м.

На качество стратифицированных прививок большое влияние оказывает равномерность прогревания рабочей площади стратификационных ящиков в зоне спаяк. Только при этом условии можно обеспечить одинаковую интенсивность процесса каллюсообразования у прививок как в центральной части ящика, так и в крайних рядках, расположенных на расстоянии 5—6 см от боковых и торцевых его стенок (рис. 6).

Исследования и опытно-промышленные испытания, проводившиеся в 1963—1966 гг. в ОПХ МНИИСВиВ [8], дали возможность определить наиболее эффективные конструкции нагревательных элементов с точки зрения полного и равномерного прогревания рабочей площади ящиков. Особого внимания требует обогрев крайних рядков прививок, так как охлаждение ящиков идет с их боковых сторон. Для обогрева зоны спаяк сверху наилучшие результаты получены от нагревательных элементов на металлической или деревянной рамке с переменным шагом основных витков и добавочным обводным витком, обеспечивающим более интенсивный обогрев зоны спаяк с боковых сторон (см. рис. 6). В прививочный сезон 1966 г. при помощи нагревательных элементов такой конструкции было стратифицировано в питомниководческих хозяйствах Молдавии около семи миллионов прививок, то есть около 90% общего количества прививок, стратифицированных в этом году на электрическом обогреве.

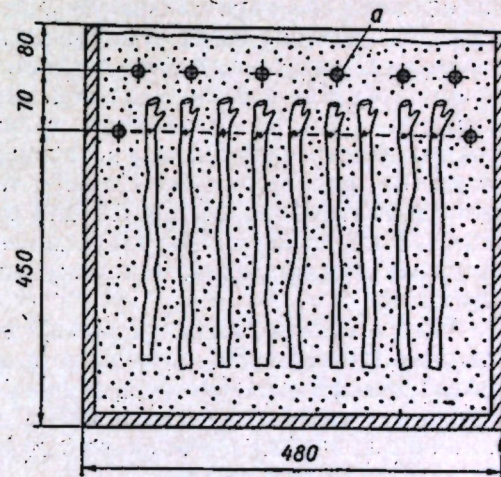


Рис. 6. Вертикальный разрез стратификационного ящика, оборудованного верхним нагревательным элементом с опущенным обводным витком из провода марки ПОСХВ-1,1 (a)

В начальный период стратификации (конец марта — первая декада апреля) температура воздуха в неотопляемых помещениях не превышает, как правило, 10—12°. В это время необходимо обогревать ящики двумя нагревательными элементами или общим отоплением доводить температуру в помещениях до 12—15°. Значительно проще применять в этом случае боковые нагревательные элементы с тремя и четырьмя витками из того же нагревательного провода марки ПОСХВ-1,1. Они обеспечивают обогрев до необходимой температуры как зоны спая (24—26°), так и зоны основания прививок (15—18°). При температуре воздуха в стратификационном помещении ниже 10° требуется нагревательный элемент с четырьмя витками мощностью около 50 *вт*, а при температуре выше 10° — нагревательный элемент с тремя витками мощностью около 30—35 *вт*.

Питание нагревательных элементов осуществляется от понижающих трансформаторов с рабочим напряжением 12, 24 или 36 *в*. Для производственных условий разработана установка мощностью 2,5 *квт* [7], включающая силовой трехфазный понижающий трансформатор марки ТС-2,5 с напряжением 380/38,4 *в*, серийно выпускаемый нашей промышленностью. Одна такая установка в состоянии обеспечить обогрев 48—96 стратификационных ящиков (в зависимости от мощности используемых нагревательных элементов). Нагревательные элементы соединяются последовательно группами по 4—8 элементов с таким расчетом, чтобы получать удельное падение напряжения около 0,95 *в* на погонный метр нагревательного провода, что соответствует, как указывалось выше, рабочему току 5,5—6,0 *а* и удельной мощности в 5—6 *вт* на погонный метр (см. табл. 2). Двенадцать таких групп мощностью 200—210 *вт* каждая подсоединяются через распределительные колодки к блоку питания (см. рис. 5) с понижающим трансформатором. Установка работает автоматически, подключая или отключая от сети со стороны 380 *в* блок питания со всеми нагревательными элементами. Весной 1966 г. в питомниководческих хозяйствах Молдавии использовалось около 100 таких установок.

Как показали опыты, установки подобного рода могут быть с успехом использованы для почвенного и воздушного обогрева разводочных теплиц, добавочного обогрева грядок, стеллажей и ящиков с рассадой в теплицах с центральным отоплением, для обогрева грядок в грибницах и вообще для обогрева открытого грунта [9], полов в цыплятниках, свиарниках-маточниках и т. д.

Электроустановки для обогрева грунта как потребители-регуляторы

Вопрос использования электроустановок для обогрева закрытого грунта в качестве потребителей-регуляторов изучался на примере нижнего Приднестровья. Исследования структуры электропотребления 17 хозяйств этого района в 1965 г. показали, что около 45% общего годового потребления приходится на такие сезонные энергоемкие процессы, как обогрев парников для выращивания овощной рассады и на машинное орошение огородов и садов, то есть на установки, которые могут работать по принудительному графику [10].

Установки для электрообогрева парников используются, как указывалось выше, в основном в течение февраля, марта и апреля. Ставится, следовательно, вопрос о возможном режиме их работы в качестве потребителей-регуляторов именно в этот период года. Суточный график нагру-

зок за февраль 1965 г. по 17 хозяйствам нижнего Приднестровья показывает, что вечерний пик достигает в этот период около 6000 *квт*, а утренний 4200 *квт*, при провалах нагрузки с 11 до 15 часов и с 22 до 6 часов. Есть возможность подключать к электросети этого района в часы провала нагрузок (общей продолжительностью 12 часов в сутки) электропарники мощностью до 2600 *квт*.

Таким образом, для заполнения суточных провалов в графике нагрузки нижнего Приднестровья требуется около 500 двадцатипрамных электропарников. В настоящее время в упомянутых 17 хозяйствах имеется уже около 4000 таких парников на электрообогреве. В течение ближайших лет число электропарниковых рам в Молдавской ССР должно увеличиться до миллиона. При таком объеме значение электропарниковых хозяйств как потребителей-регуляторов становится ощутимым для республиканской энергосистемы в целом, у которой провалы в суточном графике достигают 100 *мгвт* [11].

Исследования, проводившиеся в 1961—1966 гг. в Отделе энергетики, Институте энергетики и автоматики и затем в Отделе энергетической кибернетики АН Молдавской ССР, подтвердили целесообразность широкого использования электрического обогрева для интенсификации выращивания посадочного материала однолетних и многолетних культур в условиях Молдавии и возможность организации работы электронагревательных установок этого назначения только в часы провала нагрузок, то есть без соответствующего увеличения мощности трансформаторных подстанций и распределительных сетей высокого напряжения. В связи с этим назревает вопрос о введении поощрительных тарифов на электроэнергию, потребляемую в часы провала нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Т. Паруга. Удельные нормативы электропотребления и электронагрузок сельскохозяйственных районов МССР. «Изв. Молд. фил. АН СССР», 1959, № 11, стр. 3—18.
2. Н. Н. Романенко. Опыт электрификации колхоза от энергосистемы. «Изв. Молд. фил. АН СССР», 1959, № 11, стр. 79—90.
3. Н. Н. Романенко, И. М. Эршон. Электрообогрев парников. Кишинев, «Штиинца», 1962.
4. Проект-пример парниково-тепличного хозяйства на электрическом обогреве парников трубами нагревательными элементами для совхозов и колхозов Молдавской ССР. Т. I (двадцатипрамный парник). М., Гипросельэлектро, 1961.
5. Н. Н. Романенко, И. М. Эршон, Э. В. Решетько. Нагревательные элементы в технических резиновых трубах для электрообогрева закрытого грунта. «Изв. АН МССР», 1961, № 11, стр. 47—51.
6. Н. Н. Романенко. Электрообогрев парников на пониженном напряжении для табачной рассады. Кишинев, 1965.
7. Н. Н. Романенко. Электронагревательные установки для стратификации виноградных прививок. Кишинев, Госиздат МССР, 1963.
8. Н. Н. Романенко, И. Н. Тихвинский. Электростратификация виноградных прививок. Кишинев, Партиздат МССР, 1966.
9. Л. В. Колесник, Н. Н. Романенко. Электрообогрев прививок винограда в школке. «Садоводство, виноградарство и виноделие Молдавии», 1963, № 3, стр. 33—37.
10. Н. Н. Романенко. Использование аккумулирующих электронагревательных установок в сельском хозяйстве в качестве потребителей-регуляторов для выравнивания графика нагрузки. Тезисы докладов на совещании «Технические и экономические основы широкого внедрения электрической энергии в сельскохозяйственное производство». М., ВИЭСХ, 1965.
11. М. Л. Мисник. Прогнозирование выработки электроэнергии по составляющим ее годового прироста. «Изв. АН СССР» (энергетика и транспорт), 1965, № 1.

Н. Е. БЫРСАН, М. А. НЕПОМНЯЩИЙ, Д. И. ШИЛЬКРУТ

ОБ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ ПАКЕТА ЖЕСТЕЙ И ОБМОТКИ РОТОРА КОРОТКОЗАМКНУТОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В общепринятой методике расчета валов электрических машин не учитывается влияние жесткости пакета жестей и стержней короткозамкнутых обмоток асинхронных двигателей [1]. Как показали проведенные в Отделе энергетической кибернетики Академии наук Молдавской ССР экспериментальные исследования (см. табл. 1), вал с ротором со свободно насаженными цельными жестями обладает жесткостью по меньшей мере в два раза большей самого вала. Поэтому неучет влияния жесткости ротора приводит к резкому завышению допустимого прогиба и соответственно резкому увеличению межжелезного зазора со всеми вытекающими отрицательными последствиями (снижение $\cos \phi$ и к. п. д.), что особенно важно при повышенных скоростях (при повышенных частотах) и в удлиненных машинах, в которых наблюдается значительное снижение критических скоростей.

Таблица 1

Тип двигателей	Вал			Вал с ротором			Отношение экспериментальных прогибов вала к прогибам вала с ротором
	Экспериментальный прогиб, мм	Теоретический прогиб, мм	Погрешность, %	Экспериментальный прогиб, мм	Теоретический прогиб, мм	Погрешность, %	
МАПЗМ-14	0,1363	0,1372	- 0,66%	0,0478	0,04234	+ 11,4%	2,87
МАПЗМ-18	0,08116	0,07796	+ 4,8%	0,02767	0,03056	- 10,4%	2,94
МАПЗМ-21,9	—	—	—	0,03313	0,0343	- 3,53%	—
МАПЗМ-27,3	0,07592	0,07	+ 7,8%	0,03794	0,03149	+ 17,0%	2,0

В настоящей работе впервые сделана попытка разработать методику учета жесткости ротора.

Обоснование выбора схемы расчета

Для определения деформации изгиба (прогиба) использован наиболее общий метод теории сопротивления материалов — метод Мора. Все расчеты сделаны в пределах упругости с предположением, что материал следует закону Гука.

Было выбрано несколько расчетных схем:

1. Обмотка рассчитывалась в виде сплошного цилиндра. Предложенная схема имеет намного большую изгибную жесткость, чем действи-

тельный ротор. Погрешность превышает 50%. Этот расчет показывает, что в работе участвует только обмотка и практически можно полагать, что сцепление жестей между собой отсутствует.

2. Обмотка рассчитывалась в виде круглых стержней. Если пазы выполнены таким образом, что все сечение паза приблизительно можно заменить как составленное из нескольких круглых стержней, то при учете работы только обмотки результаты близки к опытным данным. Если форма паза такова, что замена обмотки круглыми стержнями не эквивалентна действительной обмотке, то необходимо расчет вести для фактически существующей обмотки. Поэтому было необходимо разработать новую схему расчета, которая бы точно учла площадь сечения стержней обмотки.

Поскольку вал и пакет жестей составляют одно целое, то при изгибе можно считать, что упругая линия является общей как для вала, так и для пакета жестей и обмотки. В рамках таких предположений можно применить гипотезу плоских сечений, считая, что каждая жесть выполняет функцию поперечного сечения балки. Роль жестей в этом случае заключается в следующем. Непосредственно не участвуя в какой-то ощутимой степени в образовании жесткости пакета на изгиб, они связывают систему стержней в единую статически неопределимую стержневую систему. При этом не учитываются возможные контактные напряжения между пластинами, которые могут появиться в сжатой зоне. Следует, естественно, предположить, что сцепление между жестями, появляющееся в процессе изготовления ротора, практически на растяжение не влияет. Поэтому при изгибе в растянутой зоне работают только стержни обмотки, а в сжатой зоне — стержни обмотки и частично жести.

В случае, когда обмотка заливается жидким алюминием под давлением, он заполняет все пустоты между жестями, которые остались после запрессовки. Поэтому можно считать, что модуль упругости сжатой зоны постоянный и равен модулю упругости обмотки, то есть самой слабой составляющей этой части сечения. В рамках таких предположений модули упругости растянутой и сжатой зон одинаковы. Тогда ротор можно рассматривать как элемент с двумя модулями упругости: сердцевина (вал) со своим модулем, обмотка и сжатая зона со своим.

Если сечение имеет две оси симметрии, то сжатая зона получается больше, чем растянутая, поскольку в первой зоне дополнительно в какой-то мере работают жести. Поэтому нейтральная линия смещается от упругой в сторону сжатой зоны. Но, как показывают предварительные расчеты, это смещение настолько мало, что практически в пределах упругости им можно пренебрегать. Тогда рабочие площади растянутой и сжатой зон равны, то есть в работе участвуют фактически только стержни обмотки. При таком выборе расчетной схемы мы на определенную долю уменьшаем расчетную жесткость изгиба, что идет в дополнительный запас прочности.

Итак, окончательный вид принимаемой схемы расчета прогиба вала с учетом влияния пакета жестей с обмоткой следующий.

Поскольку каждая жесть выполняет функцию плоского сечения, то жести фиксируют стержни обмотки в роторе и тогда каждое волокно стержня обмотки работает как при изгибе цельного бруса, то есть в данном поперечном сечении для всех стержней существует только одна нейтральная линия, общая для всех и проходящая через центр тяжести все-го сечения ротора.

Теоретические результаты, полученные на основе такой гипотезы,

мало отличаются от экспериментальных. Погрешность не превышает $\pm 17\%$. Этот разброс объясняется тем, что при заливке пазов алюминием неизбежна неоднородность стержней обмотки, что фактически уменьшает площадь сечения обмотки, которая в свою очередь влияет на жесткость изгиба и делает ее нестабильной даже для одного и того же типа роторов.

Аналитический расчет прогиба вала по выбранной схеме

При аналитическом расчете прогибов вала за основу принимаем изложенную выше схему. Расчет ведется для случая одной сосредоточенной силы и сравнивается с экспериментом. Без каких-либо изменений расчет распространяется на любую распределенную нагрузку, так как жесткость, установленная в рассматриваемом случае, остается такой же при любом плоском изгибе.

Общая формула для определения перемещения какой-нибудь точки по данному направлению какой-нибудь упругой системы имеет, как известно, вид:

$$U_k = \sum_{i=1}^n N_{i(p_k-1)} \cdot S_i \quad (1)$$

где U_k — искомое перемещение;

$N_{i(p_k-1)}$ — усилие, возникающее в i -ой связи системы от действия на нее обобщенной единичной силы;

S_i — действительное обобщенное перемещение i -ой связи упругой системы от действия заданных (внешних) сил.

При чистом плоском изгибе балки на двух опорах имеем:

$N_{i(p_k-1)} = M_i$ — изгибающий момент, возникающий от единичной пары сил;

$S_i = d\theta$ — угол поворота от внешних сил между двумя плоскими сечениями, находящимися на расстоянии dx .

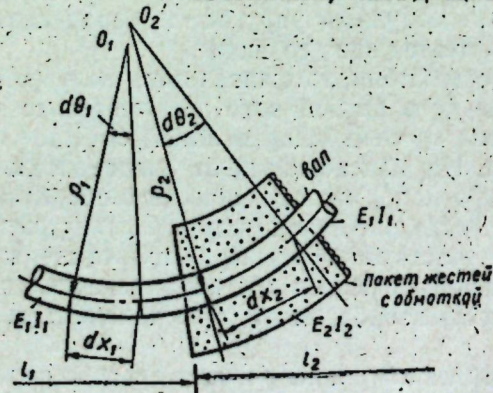


Рис. 1

поперечной силы, как обычно, не учитывается.

На первом участке уравнение упругой линии записывается:

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{M(x_1)}{E_1 I_1} = \frac{M(x_1)}{E_n I_n} \quad (2)$$

Соответственно на втором участке:

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{M(x_2)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} = \frac{M(x_2)}{E_n I_n} \quad (3)$$

где $E_n I_n$ — приведенная жесткость второго участка.

Тогда обобщенное искомое перемещение U_{k1} в какой-то k -той точке, возникающее от изгибающего момента $M(x_1)$ на первом участке, находится следующим образом: если $M_{k1}(x_1)$ принимать за изгибающий момент, возникающий от единичной обобщенной силы, приложенной в точке k , действующий по направлению искомого перемещения, то

$$U_{k1} = \int_{l_1} M_{k1} \cdot d\theta_1; \quad \rho_1 \cdot d\theta_1 = dx_1; \quad d\theta_1 = \frac{dx_1}{\rho_1} = \frac{M(x_1) \cdot dx_1}{E_1 I_1}$$

или

$$U_{k1} = \int_{l_1} \frac{M_{k1}(x_1) \cdot M(x_1)}{E_n I_n} dx_1 \quad (4)$$

где l_1 — длина первого участка.

Соответственно U_{k2} , возникающее от $M(x_2)$:

$$U_{k2} = \int_{l_2} M_{k1}(x_2) d\theta_2; \quad \rho_2 \cdot d\theta_2 = dx_2; \quad d\theta_2 = \frac{dx_2}{\rho_2} = \frac{M(x_2) \cdot dx_2}{E_n I_n}$$

или

$$U_{k2} = \int_{l_2} \frac{M_{k1}(x_2) \cdot M(x_2)}{E_n I_n} dx_2 \quad (5)$$

где l_2 — длина второго участка.

На основе принципа суперпозиции полное перемещение в рассматриваемой точке

$$U = \sum_i U_{ki} = \sum_i \int_{l_i} \frac{M_{ki}(x_i) \cdot M(x_i)}{E_n I_n} dx_i \quad (6)$$

Определение приведенной жесткости второго участка:

$$E_n I_n = E_1 I_1 + E_2 I_2;$$

где $E_1 I_1$ — жесткость сердцевин (вала);

$E_2 I_2$ — суммарная жесткость стержней обмотки ротора. Для ее нахождения необходимо определить:

I_2 — момент инерции сечения пазов ротора (сечение стержней) относительно главной центральной оси (рис. 2);

x_0, y_0 — главные центральные оси инерции сечения одного стержня обмотки;

X, Y — главные центральные оси сечения ротора.

Очевидно, что момент инерции ΔI_x одного стержня относительно оси X будет:

$$\Delta I_x = I_{x_1} + a^2 F_1, \quad \text{где } I_{x_1} = I_{1y_0} \sin^2 \alpha_1 + I_{1x_0} \cos^2 \alpha_1; \quad \alpha = \rho_0 \sin \alpha_1$$

$$\Delta I_x = I_{1y_0} \sin^2 \alpha_1 + I_{1x_0} \cos^2 \alpha_1 + F_1 \cdot \rho_0^2 \sin^2 \alpha_1$$

или
$$\Delta I_x = (I_{1y_0} + F_1 \cdot \rho_0^2) \sin^2 \alpha_1 + I_{1x_0} \cdot \cos^2 \alpha_1$$

При учете всех стержней получим:

$$I_x = \sum_{i=1}^{z_2} [(I_{1y_0} + F_1 \rho_0^2) \sin^2 \alpha_i + I_{1x_0} \cdot \cos^2 \alpha_i], \quad (7)$$

где z_2 — количество пазов.

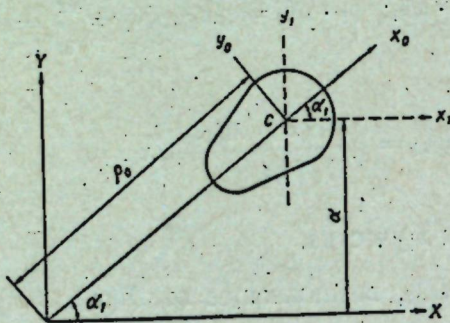


Рис. 2

Так как все пазы одинаковые и расположены по окружности, то все I_i , ρ_i и F_i одинаковы и тогда окончательно

$$I_x = (I_{y_0} + F_0 \rho_0^2) \sum_{i=1}^{z_2} \sin^2 \alpha_i + I_{x_0} \sum_{i=1}^{z_2} \cos^2 \alpha_i. \quad (8)$$

Таким образом, с определением суммарного момента инерции сечения обмотки задача о вычислении прогиба ротора будет фактически решена, так как ротор с валом состоит из трех участков, из которых I и III — участки круглого вала. Для них момент инерции определяется по известной формуле $I = \frac{\pi d^4}{64}$, а средний участок состоит из соответствующего участка вала и клетки из стержней обмотки. Приведенная жесткость его подсчитывается по формуле:

$$E_n I_n = E_1 I_1 + E_2 I_2,$$

где E_1 ; E_2 — соответственно модули упругости стали вала и материала стержней обмотки;

I_1 ; I_2 — моменты инерции участка вала под ротором и $I_2 = I_x$ (см. (8)).

Расчет момента инерции для конкретных роторов

Были подсчитаны I_2 для ряда конкретных роторов (данные и чертежи пазов приведены в табл. 2).

Таблица 2

Типы двигателей	Число пазов ротора	I_{y_0} одного паза, см ⁴	I_{x_0} одного паза, см ⁴	I_x , см ⁴	Рисунок паза
МАПЗМ-14 . . .	22	0,01255	0,039	49,8	
МАПЗМ-18 . . .	22	0,02354	0,07594	137,5	
МАПЗМ-21,9 . . .	22	0,05749	0,36591	293,3	
МАПЗМ-27,3 . . .	22	0,0813	0,4662	355,8	

Сравнение с экспериментальными данными

Для проверки принятой расчетной схемы были проведены эксперименты по определению прогиба ряда конкретных роторов под действием сосредоточенной силы P , приложенной посередине ротора. Схема нагружения показана на рис. 3.

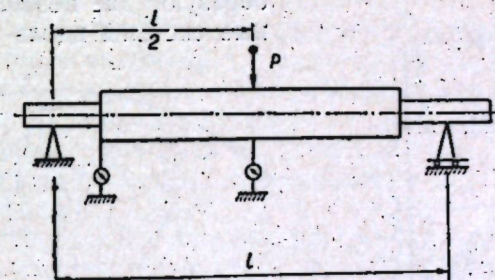


Рис. 3

Чтобы сравнить теоретические и экспериментальные данные, подсчитывались согласно принятой схеме расчета теоретические значения прогибов под силой посредством интеграла Мора, используя при этом выведенную нами формулу (8). Результаты сведены в табл. 1. Приведенные в этой таблице данные соответствуют нагрузке в 100 кг.

ЛИТЕРАТУРА

- Н. Г. Григорян. Метод расчета вала электрической машины с учетом характера распределения магнитных нагрузок вдоль вала. М., ВЭП, 1954, № 4.
- В. И. Федосьев. Сопротивление материалов. М., 1960.

М. В. ПАЛАДИИ, В. С. ЛЕРНЕР

К ТЕОРИИ УПРАВЛЯЕМОГО ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассматриваются некоторые вопросы теории управляемого трехфазного асинхронного двигателя (УТАД), предложенного авторами [1, 2].

Принцип работы УТАД

По принципу действия УТАД имеет много общего с магнитным усилителем (МУ). Как и магнитный усилитель, УТАД основан на использовании свойства дросселя с ферромагнитным сердечником менять свое индуктивное сопротивление при подмагничивании. На рис. 1 построена схема одной фазы управляемого трехфазного асинхронного двигателя. W_{1c} и W_{2c} — рабочие трехфазные обмотки, которые соединены последовательно (встречно) и образуют две независимые магнитные системы вдоль общего ротора.

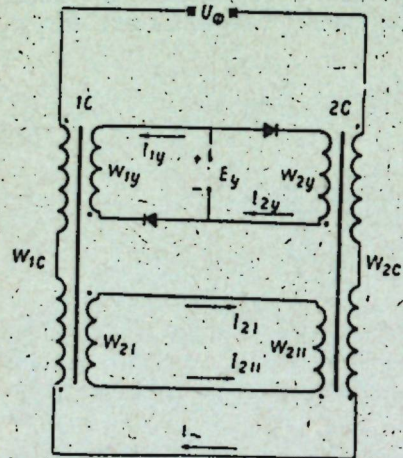


Рис. 1. Принципиальная схема одной фазы УТАД (U_ϕ — напряжение фазы)

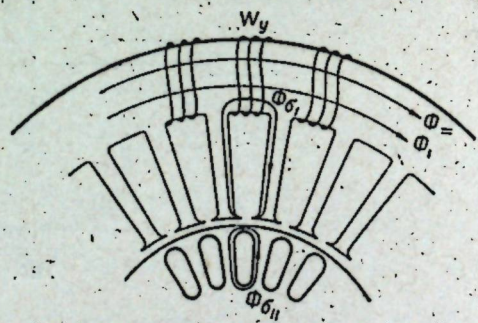


Рис. 2. Схема укладки обмотки управления (Φ_{01} и Φ_{02} — магнитные потоки рассеивания)

Обмотка ротора W_{21} и W_{22} (фазная без колец и контактов [1]) намотана так, что наводимые в ней ЭДС за счет магнитных потоков обмоток W_{1c} и W_{2c} направлены навстречу друг другу. Для изменения степени насыщения магнитопроводов 1С и 2С (см. рис. 1) в тех же пазах, что и рабочие обмотки W_{1c} и W_{2c} , уложены обмотки управления W_{1y} и W_{2y} , которые размещаются на спинке статора (рис. 2). При таком расположении обмоток вращающийся

магнитный поток статора создает в витках W_{1y} и W_{2y} , расположенных диаметрально по спинке статора, ЭДС равные по величине и противоположные по знаку.

Таким образом, сумма ЭДС всех витков обмоток управления, при всяком симметричном законе распределения магнитной индукции спинки статора, равна нулю. В отличие от обычных магнитных усилителей, в которых постоянный магнитный поток насыщает весь магнитопровод, в УТАД поток Φ_0 (см. рис. 2), созданный обмотками управления W_{1y} и W_{2y} , замыкается только по спинке статора. Проведение магнитного потока Φ_0 через воздушный зазор потребовало бы дополнительной МДС, а следовательно, и дополнительной мощности управления; кроме того, вращаясь в постоянном магнитном потоке, ротор создал бы тормозной момент.

При некотором одинаковом подмагничивании обмоток управления W_{1y} и W_{2y} напряжения, приложенные к статорным обмоткам W_{1c} и W_{2c} , равны; вращающие моменты, созданные прямым и инверсными полями, равны, и ротор неподвижен. ЭДС, индуцируемые в роторе, равны по величине и направлены встречно, вследствие чего ток, потребляемый ротором, равен нулю. При увеличении степени подмагничивания одного магнитопровода и уменьшении степени подмагничивания другого напряжения, приложенные к обмоткам W_{1c} и W_{2c} , перераспределяются и двигатель соответственно начинает вращаться в сторону прямого или инверсного поля. Таким образом, обеспечивается управление скоростью двигателя за счет изменения величины напряжения, приложенного к каждой из статорных обмоток. Это позволяет регулировать также ток двигателя и развиваемый им момент. Поясним сказанное на примере эквивалентной схемы одной фазы двигателя (рис. 3), которая может быть представлена как последовательное соединение двух эквивалентных сопротивлений Z_{01} и Z_{02} , соответствующих половинам УТАД.

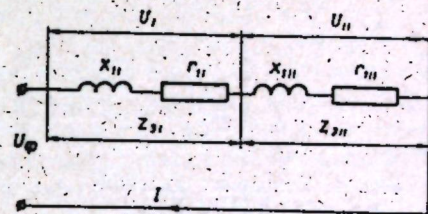


Рис. 3. Эквивалентная схема фазы двигателя

Проанализируем последовательно различные режимы работы УТАД.

1. При подмагничивающих токах $I_{1y} = I_{2y}$ и при условии симметрии обмоток W_{1c} и W_{2c} напряжения U_1 и U_{11} (см. рис. 3), приложенные к сопротивлениям Z_{01} и Z_{02} , равны по величине и совпадают по фазе с U_ϕ . Вследствие того, что ЭДС ротора E_{21} и E_{22} смещены относительно друг друга на 180° , созданные ими токи I_{21} и I_{22} (рис. 4) взаимно компенсируются; следовательно, общий ток ротора

$$\vec{I}_p = \vec{I}_{21} + (-\vec{I}_{22}) = 0. \quad (1)$$

Поэтому ток, протекающий по цепи (см. рис. 3), является током холостого хода I_0 УТАД, величина которого зависит от величины подмагничивающего тока и приложенного фазного напряжения. На рис. 5 изображены зависимости тока холостого хода УТАД от величины напряженности магнитного поля управления H_0 при различных по-

стоянных значениях U_{ϕ} , снятые для одного из изготовленных макетов УТАД с номинальными данными: $U = 100$ в, $I_{II} = 1,5$ а, $n = 2860$ об/мин. Как видно на рис. 5, при полном напряжении сети, то есть при $U_I = U_{II} = 50$ в, ток холостого хода при $n = 0$ (I_p) меньше 10% номинального тока I_{II} .

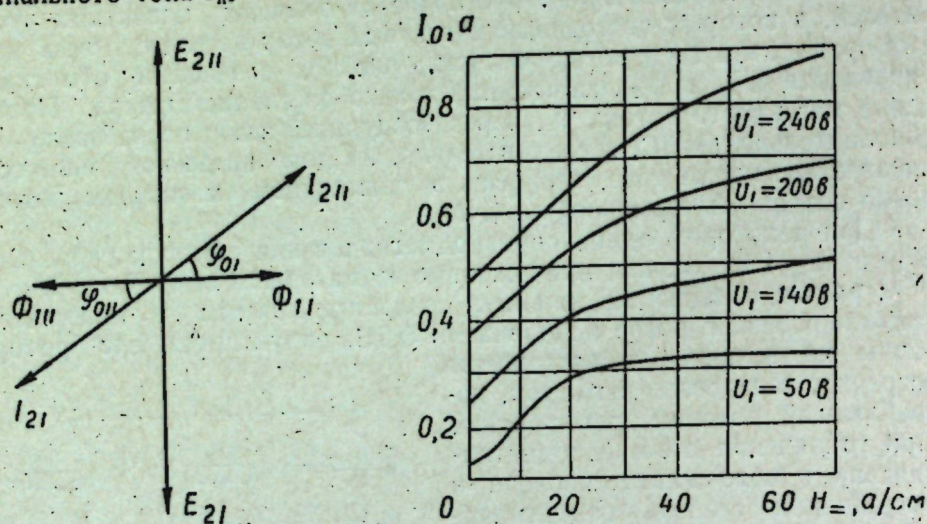


Рис. 4. Векторная диаграмма токов и ЭДС УТАД (Φ_{II} и Φ_{III} — магнитные потоки, образованные обмотками статора)

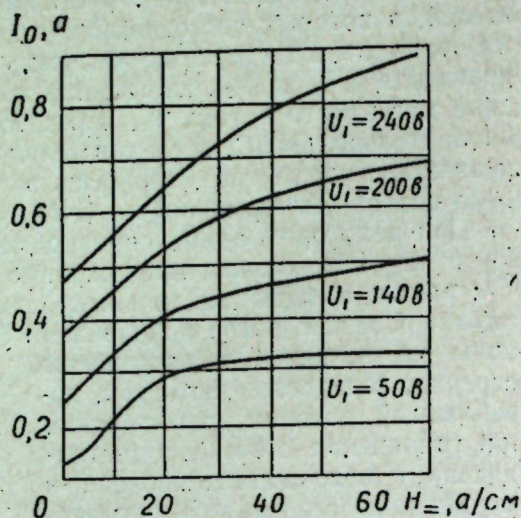


Рис. 5. Зависимость тока холостого хода УТАД от напряженности постоянного поля [$I_0 = f(H_y)$] при $U_I = \text{const}$

2. При уменьшении одного и увеличении другого тока подмагничивания изменяются индуктивные сопротивления намагничивающих контуров половин двигателя X_{II} и X_{III} . По [3] индуктивные сопротивления

$$X_{II} = \frac{K}{K_{pI}} \quad \text{и} \quad X_{III} = \frac{K}{K_{pII}} \quad (2)$$

где K — конструктивный коэффициент, зависящий от параметров двигателя;

K_{pI} и K_{pII} — соответственно коэффициенты насыщения магнитопроводов 1С и 2С, зависящие от постоянного и переменного магнитных полей.

Поэтому равенство напряжений U_I и U_{II} , приложенных к W_{1c} и W_{2c} , нарушается и двигатель приходит во вращение. На рис. 6, а изображена векторная диаграмма напряжений УТАД для случая $I_{1y} < I_{2y}$. Вследствие изменения величин напряжений U_I и U_{II} , приложенных к половинам двигателя, изменяются величины ЭДС и токов ротора, поэтому равенство (1) нарушается, то есть

$$\vec{I}_p = \vec{I}_{2I} + (-\vec{I}_{2II}) \neq 0. \quad (3)$$

Чем больше разность напряжений, тем больше ток I_p и, соответственно, вращающий момент двигателя. На рис. 7 нанесены кривые

изменения тока ротора в зависимости от напряженности магнитного поля управления H_{1y} при различных $H_{2y} = \text{const}$ (а/см), снятые при постоянном статическом моменте $M_c = M_{II}$.

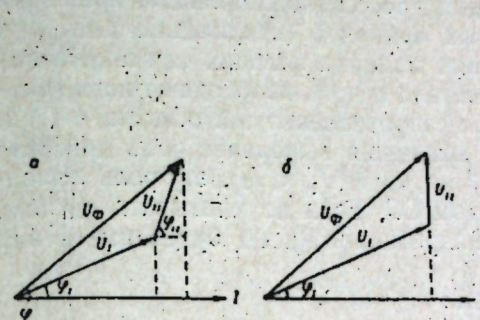


Рис. 6. Векторная диаграмма напряжений УТАД: φ_I и φ_{II} — углы сдвига между током и напряжениями U_I и U_{II}

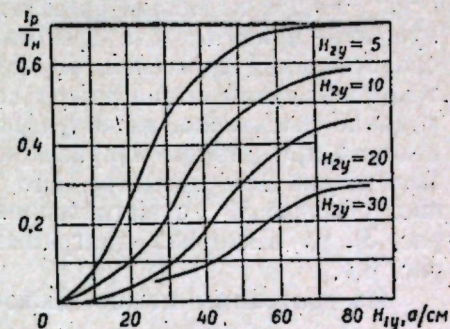


Рис. 7. Зависимость тока ротора от напряженности поля управления [$I_p = f(H_{1y})$] при $H_{2y} = \text{const}$

Для оценки работы двигателя в статических и переходных режимах необходимо рассмотреть зависимость скорости вращения его от тока и развиваемого им момента, а также зависимость тока и момента в функции времени. Вследствие сложных физических процессов, возникающих при работе двигателя в установившихся и переходных режимах, построение этих зависимостей представляет весьма сложную задачу, решение которой возможно с помощью цифровых или аналоговых вычислительных устройств.

Однако введением в анализ работы УТАД ряда допущений можно получить приемлемые для инженерной практики методы расчета. Основное упрощение заключается в том, чтобы свести расчет статических характеристик УТАД к дросселю насыщения с выходом на переменном токе. Такие методы рассмотрены, например, в [4, 5]. Как известно, в дроссельном приводе индуктивное сопротивление двигателя зависит от величины приложенного к нему напряжения и скольжения, а индуктивное сопротивление дросселя — только от величины переменного тока и тока подмагничивания. В рассматриваемом двигателе обе обмотки статора W_{1c} и W_{2c} магнитно связаны с ротором, поэтому их индуктивные сопротивления являются функциями потоков (постоянного и переменного полей) и скорости. Вследствие этого напряжения, приложенные к половинам УТАД, также зависят от скорости и величин постоянного и переменного магнитных потоков. Эти зависимости показаны на рис. 8. Кривые $U_I = f(S)$ и $U_{II} = f(S)$, изображенные на рисунке, получены вращением УТАД

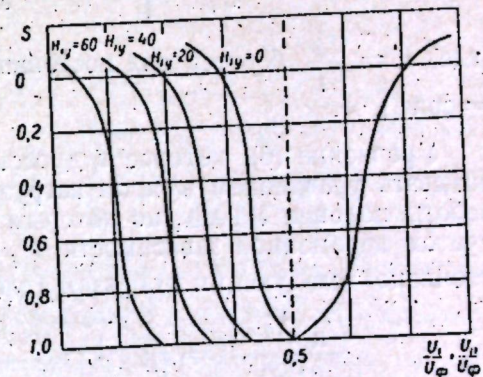


Рис. 8. Зависимость напряжений половин УТАД, снятых при различных токах управления

посторонним двигателем от $S=1,0$ до $S=0$, при этом $H=0$, а H_{1y} принимало различные значения ($a/cм$), указанные на рис. 8.

Для того чтобы свести расчеты для дроссельного привода, кроме допущений, принятых для дроссельных приводов (исключение активных сопротивлений дросселей, исключение влияния высших гармонических токов и напряжений на работу двигателя и др.), необходимо исключить влияние скольжения на индуктивное сопротивление той обмотки УТАД, которая при данном направлении вращения выполняет роль дросселя насыщения. Для рассмотренного случая, когда $I_{1y} < I_{2y}$, эту роль выполняет обмотка W_{2c} с магнитопроводом 2С. Если не учитывать r_{11} (см. рис. 3), то векторная диаграмма напряжений УТАД будет иметь вид рис. 6, б.

Из диаграммы можно заключить:

$$U_{\Phi}^2 = U_1^2 \cos^2 \varphi_1(S) + [U_{II} + U_1 \sin \varphi_1(S)]^2, \quad (4)$$

где U_{II} — напряжение, приложенное к обмотке W_{2c} , выполняющей роль дросселя насыщения.

Преобразуя равенство (4), получим

$$U_{II} = \sqrt{U_{\Phi}^2 - U_1^2 \cos^2 \varphi_1(S)} - U_1 \sin \varphi_1(S). \quad (5)$$

Откуда

$$\frac{U_{II}}{U_{\Phi}} = \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \varphi_1(S)}{K^2}} - \frac{\sin \varphi_1(S)}{K} \quad (6)$$

(где $K = \frac{U_{\Phi}}{U_1}$ берется для постоянной скорости, то есть при $Z_{\Phi 1}(S) = \text{const}$).

Уравнение (6), которое в дроссельном приводе [4 — 6] принято называть уравнением эллипса нагрузки, выражает условие совместной работы половин УТАД, по которым протекает один и тот же ток. С учетом переменной зависимости $U_1 = f(S)$ уравнение (6) может быть уточнено следующим образом (для случая $I_{1y} < I_{2y}$):

$$\frac{U_{II} - \Delta U_{II}}{U_{\Phi}} = \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \varphi_1(S)}{K_1'^2}} - \sin \varphi_1(S), \quad (7)$$

где $K_1' = \frac{U_{\Phi}}{U_1 + \Delta U_1}$;

ΔU_1 и ΔU_{II} — соответственно изменения величин напряжений U_1 и U_{II} в функции скорости;

ΔU_1 и ΔU_{II} — находятся из опытных кривых (см. рис. 8) как разность напряжений для значений скольжения $S=1,0$ и S текущего значения скольжения.

Для определения режимов работы УТАД необходимо в равенство (6) подставить значения $\cos \varphi_1$ и $\sin \varphi_1$ и, изменяя K_1' от 1 до ∞ (обмотка W_{2c} замкнута накоротко и все напряжение сети приложено к W_{1c}), построить на плоскости вольт-амперных характеристик

$U_I = f(I_{\sim})$ и $U_{II} = f(I_{\sim})$ (рис. 9) эллипсы нагрузок (пунктирные линии) от $\tilde{n}=0$ до $\tilde{n} = n_{\text{макс}}$. Такое построение может быть выполнено если известны зависимости $Z_{\Phi 1} = f(S)$ и $Z_{\Phi 11} = f(S)$. Ввиду ограниченного объема статьи эти зависимости подробнее не рассматриваются.

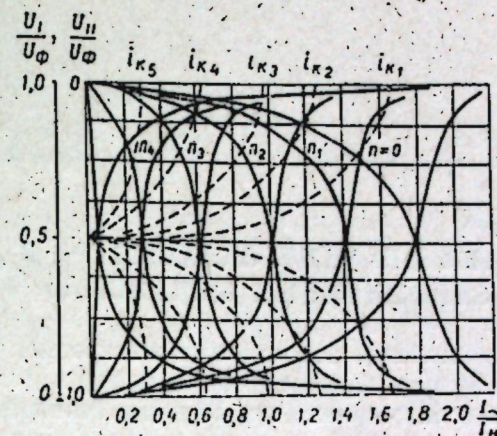


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики УТАД $U_I = f(I_{\sim})$, $U_{II} = f(I_{\sim})$, снятые при различных токах управления

Изложенные результаты являются частью работы по теоретическому и экспериментальному исследованию управляемого трехфазного асинхронного двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Лернер, М. В. Паладий. Об асинхронном электроприводе с бесконтактным управлением. «Изв. АН МССР», 1966, № 5.
2. М. В. Паладий. Асинхронный управляемый двигатель. Материалы Второй научно-технической конференции КПИ. Кишинев, 1966.
3. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины. М., Госэнергоиздат, 1965.
4. М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, А. В. Шинянский. Асинхронный электропривод с дросселями насыщения. М., изд-во «Энергия», 1964.
5. О. И. Авен, С. М. Доманицкий. Бесконтактные исполнительные устройства промышленной автоматики. М., Госэнергоиздат, 1960.
6. В. С. Лернер. О схеме включения асинхронного двигателя и магнитного усилителя. «Вестник электропромышленности», 1960, № 8.

М. А. НЕПОМНЯЩИИ

О СОСТАВЛЯЮЩИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ДВИГАТЕЛЯХ, ЗАПОЛНЕННЫХ ЖИДКОСТЬЮ

Асинхронные двигатели, заполненные жидкостью, широко используемые в химическом производстве, добыче нефти и для откачки воды из скважин, имеют к. п. д. ниже, чем обычные асинхронные двигатели, за счет повышенных механических потерь, вызываемых гидравлическим сопротивлением вращению ротора, и увеличенных потерь в подшипниках и подпятнике. Потери от трения ротора о жидкость могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в [1] или [2]. По методике [1], как правило, потери получаются меньше действительных, по [2] — больше действительных, но при этом точнее учитывается влияние величины между-железного зазора и коэффициента кинематической вязкости жидкости, который зависит от температуры.

Опытным путем установлены соотношения между величиной полных механических потерь и потерь от трения ротора о жидкость в зависимости от мощности электродвигателя при 3000 об/мин:

$$k_{тр 3000} = \frac{P_{мех}}{P_{тр}}$$

При переходе на повышенную частоту тока и увеличении скорости вращения возникают определенные трудности в оценке соотношения $P_{мех}$ и $P_{тр}$, так как для расчета электродвигателя погружного насоса до создания его макета необходимо предварительно определить его к. п. д. При этом следует учесть возможные пределы увеличения окружной скорости вала при резино-металлических подшипниках и допустимые удельные давления на подшипник. По имеющимся данным в [3], $v_{макс} = 25,4$ м/сек, $P_{макс} = 21,1$ кг/см², что вполне приемлемо при переходе на 6000 об/мин для погружных электродвигателей при $d_{вмакс} = 160$ мм. Так как потери от трения ротора о жидкость зависят в основном от величины $D_p^4 \cdot n^3 \cdot l$, то для качественной оценки изменения соотношения между величинами потерь в подшипниках и от трения ротора о жидкость принимаем следующее.

При увеличении скорости вращения в два раза при неизменной мощности момент, развиваемый двигателем, уменьшается вдвое. Объем активной части двигателя уменьшается в два раза. По предварительным расчетам, длина пакета ротора при этом уменьшается в 1,5 раза, а диаметр ротора будет равен 0,865 от величины диаметра при 3000 об/мин.

При этом потери от трения ротора о жидкость увеличиваются примерно в 3 раза, а потери в подшипниках в 1,16 раза.

Приведенные выше положения выразим равенствами:

$$k_{тр 3000} = 1 + \frac{P_{п}}{P_{тр}}; \quad (1)$$

$$k_{тр 6000} = 1 + \frac{P'_{п}}{P'_{тр}} = 1 + \frac{1,16 P_{п}}{3 P_{тр}}. \quad (2)$$

Сравнивая выражения (1) и (2), получим данные графы 3 и 5 таблицы:

Мощность двигателя, кВт	По Пикмаусу [1]		По Корценштейну [2]	
	$k_{тр 3000}$	$k_{тр 6000}$	$k_{тр 3000}$	$k_{тр 6000}$
1,5	1,7	1,27	1,50	1,19
2,5—5,0	1,5	1,19	1,37	1,15
8,0—35	1,3	1,12	1,20	1,08
45,0—90,0	1,2	1,08	1,14	1,05
100,0	1,1	1,04	1,05	1,02

Полученные результаты могут быть использованы для расчетов погружных электродвигателей как предварительные с последующим уточнением их при накоплении данных по испытаниям большого количества построенных машин. Коэффициенты $k_{тр 3000}$ и $k_{тр 6000}$ отражают физическую сущность такого явления, когда при увеличении скорости вращения двигателя, при неизменной мощности его, потери от трения ротора о жидкость увеличиваются в значительно большей степени, чем потери в подшипниках. При 3000 об/мин это явление проверено на построенных двигателях и подтверждается уменьшением $k_{тр 3000}$ с ростом мощности двигателей.

Обозначения:

D_p — диаметр ротора;

n — скорость вращения ротора;

l — длина ротора;

$k_{тр 3000}$ — отношение полных механических потерь к потерям от трения ротора о жидкость при 3000 об/мин;

$k_{тр 6000}$ — то же при 6000 об/мин;

$P_{п}$ — потери от трения в подшипниках при 3000 об/мин;

$P'_{п}$ — то же при 6000 об/мин;

$P_{тр}$ — потери от трения ротора о жидкость при 3000 об/мин;

$P'_{тр}$ — то же при 6000 об/мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Picmaus. Der Asynchronmotor als Antrieb Soffflüssloser Pumpen. Elektrotechn. u. Maschinenb., 1961, Nr. 3.
2. Э. Я. Корценштейн. Судовые погружные водосливные электронасосы. Л., «Судостроение», 1964.
3. Г. А. Голубев, Г. М. Кукин. Уплотнения вращающихся валов. М., «Наука», 1966.

О. К. БАЗИЛЕНКО

О РАБОТЕ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Развитие систем управления сложными производственными комплексами, расположенными на больших расстояниях, стимулирует широкое внедрение в народное хозяйство страны разнообразных систем телемеханики и передачи данных. При этом постоянно повышаются требования к скорости и достоверности передачи информации. В дискретных системах одним из основных методов повышения достоверности без существенного снижения скорости передачи является использование обратной связи. Однако системы с обратной связью имеют особенность, которая обычно не учитывается в простых системах связи, но оказывается весьма существенной при передаче информации, используемой для управления.

Как правило, если информация используется для управления, то передаваемые кодовые слова должны поступать в строго определенные адреса, и при этом ошибкой является как трансформация кодового слова, так и прием правильного слова в «чужой» адрес. Подобная ситуация может иметь место, например, при обмене информацией между ЭЦВМ, если каждое кодовое слово записывается в отдельную ячейку памяти и последовательность заполнения ячеек задана заранее (то есть выполняется так называемый групповой ввод), при работе системы обтекающего контроля, когда каждое кодовое слово записывается в отдельную ячейку УВМ или передается в определенную часть мнемосхемы или сигнального табло для индикации.

С другой стороны, и в системах с решающей [2, 3], и в системах с информационной обратной связью [3] возможно появление лишних и пропадание элементов сообщения, при передаче которых используется обратная связь (в рассматриваемом случае — кодовых слов). Вставки и выпадения слов приводят к тому, что остальные слова сдвигаются и записываются по неверным адресам.

В Отделе энергетической кибернетики АН Молдавской ССР совместно с одной из лабораторий Института автоматики и телемеханики (технической кибернетики) АН СССР был проведен цикл исследований, посвященных оценкам вероятности ошибок из-за неправильной адресации кодовых слов. Ниже приведены первые результаты, полученные в этих работах. Были рассмотрены системы с решающей обратной связью, с информационной обратной связью с комбинацией стирания и с информационной обратной связью и передаваемым перед каждым кодовым словом префиксом — индикатором повторения или первой передачи.

Появление сдвигов в системах с обратной связью

В рассмотренных системах передачи информации с обратными связями сдвиги при передаче кодового слова C_k^t с номером t в последовательности кодовых слов и с номером k в списке информационных кодовых слов происходят в случаях, перечисленных в табл. 1.

Таблица 1

Система	Условия появления сдвига на шаг вперед	Условия появления сдвига на шаг назад	Источник ошибки, следствием которой является сдвиг
С решающей обратной связью	Вместо подтверждения приема принимается запрос повторения: R/A	Вместо запроса повторения принимается подтверждение приема: A/R	Обратный канал
С информационной обратной связью и префиксом	Вместо указателя повторения принимается указатель первой передачи: A/R	Вместо указателя первой передачи принимается указатель повторения: R/A	Прямой канал
С информационной обратной связью и специальной комбинацией стирания E	Вместо комбинации стирания принимается информационное кодовое слово: $C_{il}E, i = \overline{1, M}$	Вместо информационного слова принимается комбинация стирания: E/C_k	Прямой канал

Вероятности α_k (сдвига на шаг вперед) и β_k (сдвига на шаг назад) при передаче слова C_k в случае когда канал стационарен и для любого t и k вероятность появления C_k постоянна для данного k , можно определить по формулам, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

Система	Вероятность сдвига вперед	Вероятность сдвига назад
С решающей обратной связью	$\sum_{s=1}^r p[V^s \epsilon B_i^s; R/V^s \epsilon B_i^s; \dots; V^s \epsilon G_i^s; R/V^s \epsilon G_i^s];$ $p(V^s \epsilon G_i^s) = 1$	$\sum_{s=1}^{r-1} p[V^s \epsilon B_i^s; R/V^s \epsilon B_i^s; \dots; V^s \epsilon B^s; A/V^s \epsilon B^s]$
С информационной обратной связью и префиксом	$\sum_{s=1}^{r-1} p(AC_{il}/RC_k)^s p_{n,c}^s$	$p(RC_{il}/AC_k)(1 - p_{n,c}^1)$
С информационной обратной связью и комбинацией стирания	$p(C_{il}/E) \sum_{s=1}^{r-1} p_{n,c}^s; i = \overline{1, M}$	$p(E/C_k) \sum_{s=1}^r (1 - p_{n,c}^s)$

В таблицах использованы следующие обозначения:

- M — число информационных кодовых слов;
 C_k^s — область приема при s -том повторении слова C_k ;
 V^s — приходящее из дискретного канала при s -том повторении слова, при $V^s \in G_i$; $i = \overline{1, M}$ по обратному каналу посылается подтверждение приема A ;
 B^s — запрещенная область, при $V^s \in B^s$ по обратному каналу посылается запрос повторения R ;
 $p_{н.с.}^s$ — вероятность того, что после s повторений слова контрольная информация не совпадает с требуемой $f(C_k)$.

При последующем анализе систем вероятности α_k и β_k заменяются (при указанном выше допущении) их средними по всем k значениями α и β .

Вероятность ошибки из-за сдвига в сосредоточенных системах

Если в системе запись слова в неправильный адрес является ошибкой, то вероятность $p_{ош}^t$ ошибки при приеме t -того в последовательности кодового слова равна

$$p_{ош}^t \approx p_c^{t-1} + p_{ошk}$$

где p_c^{t-1} — вероятность наличия сдвига остатка последовательности кодовых слов после передачи $t-1$ слов (или вероятность ошибки из-за сдвига при передаче t -того слова);

$p_{ошk}$ — вероятность ошибки при передаче данного слова, если сдвига после передачи $t-1$ слов не было.

Работа системы однократной передачи со сдвигами на протяжении t шагов (при передаче t слов) может быть описана [4] дискретной марковской цепью с $2m+1 > 2t+1$ состояниями, имеющими номера от $-m$ до $+m$. Номер состояния цепи равен величине сдвига, причем положительным считается сдвиг вперед. Вычисление точного значения вероятности отсутствия сдвига для такой цепи сопряжено при не очень малых t с громадным объемом вычислений и поэтому нецелесообразно.

Если принять, что в марковской цепи, описывающей работу системы со сдвигами, $m \leq t$ и вероятности сохранения крайних состояний соответственно равны $p_{mm} = \gamma + \alpha$ и $p_{(-m)(-m)} = \gamma + \beta$ (γ — вероятность сохранения любого из „внутренних“ состояний, $\gamma = p_{ii}$, $i = -m+1, m-1$), то в такой цепи вероятность отсутствия сдвига будет больше действительной при $t > m$ и может служить ее верхней границей. Если же принять, что крайние состояния цепи поглощающие [9] ($p_{mm} = p_{(-m)(-m)} = 1$), то вероятность отсутствия сдвига в такой цепи будет при $t > m$ меньше действительной и может служить ее нижней границей. Вероятность p_c^t наличия сдвига после передачи t слов в двух только что описанных случаях будет при $t > m$ соответственно меньше и больше ее действительного значения.

Работа циклической системы, в которой непрерывно (или по крайней мере больше одного раза) заполняется конечный ряд из a адресов, может быть описана [5] дискретной марковской цепью с a

состояниями, имеющими номера от 0 до $a-1$. При этом номер состояния цепи равен величине сдвига вперед, так как в этом случае сдвиг на j шагов в любом направлении эквивалентен сдвигу на $(a-j)_{mod a}$ шагов в противоположном направлении. Элементы матрицы переходов этой цепи имеют вид $p_{jj} = \gamma = 1 - \alpha - \beta$; $p_{j(j-1)_{mod a}} = \beta$; $p_{j(j+1)_{mod a}} = \alpha$; $p_{j(j-k)}$ для $k \geq 2$. Если принять, что в цепи указанного типа число состояний a_1 меньше чем a , то вероятность отсутствия сдвига будет больше действительной (вероятность сдвига меньше действительной) при $t > a_1$ и может служить ее верхней (нижней) границей. Нижней границей вероятности отсутствия сдвига может служить вероятность для той же цепи, что и в случае системы однократной передачи, если положить $m \leq E \left[\frac{a}{2} \right]$ ($E[x]$ — целая часть числа x).

Было показано, что при $t \rightarrow \infty$ для вероятности p_0^t отсутствия сдвига после передачи t слов справедливо: $p_0^t < \frac{1}{2m+1}$ в системе однократной передачи, причем $m \ll t$ [4], и $p_0^t \rightarrow \frac{1}{a}$ в циклической системе [5], то есть, что без принятия специальных мер по повышению устойчивости к сдвигу системы с обратной связью не могут работать неограниченно долго (например, даже при $m=1$ $p_0^t < \frac{1}{3}$; $t \rightarrow \infty$).

Наиболее грубые, но зато наиболее просто вычисляемые границы вероятности отсутствия сдвига (и для вероятности наличия сдвига) для систем однократной передачи и циклических систем получаются при $m=1$ и при $a_1=2$ (для циклических систем). Но и эти грубые границы оказываются достаточно близкими. В случае, когда $\alpha t; \beta t \ll 1$, эти границы практически совпадают, а для вероятности p_c^t наличия сдвига после передачи t слов справедлива исключительно простая приближенная формула

$$p_c^t \approx t(\alpha + \beta).$$

Следовательно, при ограниченном числе кодовых слов, передаваемых по системе, нет смысла стремиться к тому, чтобы величина $t_{\max}(\alpha + \beta)$ была значительно меньше $p_{ошk}$, то есть нет смысла стремиться к абсолютно или очень надежному обратному каналу в системе с решающей обратной связью. С другой стороны, при заданных α и β величину t_{\max} следует ограничивать так, чтобы $t_{\max}(\alpha + \beta)$ не превышало величины $p_{ошk}$ (или имело тот же порядок, что и $p_{ошk}$). В системах с информационной обратной связью сдвиг обусловлен ошибками в прямом канале, и повышение надежности обратного канала в этом случае не повышает устойчивости системы к сдвигу.

Обратная связь в рассредоточенных системах
с временным разделением сигналов

На практике часто встречаются системы с рассредоточенным источником или получателем, в которых последовательность слов передается (пословно) от ряда источников одному получателю или от одного источника ряду получателей [6]. Если последовательность источников (получателей) фиксирована и фиксирован также начальный источник (полу-

чателю), то адрес пункта, от которого (которому) передается слово, определяется однозначно числом переданных от начала передачи кодовых слов, за исключением повторенных. Можно считать, что в рассредоточенных системах существуют пары «сосредоточенный источник — сосредоточенный получатель», причем каждая пара полезно работает только один раз за цикл. Остальное время пара работает вхолостую, только для подсчета числа переданных слов. В каждой из пар сдвиг почти во всех случаях возможен на протяжении всей работы системы, тогда как ошибки при прямой передаче возможны только во время полезной работы пары.

Искажения сообщений решающей обратной связи, префиксов, а также взаимные переходы комбинации стирания и информационных слов могут быть независимыми на разных пунктах, частично или полностью зависимыми. В некоторых отмеченных в [7] случаях сдвиг в рассредоточенных системах может быть обнаружен и скорректирован, если имеется специальный дополнительный канал, по которому можно передать номер очередного пункта.

Таблица 3

Система	Характер зависимости искажений		Дополнительный канал
	независимые	полностью зависимые	
С решающей обратной связью и рассредоточенным получателем	$2(t-1)(\alpha+\beta)$	$E \left[\frac{t-a}{a} \right] (\alpha+\beta)$	Нет
	$(t-1)(\alpha+\beta); E \left[\frac{t}{a} \right] = 0;$ $(t-1)(\alpha+\beta) + (a-1)x;$ $E \left[\frac{t}{a} \right] \geq 1$	$E \left[\frac{t-a}{a} \right] \beta$	Есть
С решающей обратной связью и рассредоточенным источником	$(t-1)(\alpha+\beta)$	$(t-1)(\alpha+\beta)$	Нет
	$(t-1)x; E \left[\frac{t}{a} \right] = 0;$ $(a-1)x; E \left[\frac{t}{a} \right] \geq 1$	$(t-1)(\alpha+\beta)$	Есть
С информационной обратной связью и рассредоточенным получателем	$(t-1)(\alpha+\beta)$	$(t-1)(\alpha+\beta)$	Нет
	$(t-1 - aE \left[\frac{t}{a} \right])x$	$(t-1)(\alpha+\beta)$	Есть
С информационной обратной связью и рассредоточенным источником	$p(A)(t-1)(\alpha+\beta)$	$p(A)E \left[\frac{t-a}{a} \right] (\alpha+\beta)$	Нет
	$p(A)(t-1)x; E \left[\frac{t}{a} \right] = 0;$ $p(A)(a-1)x; E \left[\frac{t}{a} \right] \geq 1$	≈ 0	Есть

Для случая полной зависимости и полной независимости искажений на разных пунктах получены [7] приближенные формулы для расчета вероятности наличия сдвига на каждом пункте после передачи $t-1$ слов вероятности ошибки из-за сдвига при передаче t -го слова). Формулы эти сведены в табл. 3. В ней через $p(A)$ обозначена вероятность того, что слово, полученное при наложении слов от двух различных источников, будет принято.

Как видно, при отсутствии дополнительного канала зависимость искажений префиксов, комбинаций стирания и сообщений решающей обратной связи не увеличивает вероятность ошибки из-за сдвига.

Повышение устойчивости к сдвигу в системах с обратной связью

Можно выделить три основных способа повышения устойчивости к сдвигу в системах с обратными связями. Первый способ — уменьшение величин α и β (или их суммы) — применим только в спорадических системах (в циклических системах может применяться только в сочетании с другими способами). Второй способ — передача адреса — практически переводит систему из циклической в спорадическую с числом передаваемых подряд по системе слов, равным единице, что полностью исключает сдвиг. Третий способ — передача в конце цикла в несуществующий адрес особого синхронизационного кодового слова Z — эффективен в циклических системах, но может быть использован и в спорадических системах, если последовательность слов можно разбить на участки фиксированной длины, эквивалентные циклам. Возможны модификации третьего способа: а) постоянное ожидание синхронизации; б) ожидание синхронизации перед концом цикла (в этом случае приход Z ожидается только за z шагов до предполагаемого конца цикла); в) ожидание малого сдвига (в этом случае приход Z ожидается за z_1 шагов до предполагаемого конца цикла и не более, чем через z_2 после).

Были рассмотрены одна из модификаций первого и три перечисленные модификации третьего способа повышения устойчивости систем с обратными связями к сдвигу.

Оптимизация областей приема сообщений решающей обратной связи позволяет в некоторых случаях уменьшить величину суммы $\alpha+\beta$. Показано [8], что в ДСК (при только обнаружении ошибок в прямой передаче) оптимальный радиус области подтверждения приема равен $\frac{n_0-1}{2}$ при нечетном n_0 (n_0 — длина сообщения решающей обрат-

ной связи) и $\frac{n_0}{2}$ при четном n_0 . В двоичном симметрично-марковском канале (канале Джилберта [10]) с ростом определителя матрицы переходов область приема подтверждения увеличивается. Выигрыш в величине $\alpha+\beta$ по сравнению с оптимальными для ДСК областями при выборе областей, оптимальных для данного ДСКМ, в рассмотренных случаях [8] составил примерно один десятичный порядок.

Оказалось, что при всех рассмотренных модификациях третьего способа повышения устойчивости после каждого цикла (начиная со второго) существует приближенно стационарное распределение вероятности сдвига на определенное число шагов. Кроме того, приближенно стационарные распределения существуют и для каждого сечения цикла, то есть для всех слов в последовательности, равноотстоящих от начала цикла.

Для средней за цикл вероятности \bar{p}_c ошибки из-за сдвига и средней за цикл вероятности \bar{p}_{cb} сбоя (потери слова) из-за сдвига получены простые приближенные формулы, сведенные в табл. 4 (ν — вероятность перехода слова в любое информационное; ω — вероятность ложного появления при передаче некоторого информационного слова). Формулы получены в предположении, что последовательность слов синхронизируется при первом приходе Z в диапазоне ожидания.

Таблица 4

Модификация	\bar{p}_c	\bar{p}_{cb}
a	$\frac{a-1}{2}(\alpha+\beta+\omega)$	ν
b, b^*	$\frac{a-1}{2}(\alpha+\beta) + \frac{(z-1)(2a-z)}{2a}\omega$	$\nu + \frac{z(z-1)}{2a}\omega$

* Вместо z подставляется z_1 .

Эффективность рассмотренных трех модификаций третьего способа повышения устойчивости к сдвигу систем с обратными связями не одинакова, хотя они и вносят в передаваемую информацию одинаковую дополнительную избыточность. На практике наиболее целесообразно применение ожидания синхронизации в конце цикла, причем в этом случае наиболее эффективно ожидание синхронизации после передачи всех информационных кодовых слов цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Харкевич. Борьба с помехами. Физматгиз, 1963.
2. Л. М. Финк. Теория передачи дискретных сообщений. Изд-во «Советское радио», 1963.
3. Э. Л. Блох. Помехоустойчивость систем связи с переспросом. «Проблемы передачи информации», вып. 13. М., Изд-во АН СССР, 1963.
4. О. К. Базиленко. Об ошибках в системе передачи информации с переспросом. «Изв. АН МССР», 1964, № 2.
5. О. К. Базиленко. Об ошибках в циклической системе передачи информации при наличии обратной связи. В сб.: Вопросы теории управляющих систем. Кишинев, РИО АН МССР, 1965.
6. В. А. Ильин. Телеконтроль и телеуправление рассредоточенными объектами. Госэнергоиздат, 1963.
7. О. К. Базиленко. Обратная связь в рассредоточенных системах передачи информации. «Изв. АН МССР», 1966, № 5.
8. О. К. Базиленко. Об оптимизации величин областей приема сообщений решающей обратной связи. В сб.: Электроэнергетика и автоматика, вып. 1. Кишинев, РИО АН МССР, 1965.
9. В. И. Романовский. Дискретные цепи Маркова. Гостехиздат, 1949.
10. E. N. Gilbert. Capacity of a burst-noise channel. BSTJ, v. 39, No. 5, 1960.

В. Б. ПАСТЕРНАК

РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КАК ОБЪЕКТЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В пищевой промышленности СССР в последние годы нашли широкое применение регенеративные теплообменники (РТ), предназначенные для нагрева (охлаждения) и последующего охлаждения (нагрева) жидких пищевых продуктов. К этому классу теплообменников относятся пастеризационно-охладительные установки (ПОУ) для фруктовых соков, вина, молока, регенеративные охлаждательные установки и т. п. Автоматизация таких теплообменников позволяет точно поддерживать заданный технологический режим, что обеспечивает высокое качество обрабатываемого продукта, увеличение производительности РТ, снижение расхода пара, воды и электроэнергии. Между тем до настоящего времени не получено математическое описание для теплообменников данного класса и не разработана методика проектирования и расчета рациональной САР.

Целью проведенного исследования являлась разработка методики проектирования и расчета рациональной САР, проектирование данной САР и внедрение ее в производство.

Обрабатываемый продукт поступает в секцию регенерации и, нагреваясь теплом выходящего из теплообменника продукта, направляется в секцию подогрева, где подогревается паром или горячей водой до заданной температуры. Нагретый продукт находится в выдерживателе, а затем вновь поступает в секцию регенерации, где отдает тепло холодному продукту. РТ, как правило, применяются на тех процессах, где основным технологическим параметром, подлежащим автоматическому регулированию, является температура продукта $t_{ж.п}$ на выходе из секции подогрева. Отклонения температуры от заданного значения не должны превышать $\pm 1, \pm 2^\circ\text{C}$. В процессе эксплуатации РТ находится под воздействием возмущений, обусловленных колебанием давления пара в магистрали, нагаром на поверхности нагрева и изменением производительности аппарата. Колебание давления пара является возмущением по каналу регулирующего воздействия и может иметь характер скачкообразного или импульсного воздействия. Изменение коэффициента теплопередачи или производительности РТ происходит медленно, и время существенного изменения производительности или коэффициентов теплопередачи во много раз больше времени переходного процесса в замкнутой САР.

В РТ осуществляется регенерация тепла, обеспечивающая экономно энергоносителей. В то же время регенерация тепла обуславливает

и сложную структуру РТ. В этом случае передаточная функция объекта $W_0(S)$ представляет собой произведение передаточной функции секции подогрева и единичного звена, охваченного положительной обратной связью контура регенерации [1]:

$$W_0(S) = \frac{W_n(S)}{1 - W_{к.р}(S)} \quad (1)$$

$$W_{к.р}(S) = W_n(S) \cdot W_p(S) \cdot W_b(S), \quad (2)$$

где $W_n(S)$ — передаточная функция секции подогрева по каналу регулирующего воздействия;

$W_n(S)$ — передаточная функция секции подогрева по каналу „температура продукта на выходе из секции подогрева — температура продукта на входе в секцию подогрева“;

$W_p(S)$ — передаточная функция секции регенерации;

$W_b(S)$ — передаточная функция звена чистого запаздывания в контуре регенерации;

$W_{к.р}(S)$ — передаточная функция контура регенерации.

Равенство (1) показывает, что при наличии в контуре регенерации времени запаздывания τ_p по кривой разгона объекта невозможно получить $W_0(S)$ „методом площадей“. Для определения $W_0(S)$ необходимо получение $W_n(S)$ и $W_{к.р}(S)$. Причем желательно получение $W_n(S)$ и $W_{к.р}(S)$ по суммарным динамическим характеристикам объекта, так как их раздельное экспериментальное получение трудно достижимо.

Ввиду сложности теоретического получения динамических характеристик теплоэнергетических объектов они были получены экспериментально. При этом для выявления структуры теплообменника снимались переходные кривые (кривые разгона и импульсные характеристики). При обработке объект с распределенной емкостью аппроксимировался звеньями с сосредоточенной емкостью и звеном чистого запаздывания. Экспериментальное исследование было проведено на Бендерском консервном заводе по общепринятой методике.

Были определены статические характеристики РТ:

$$\Theta_{ж.п} = f(D), \quad D = f(H), \quad \Theta_{ж.п} = f(H), \quad \text{при } \sigma = 1600 \text{ и } 2000 \text{ кг/ч};$$

$$\Theta_{ж.п} = f(\sigma) \text{ при } H = 40\%,$$

где $\Theta_{ж.п}$ — температура продукта на выходе из секции подогрева, °С;

D — расход пара, кг/ч;

σ — производительность РТ, кг/ч;

H — ход регулирующего органа, %.

Все статические характеристики, кроме $\Theta_{ж.п} = f(\sigma)$, оказались близкими к линейным в рабочем диапазоне изменения H и D . $\Theta_{ж.п} = f(\sigma)$ можно считать линейной лишь при малых отклонениях от номинальной производительности. Кривые разгона были сняты при большой (150 сек) и малой (20 сек) величине τ_p . При большой величине τ_p они имеют ярко выраженные уступы [2], что характеризует сложную структуру РТ. При малой величине τ_p кривая имеет вид кривой разгона для объекта с самовыравниванием. Обработка экспериментально полученных кривых разгона была проведена по отдельным уступам „методом площадей“ [1]. При большой величине τ_p первый уступ кривой разгона представляет

собой реакцию секции подогрева на скачкообразное возмущение: по каналу регулирующего воздействия, так как воздействие контура регенерации запаздывает на величину τ_p .

Второй уступ кривой разгона представляет собой реакцию контура регенерации на скачкообразное возмущение, прошедшее через секцию подогрева. Следовательно, передаточная функция $W_n(S)$ может быть получена обработкой первого уступа кривой разгона, а передаточная функция $W_{к.р}(S)$ по передаточной функции $W(S)$, полученной обработкой второго уступа кривой разгона:

$$W_{к.р}(S) = \frac{W(S)}{W_n(S)} \quad (3)$$

Таким образом, для получения $W_{к.р}(S)$ и $W_n(S)$ необходимо наличие только двух первых уступов кривой разгона. Как известно, с достаточной для инженерных расчетов точностью любой объект с самовыравниванием может быть аппроксимирован последовательно соединенными одноемкостным звеном и звеном чистого запаздывания.

Поэтому можно записать

$$W_n(S) = \frac{K_0}{T_n S + 1} e^{-s\tau}; \quad (4)$$

$$W_{к.р}(S) = \frac{K_p}{T_p S + 1} e^{-s\tau_p} \quad (5)$$

где T_n — приведенная постоянная времени секции подогрева;

T_p — приведенная постоянная времени контура регенерации;

K_0 — коэффициент усиления объекта;

K_p — коэффициент регенерации;

τ — запаздывание по каналу регулирующего воздействия.

Из (4) и (5) видно, что любой РТ может быть описан заданием K_0 , K_p , T_n и безразмерных величин $\frac{\tau}{T_n}$, $\frac{\tau_p}{T_n}$ и $\frac{T_p}{T_n}$. Все эти величины

легко определяются по кривой разгона РТ с большим τ_p . Наиболее полно исследование САР РТ может быть проведено на АВМ. Действительно, в этом случае можно провести моделирование всего класса РТ по обобщенной функции и, добываясь требуемого качества переходных процессов, получить таблицы и графики оптимальных настроек регулятора САР.

Как видно из уравнений (1), (4) и (5), для моделирования РТ необходимо моделирование дробно-рациональных передаточных функций от „S“ и передаточных функций звеньев чистого запаздывания. Причем структурная схема набора модели должна соответствовать (1). Для набора дробно-рациональной передаточной функции использовалась общепринятая методика, для моделирования $e^{-s\tau}$ — блок БПЗ-2М. В настоящее время наибольшее применение для расчета параметров настройки автоматических регуляторов САР находят методы, основанные на двухзвенной аппроксимации кривой разгона, и методы расширенных амплитудно-фазовых характеристик (р. а. ф. х.)

Первый метод не пригоден для РТ, так как его кривая разгона не аппроксимируется двумя звеньями. Недостатком метода р. а. ф. х. является отсутствие информации о расположении недоминирующих корней в решении дифференциального уравнения замкнутой САР. В силу

этого переходный процесс для объектов со сложной структурой может значительно отличаться от расчетного.

В данной работе приведена методика графоаналитического расчета параметров настройки регулятора САР, основанная на методе обобщенного частотного анализа. Методика составлена для объектов с передаточной функцией

$$W_0(S) = \frac{K_0 \prod_{j=1}^n (T_j S + 1)}{S^l \prod_{q=1}^m (T_q S + 1)} e^{-s\tau}, \quad l=0, 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

а затем распространена на РТ [3].

Здесь $-\frac{1}{T_j}$ — нули передаточной функции;

$-\frac{1}{T_q}$ — полюса передаточной функции;

τ — чистое запаздывание;

K_0 — коэффициент усиления.

Сущность метода заключается в графоаналитическом решении уравнения

$$W_0(S) \cdot W_{\text{рег}}(S) + 1 = 0, \quad (7)$$

записанном в другом виде

$$A_r |S|, \quad \delta\delta = A_{\text{ш}}^* |S|, \quad \delta\delta - 20 \lg K_0 C_1; \quad (8)$$

$$\varphi_r |S|, \quad \text{град} = -\pi(2k+1) + \varphi_{\text{ш}}^* |S|, \quad \text{град}, \quad k=0, 1, \dots, n \quad (9)$$

где $A_r |S|$ и $\varphi_r |S|$ — обобщенные логарифмические амплитудная (о. л. а. х.) и фазовая (о. л. ф. х.) характеристики для $W_r(S)$.

$A_{\text{ш}}^* |S|$ и $\varphi_{\text{ш}}^* |S|$ — о. л. а. х. и о. л. ф. х. для $W_{\text{ш}}^*(S)$.

$$W_r(S) = \frac{W_0(S)}{K_0}; \quad (10)$$

$$W_{\text{ш}}^*(S) = \frac{1}{C_1 W_{\text{рег}}(S)}; \quad (11)$$

$$S = -\gamma |S| \pm j |S| \sqrt{1-\gamma^2}. \quad (12)$$

Передаточная функция регулятора имеет вид:

$$\text{П-регулятор } W_{\text{рег}}(S) = C_1; \quad (13)$$

$$\text{ПИ-регулятор } W_{\text{рег}}(S) = \frac{C_1(T_i S + 1)}{T_i S}; \quad (14)$$

$$\text{ПИД-регулятор } W_{\text{рег}}(S) = \frac{C_1(1 + T_i S + T_0 T_i S^2)}{T_i S}; \quad (15)$$

где C_1 — коэффициент усиления регулятора;

T_i — время изодрома;

T_0 — время предварения.

Разработанная методика позволяет [3]:

1) определить оптимальную настройку регулятора по заданному значению колебательности γ и минимуму квадратичного I_2 или модульного I_0 интегрального критерия;

2) найти расположение остальных полюсов и нулей замкнутой САР в комплексной плоскости и оценить их влияние на переходный процесс;

3) построить корневые годографы при изменении любого параметра настройки;

4) построить переходный процесс, не прибегая к методу трапецидальных частотных характеристик.

Весь расчет выполняется с помощью шаблонов или таблиц. Расчет, проведенный для САР РТ с П-регулятором, дал результат, хорошо согласующийся с расчетом на АВМ.

Аналитический метод исследования позволяет рассчитать рациональную САР РТ. Однако при необходимости исследовать влияние изменения ряда параметров РТ на качество переходных процессов этот метод становится громоздким. Между тем, используя обобщенную передаточную функцию РТ и соответствующую ей модель, можно получить таблицы и графики настроек для П-ПИ-и ПИД-регуляторов для большого числа РТ, описываемых параметрами $\frac{\tau_p}{T_n}$, $\frac{\tau_p}{T_n}$ и

$\frac{\tau_p}{T_n}$. При моделировании объект и регулятор рассматривались как линейные. Получены таблицы и графики для расчета параметров настройки всего класса РТ пищевой промышленности. С их помощью легко определяются параметры настройки регулятора и качественные показатели переходного процесса.

В результате исследования установлено, что величина $\frac{\tau_p}{T_n}$ имеет оптимальное значение, при котором $A_{\text{макс}}$ минимально. При $\frac{\tau_p}{T_n} < \left(\frac{\tau_p}{T_n}\right)_{\text{опт}}$ возрастает динамическое отклонение, достигая максимума при $\frac{\tau_p}{T_n} = 0$.

При $\frac{\tau_p}{T_n} > \left(\frac{\tau_p}{T_n}\right)_{\text{опт}}$ возрастает колебательность процесса и динамическое отклонение. При $\frac{\tau_p}{T_n} \gg \left(\frac{\tau_p}{T_n}\right)_{\text{опт}}$ переходный процесс разделяется на

два, один из которых обусловлен секцией подогрева, второй — контуром регенерации. Моделирование САР на АВМ основывалось на предположении о линейности передаточной функции регулятора.

Между тем электрические регуляторы с сервомотором постоянной скорости имеют релейную характеристику. С целью изучить влияние скорости сервомотора и нечувствительности регулятора на качество переходных процессов на АВМ моделировался объект по обобщенной передаточной функции и регулятор с учетом релейной характеристики, зоны нечувствительности и сервомотора постоянной скорости (регуляторы типа РПИК, РПИ и т. п.). Моделирование регулятора было проведено согласно системе уравнений:

1. Возрастание сигнала

$$\sigma - \sigma_{0,c} \leq \frac{\Delta}{2}; \quad \mu_p = 0; \quad \mu' = 0;$$

$$\sigma - \sigma_{o.c} > \frac{\Delta}{2}; \mu_p = 100 \text{ в}; \mu' = \frac{1}{T_c} \quad (16)$$

2. Убывание сигнала

$$\sigma - \sigma_{o.c} \geq \frac{\Delta}{2} - \Delta_n; \mu_p = 100 \text{ в}; \mu' = \frac{1}{T_c};$$

$$\sigma - \sigma_{o.c} < \frac{\Delta}{2} - \Delta_n; \mu_p = 0; \mu' = 0, \quad (17)$$

где σ — входная величина регулятора;
 $\sigma_{o.c}$ — напряжение обратной связи регулятора;
 Δ — зона нечувствительности регулятора;
 Δ_n — зона возврата релейного элемента регулятора;
 μ_p — выходная величина регулятора;
 μ' — скорость сервомотора.

В результате исследования установлено, что время сервомотора T_c не должно превышать 1; 1,5 τ , а зона нечувствительности $\Delta \ll \frac{A_{доп}}{2}$, где $A_{доп}$ — допустимое отклонение $\theta_{ж.п}$ от заданного значения.

При больших значениях Δ и T_c возрастает динамическое отклонение и колебательность переходных процессов. Ранее САР РТ исследовалась при возмущающем воздействии в виде единичного скачка $1(t)$. Однако в общем случае переходный процесс при реальном возмущении может отличаться от единичного переходного процесса при возмущении типа $1(t)$. При эксплуатации РТ давление пара перед регулирующим органом подвержено колебаниям, имеющим вид произвольной функции времени, ограниченной по модулю. В этом случае для исследования САР необходимо применение методов теории инвариантности, развитой в работах Г. В. Щипанова, Н. П. Лузина, П. И. Кузнецова, В. С. Кулебакина и др.

В данной работе рассмотрена комбинированная САР для РТ с воздействием по изменению давления пара перед регулирующим органом. При возмущении по каналу регулирующего воздействия условие абсолютной инвариантности выходной величины относительно данного возмущения имеет вид:

$$W_p(S) = \frac{K}{W_{per}(S)}, \quad (18)$$

где $W_p(S)$ — передаточная функция устройства для ввода возмущения в регулятор;
 K — постоянная величина.

При передаточных функциях регулятора вида (13)–(15) получаем:

$$\text{П-регулятор } W_p(S) = \frac{K}{C_1}; \quad (19)$$

$$\text{ПИ-регулятор } W_p(S) = \frac{KT_1 S}{C_1(T_1 S + 1)}; \quad (20)$$

$$\text{ПИД-регулятор } W_p(S) = \frac{KT_1 S}{C_1 \left(\frac{C_2}{C_0} S^2 + T_1 S + 1 \right)}. \quad (21)$$

Таким образом, устройством для ввода возмущения является для П-регулятора усилительное звено, для ПИ-регулятора — реальное дифференцирующее звено, для ПИД-регулятора — последовательно соединенные апериодическое и реальное дифференцирующее звенья.

Реализация (19) и (20) легко осуществима. Однако при других возмущениях комбинированная САР с П-регулятором будет давать статическую ошибку, как и одноконтурные САР. При возмущении по другим каналам условие абсолютной инвариантности выходной величины к данному возмущению имеет вид

$$W_p(S) = \frac{W_{o.v}(S)}{W_o(S) \cdot W_{per}(S)}, \quad (22)$$

где $W_{o.v}(S)$ — передаточная функция объекта для данного возмущения.

Реализация (22) очень затруднена. Поэтому основным условием нормальной работы САР является отсутствие резких возмущений по производительности РТ, так как введение воздействия по данному возмущению технически трудно реализуемо и экономически не целесообразно. Моделирование комбинированной САР на АВМ МНБ-1, выполненное в данной работе, подтвердило абсолютную инвариантность выходной величины объекта к возмущению по каналу регулирующего воздействия.

Характерной особенностью регулятора с передаточной функцией (13)–(15) является то, что при подаче на его вход сигнала рассогласования в виде единичного скачка регулирующее воздействие мгновенно компенсирует данное рассогласование. В реальном регуляторе скорость сервомотора конечна, и для компенсации возмущения требуется определенное время. В течение этого времени возмущение поступает на вход объекта, что приводит к появлению на выходе объекта переходного процесса. Чем выше скорость сервомотора, тем ближе САР к инвариантной. Исследование влияния скорости сервомотора на качество переходных процессов в комбинированной САР с ПИ-регулятором было выполнено моделированием САР на АВМ. В результате исследования установлено, что при физической реализуемой скорости сервомотора удается в 5–6 раз снизить динамическое отклонение при возмущении по каналу регулирующего воздействия вида $1(t)$.

Выводы и рекомендации

1. Выбор параметров РТ для обеспечения оптимального переходного процесса:

а) величина $\frac{\tau}{T_n}$ должна быть минимальной, что достигается установкой малоинерционного датчика, использованием паровой схемы обогрева и правильным выбором места установки датчика и исполнительного механизма;

б) величина $\frac{\tau}{T_n}$ должна выбираться близкой к оптимальному значению, что достигается в ПОУ изменением емкости выдерживателя и температуры подогрева;

в) величина $\frac{T_p}{T_n}$ должна быть максимально допустимой по экономическим соображениям;

г) производительность РТ должна быть стабилизирована. Наиболее радикальной мерой стабилизации является создание условий, обеспечивающих невыпадение осадков во всех агрегатах линии (сепарирование продукта, применение энергоносителей с низким температурным потенциалом).

2. Выбор структуры САР и закона регулирования. Методы расчета параметров настройки автоматических регуляторов.

Проведенный в работе сравнительный анализ различных САР (одноконтурные и комбинированные) показывает, что наибольшее применение для РТ находят одноконтурная и комбинированная САР с ПИ-регуляторами. При невысоких требованиях к статической точности регулирования могут использоваться САР с П-регулятором.

Расчет параметров настройки регуляторов одноконтурной САР и основного регулятора комбинированной САР может быть проведен по таблицам и графикам методом обобщенного частотного анализа и моделированием САР на АВМ. Расчет параметров настройки устройства для ввода возмущения производится по (18).

В результате данной работы впервые получены для РТ пищевой промышленности:

- 1) методика экспериментального определения передаточной функции РТ с учетом их сложной структуры;
- 2) обобщенная передаточная функция, описывающая в безразмерных коэффициентах весь класс РТ;
- 3) математические модели на АВМ РТ;
- 4) методика графо-аналитического расчета параметров настройки автоматических регуляторов САР (в том числе и для РТ) методом обобщенного частотного анализа;
- 5) графики и таблицы для расчета параметров настройки П-, ПИ-, ПИД-регуляторов САР для РТ по кривой разгона;
- 6) рекомендации по выбору закона регулирования и структуры рациональной САР;
- 7) рекомендации по выбору ряда параметров РТ и его САР.

Полученные результаты в настоящее время используются при проектировании и наладивании САР линий первичной переработки виноградного сока. Одноконтурные САР внедрены на Бендерском консервном заводе и Кишиневском консервном комбинате. На Бендерском заводе в настоящее время внедрена САР, инвариантная к воздействию возмущения. Аналогичные САР спроектированы для Тираспольского плодоконсервного и Кошницкого консервного заводов.

Внедрение САР на Бендерском консервном заводе снизило расход пара, воды и электроэнергии, увеличило на 20% производительность линий, улучшило качество продукции и значительно снизило потери сырья и полуфабрикатов. По данным завода, среднегодовой экономический эффект составил около 30 тыс. рублей при сроке окупаемости 1,2 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. П. Стефани. Основы расчета настройки регуляторов тепловых процессов. М., Госэнергоиздат, 1960.
2. В. Б. Пастернак. Исследование динамических характеристик пастеризационно-охлаждающей установки на аналоговой вычислительной машине. «Консервная и овощесушильная промышленность», М., 1965, № 10.
3. В. Б. Пастернак. Применение обобщенного частотного анализа для расчета параметров настройки автоматических регуляторов. В сб.: Вопросы теории управляющих систем. Кишинев, РИО АН МССР, 1965.

СОДЕРЖАНИЕ

Г. В. Чалый. Энергетике Молдавии — дальнейшее развитие	3
Г. В. Чалый. Обзор, современные направления исследований и перспективы развития Отдела энергетической кибернетики Академии наук Молдавской ССР	8
В. Г. Журавлев, Г. В. Чалый. О некоторых научных результатах и основных направлениях работы лаборатории математического моделирования энергосистем	18
М. Л. Мисник. Некоторые особенности и прогноз нагрузки Молдавской энергосистемы	39
Г. М. Верин, В. Г. Журавлев, Б. А. Зубарев, Г. В. Чалый. О возможности и целесообразности повышения частоты тока в распределительных электрических сетях	49
Н. Н. Романенко. Использование электрообогрева для интенсификации выращивания посадочного материала сельскохозяйственных культур (в условиях Молдавской ССР)	56
Н. Е. Бырсан, М. А. Непомнящий, Д. И. Шилькрут. Об учете влияния жесткости пакета жестей и обмотки ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя	66
М. В. Паладий, В. С. Лернер. К теории управляемого трехфазного асинхронного двигателя	72
М. А. Непомнящий. О составляющих механических потерь в двигателях, заполненных жидкостью	78
О. К. Базиленко. О работе системы передачи информации с обратными связями в системах автоматического управления	80
В. Б. Пастернак. Регенеративные теплообменники пищевой промышленности как объекты автоматического регулирования	87

ИЗВЕСТИЯ
АКАДЕМИИ НАУК МОЛДАВСКОЙ ССР

№ 3

Редактор З. В. Петкова
Художественные редакторы А. М. Варшавский, В. Н. Пашенцев
Технический редактор А. А. Демарцев
Корректоры А. Б. Тарасова, М. Д. Чертова

Сдано в набор 27.XII 1966 г. Подписано к печати 14.III-1967 г. АБ04400 Формат
бумаги 70×108¹/₁₆. Печатных листов 6. Уч.-изд. листов 7,31. Тираж 500 Цена 45 коп.
Зак. № 104

Редакционно-издательский отдел Академии наук Молдавской ССР
Кишинев, проспект Ленина, 1.

ЭП 2-я типография Государственного комитета Совета Министров МССР по
печати, Кишинев, Советская, 8.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
24	20-я сверху	БЭСМ-2М	ЭЦВМ
25	16-я сверху	шипам	шинам
26	1-я снизу	Л. С. Пятковой	Л. С. Петковой
39	20-я сверху	электропередачи	электроэнергии
44	Подтекстовка к рис. 3	$\left(\gamma = \frac{P_{ср}}{P_{макс}}, -\beta = \frac{P_{мин}}{P_{макс}} \right)$	$\left(\gamma = \frac{P_{ср}}{P_{макс}}, \beta = \frac{P_{мин}}{P_{макс}} \right)$
44	26-я сверху	$\sigma^* = \frac{\sigma}{x} \cdot 100$	$\sigma^* = \frac{\sigma}{x} \cdot 100$
76	2-я сверху	$H = 0,$	$H_{2y} = 0,$
91	29-я сверху	$\frac{\tau_p}{T_n} < \left(\frac{\tau_p}{T} \right)_{опт}$	$\frac{\tau_p}{T_n} < \left(\frac{\tau_p}{T_n} \right)_{опт}$

Известия АН МССР № 3, 1967 г.