

6
А-65

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ Р С Ф С Р

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ЭЛЕКТРОТЕХНИ-
ЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ В.И.УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

П. А. МАТЕВОСЯН

ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И ТОЧНОСТИ СПЕЦИАЛИЗИ-
РОВАННЫХ АНАЛОГОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ
БОЛЬШИХ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ

/ На примере решения некоторых задач электро -
энергетических систем и их элементов /

Специальность 05.252 - Вычислительная техника

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ Р С Ф С Р

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ЭЛЕКТРОТЕХНИ-
ЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ В.И.УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

П. А. МАТЕВОСЯН

ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И ТОЧНОСТИ СПЕЦИАЛИЗИ-
РОВАННЫХ АНАЛОГОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ
БОЛЬШИХ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ

/ На примере решения некоторых задач электро -
энергетических систем и их элементов /

Специальность 05.252 - Вычислительная техника

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ленинград

-

1971



65
Диссертационная работа выполнена в Армянском научно-исследовательском институте энергетики Министерства энергетики и электрификации С С С Р.

Официальные оппоненты:

— Д.Т.Н., профессор А.Н.Дебедев

— Д.Т.Н., профессор Г.М.Павлов

— Д.Т.Н. Ю.В.Лобатов — — — — —

Ведущее предприятие: Воесоюзный научно-исследовательский институт энергетики — — — — —

Автореферат разослан "20" января 1971 г.

Защита диссертации состоится "февраль" 1971 г.

на заседании Совета по присуждению ученых степеней факультета автоматики и вычислительной техники Ленинградского ордена Ленина электротехнического института имени В.И.Ульянова (Ленина) Ленинград, П-22, ул.проф.Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета

Е.А.ЧЕРНЯВСКИЙ

В В Е Д Е Н И Е

Неуклонное развитие и усложнение задач в различных областях науки и техники постоянно требует усовершенствования и расширения возможностей современных средств вычислительной техники. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в развитии универсальных цифровых и аналоговых вычислительных машин, в настоящее время реализация целого ряда задач, в том числе связанных с решением больших систем уравнений, все еще представляет определенные трудности.

К необходимости решения больших систем конечных и дифференциальных уравнений сводится, например, ряд задач, выдвигаемых практикой проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем и их элементов; в том числе, задачи экономического распределения нагрузок между теплоагрегатами электростанции, между станциями системы, задачи, связанные с исследованием электромеханических переходных процессов в многомашинных электроэнергетических системах и др.

Задачи электроэнергетических систем, помимо их многомерности, характеризуются также низкой точностью исходной информации, большим числом нелинейностей, заданных в виде графиков или таблиц, большим числом вариантов набора коэффициентов решаемых уравнений с возможностью их изменения в процессе решения. В ряде случаев требуется получать решение за ограниченное время непосредственно в условиях производства.

Большая практическая значимость рассматриваемых задач способствовала разработке целого ряда методов и средств, необходимых для их решения. В работе отмечаются особенности некоторых типов устройств вычислительной техники, применяемых для решения рассматриваемых задач, а также показывается целесообразность создания для их решения специализированных аналоговых вычислительных устройств (АВУ). Опыт эксплуатации специализированных АВУ, разработанных в Энергосетьпроекте, во ВНИИЭ, в Арм.НИИ энергетики и предназначенных для исследования установившихся и переходных процессов в многомашинных электроэнергетических системах, а также специализированных АВУ, созданных во

ВНИИЭ, в ЛПИ, Институте автоматики СССР, Минском филиале ЭНИИ, ТНИИСА и в др. организациях и предназначенных для экономичного распределения нагрузок между станциями системы и между теплоагрегатами станции, показал целый ряд удобств их применения.

В основу построения указанных специализированных АВУ были положены многочисленные исследования и разработки, выполненные как у нас в Союзе, так и за рубежом. Однако, в известных автору исследованиях, вопросы, связанные с обеспечением нормального функционирования разрабатываемых АВУ, а также вопросы построения специализированных АВУ, исходя из условий требуемой точности решения, разработаны недостаточно полно. Применение известных методов к построению специализированных АВУ, предназначенных для решения больших систем уравнений, во многих случаях связано с необходимостью выполнения значительного объема вычислительных работ.

Настоящая работа посвящена вопросам синтеза и точности специализированных АВУ, предназначенных для решения больших систем уравнений. В работе рассматриваются методы обеспечения нормального функционирования разрабатываемых АВУ, основанных на использовании электронных, электрических, механических решающих блоков. Рассматриваются вопросы построения АВУ, обеспечивающих заданную точность решения и минимальную стоимость изготовления. На примерах некоторых задач электроэнергетических систем разработаны элементы построения дискретно-моделирующих устройств, предназначенных для решения больших систем конечных и дифференциальных уравнений.

Результаты исследования использованы для создания специализированных АВУ, предназначенных для решения задач экономичного распределения активных мощностей между станциями энергосистемы, экономичного распределения тепловых и электрических нагрузок между теплоагрегатами станций, а также для создания специализированных АВУ, для расчета и исследования электро-механических переходных процессов в многомашинных электроэнергетических системах.

Необходимые условия построения
нормально функционирующих схем специализирован-
ных АВУ, предназначенных для решения конечных
уравнений

Необходимость решения на АВУ систем конечных уравнений возникает при рассмотрении целого ряда задач из различных областей техники, в том числе задач экономичного распределения нагрузок в электроэнергосистемах, задач, связанных с решением уравнений электрических сетей и др.

Как показывает практика, при построении АВУ, предназначенных для решения конечных уравнений, возникают трудности, связанные с обеспечением нормального их функционирования. Нормальное функционирование электронного АВУ определяется устойчивостью его решения. Механическое устройство может заклиниваться, либо приходить в действие при приложении значительных внешних сил или моментов.

Исследованию устойчивости решения конечных уравнений на АВМ, вопросам нормального функционирования АВУ посвящен целый ряд работ отечественных и зарубежных авторов. Несмотря на то, что метод непосредственного моделирования не требует сложных предварительных преобразований исходных уравнений и приводит к построению сравнительно простой схемы АВУ, однако из-за трудностей обеспечения устойчивого решения применяют метод сведения заданной системы конечных уравнений к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, метод минимизации, итерационные и градиентные методы и др. Перечисленные методы, в основном, применяются для осуществления вычислений на АВМ и не всегда удобны для построения специализированных АВУ, используемых в виде отдельных узлов более сложных устройств.

Учитывая изложенное, в диссертации рассматриваются вопросы обеспечения нормального функционирования схем специализированных АВУ, построенных по методу непосредственного моделирования. На основе выполненных исследований разработана методика, а также установлены так называемые "практические критерии", необходимые для построения работоспособных, устойчивых схем

АВУ, предназначенных для решения конечных уравнений, основанных на использовании электронных, электрических, механических решающих блоков.

Как показывает практика, трудности, связанные с обеспечением нормального функционирования схем специализированных АВУ, предназначенных для решения конечных уравнений, возникают, главным образом, при применении в схеме АВУ необратимых решающих блоков, например, таких как суммирующие, множительные, функциональные решающие блоки, построенные на базе операционных усилителей постоянного тока, кулачковые и коноидные механизмы, различного типа следящие системы, самотормозящие червячные пары и др.

Процесс решения на АВУ осуществляется, как известно, в результате преобразования и передачи информации через связи по вполне определенным направлениям. (В диссертации применяется термин "передача информации", а не энергии, т.к. передаваемая через связи АВУ энергия имеет ничтожную величину. Связи между решающими блоками представляются здесь информационными, а не энергетическими). Если направление передачи информации в какой-либо связи схемы АВУ не совпадает с расположением в ней устройства направленного действия, то такое АВУ будет неработоспособным. Поэтому при построении схем АВУ, в которых используются устройства направленного действия, необходимо предварительно выявить направление передачи информации в связях между решающими блоками, в соответствии с чем и следует включать в схему эти устройства. При выполнении настоящего раздела диссертации автор исходил из работы академика Н.Г.Бруевича.*

Направление передачи информации между решающими блоками АВУ можно установить по знакам мощностей на соединительных связях решающих блоков, т.е. на их входах или выходах. Если мощность на соединительной связи решающего блока имеет знак плюс, то эта соединительная связь будет выходом решающего

* Н.Г.Бруевич. "К вопросу о входах и выходах устройств непрерывного действия". Сессия АН СССР по научным проблемам автоматизации производства. Москва. 1957 г.

блока, т.е. через эту соединительную связь информация передается из решающего блока к другим блокам АВУ. Если же мощность имеет знак минус, то через эту соединительную связь информация поступает в решающий блок. В основу исследования положены не исходные, а машинные уравнения, т.к. в последних учитываются параметры и ряд дополнительных устройств, таких как инвертирующие блоки, устройства для задания постоянных и переменных коэффициентов и др.

Систему машинных уравнений АВУ, имеющего Π решающих блоков, можно представить в виде:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, b_i) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (I)$$

где x_i — машинная переменная, которая может быть напряжением, скоростью, перемещением;

b_i — входной параметр i -го решающего блока.

Величину изменения энергии (мощности), передаваемой через ij -ую соединительную связь i -го решающего блока при малых изменениях входных параметров, исходя из уравнений I, можно вычислить с помощью формулы:

$$\Delta P_{ij} = F_{ij} \left(\sum_{i=1}^n A_{ij} \frac{\partial f_i}{\partial b_i} \Delta b_i \right) \frac{1}{A}, \quad (2)$$

где F_{ij} — значение тока (силы, момента), передаваемого через ij -ую соединительную связь i -го решающего блока;

A — определитель системы уравнений малых приращений;

A_{ij} — адъюнкт элемента $a_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$;

Δb_i — приращение входного параметра.

Для определения направлений передачи информации в связях между решающими блоками достаточно, однако, знать только знак ΔP_{ij} . В связи с этим, а также с целью упрощения вычислений, можно поступить так: выделить в схеме исследуемого АВУ соединительную связь i -го решающего блока, роль которой нужно установить, разрезать эту связь и заземлить (остановить) вторую не присоединенную к i -му решающему блоку половину ее разрезанной части. В таком преобразованном АВУ величину изме-

нения энергии $(\Delta P_{ij})'$, передаваемой через разрезанную половину связи к внешней нагрузке, можно установить с помощью формулы:

$$(\Delta P_{ij})' = (F_{ij})' \left(\sum_{i=1}^n A_{ij} \frac{\partial f_i}{\partial b_i} \Delta b_i \right) \frac{1}{a_{ij} A_{ij}}. \quad (3)$$

Согласно 2 и 3 выражение для определения знака ΔP_{ij} можно представить так:

$$\text{Sign} \frac{(\Delta P_{ij})'}{\Delta P_{ij}} = \text{Sign} \left[\frac{(F_{ij})'}{F_{ij}} \cdot \frac{1}{a_{ij} \cdot A_{ij}} \right]. \quad (4)$$

Аналогично для второй половины присоединительной связи имеем:

$$\text{Sign} \frac{(\Delta P_{ij})''}{\Delta P_{ij}} = \text{Sign} \left[\frac{(F_{ij})''}{F_{ij}} \cdot \frac{1}{A - a_{ij} \cdot A_{ij}} \right]. \quad (5)$$

Здесь, если $\text{Sign} \frac{(\Delta P_{ij})'}{\Delta P_{ij}} < 0$, то через ij -ю присоединительную связь информация поступает в i -е решающее устройство. Если же это выражение больше нуля, то имеем выход. Аналогично, если $\text{Sign} \frac{(\Delta P_{ij})''}{\Delta P_{ij}} > 0$, то часть присоединительной связи ij со стороны связи j является выходом, а если меньше нуля - то входом.

Таким образом, при построении схем специализированных АВУ необходимо предварительно установить направление передачи информации в связях, в которых предполагается применение устройств направленного действия. В связях, в которых направление передачи информации при изменении входных параметров не изменяется, могут быть использованы как обратимые, так и необратимые решающие блоки. Если же направление передачи информации в процессе решения может измениться, то в таких связях следует применять только обратимые решающие блоки.

Как отмечалось, при создании специализированных АВУ, предназначенных для эксплуатации в самых разнообразных условиях производства, наряду с электронными, широко применяются и другие типы решающих блоков.

При рассмотрении механических АВУ, исходя из уравнения баланса элементарных работ приведенных сил (моментов) можно показать, что

$$\text{Sign} \frac{(F_{ij})'}{F_{ij}} > 0 \quad \text{и} \quad \text{Sign} \frac{(F_{ij})''}{F_{ij}} > 0 \quad (6)$$

Условия 6 позволяют упростить выражения 4 и 5.

В работе, с целью иллюстрации, приводятся результаты испытаний механического АВУ, предназначенного для решения системы 3-х линейных алгебраических уравнений. В качестве суммирующих блоков были использованы конические зубчатые дифференциалы. Во всех случаях при включении в схему АВУ устройств направленного действия (самотормозящих червячных пар) не в соответствии с направлением передачи информации, испытываемое АВУ не приводилось в действие, заклинивалось. Аналогичные результаты были получены и при исследовании, а также испытаний электрических схем АВУ, построенных на базе обратимых элементов, применяемых в машине "Аналог", работающих на переменном токе, а также электронных схем АВУ, построенных на обратимых решающих блоках, разработанных в Институте кибернетики АН УССР.

На основе анализа выражений 4 и 5 предложен экспериментальный способ определения направления передачи информации, основанный на преобразовании схемы исследуемого АВУ. Показано, что для определения направления передачи информации в j -й связи необходимо приравнять нулю приращение всех правых частей смоделированных уравнений и разрезать присоединительную связь, роль которой требуется установить. В таком преобразованном устройстве часть разрезанной присоединительной связи рассматривается как вход, а вторая половина - как выход. Отношение выходного сигнала к входному соответствует условиям, полученным из 4 или 5, а следовательно, позволяет установить роль частей присоединительных связей исследуемого АВУ.

Выражения 4-5 были выведены без учета сил инерции, паразитных емкостей, индуктивностей, проводимостей и т.д. Следовательно, эти условия являются только необходимыми, но не достаточными для обеспечения нормального функционирования АВУ. В диссертации рассматриваются условия устойчивого решения на электронных АВУ алгебраических уравнений и с учетом влияния на процесс решения паразитных параметров решающих блоков.

Как известно, для решения систем линейных алгебраических уравнений на АВМ по методу непосредственного моделирования, каждое уравнение системы необходимо разрешить относительно одного из неизвестных. В общем случае для системы, состоящей из n уравнений, имеется $n!$ вариантов таких преобразований. Однако, как показывает практика, большинство вариантов разрешения уравнений приводит к неустойчивому решению.

С целью выявления варианта разрешения уравнений, обеспечивающего устойчивое решение, было выполнено исследование процесса решения на АВУ с учетом влияния паразитных емкостей схемы моделирования. Из-за наличия этих емкостей фактически на АВМ решаются не конечные, а дифференциальные уравнения, для получения решения которых необходимо удовлетворить условиям устойчивости дифференциальных уравнений. Однако, как известно, применение этих условий к системам с большим числом уравнений встречает практические трудности. На основе анализа условий устойчивости разработан способ определения варианта разрешения уравнений относительно неизвестных, позволяющий получить устойчивое решение, который сводится к установлению наибольших по абсолютной величине членов разложения определителя заданной системы уравнений.

Выполнено сравнение полученных условий устойчивости с условиями, полученными из 4 и 5. Показано, что при удовлетворении последних обеспечивается выполнение части условий устойчивости, полученных с учетом влияния паразитных емкостей решающих блоков. Методика установления необходимых условий устойчивого решения на АВУ нелинейных алгебраических уравнений, рассматривается в работе на примере уравнения типа полинома.

Построение специализированных АВУ, обеспечивающих требуемую точность решения

При построении специализированных АВУ, наряду с вопросами составления наиболее рациональной математической модели исследуемого объекта и обеспечения нормального их функционирования, не менее важными представляются задачи анализа и синтеза АВУ, исходя из условий точности.

В работах отечественных и зарубежных авторов освещены сравнительно полно методы анализа точности сложных устройств. Однако, при создании специализированных АВУ, не менее важной является задача обеспечения требуемой точности решения. Эта вторая так называемая инверсная задача или задача синтеза представляется более трудоемкой, решение которой может быть успешно реализовано с помощью АВМ. Рассматриваемая инверсная задача сводится к выбору ограничений на погрешности параметров решающих блоков АВУ, исходя из требований обеспечения заданных ограничений на погрешности выходных параметров. Решение в значительной степени усложняется, если ограничения задаются не на один выходной параметр, а на несколько. Исследование точности сложных АВУ удобно выполнять не по погрешности отдельных деталей схемы, а по погрешностям (первичным ошибкам) параметров решающих блоков в целом.

В работе рассматривается общий случай, при котором ограничения задаются на погрешности p выходных параметров АВУ. Исходная система уравнений точности включает в себя $n-p$ уравнений, соответствующих числу выходных параметров, погрешности которых не ограничены допусками, и p уравнений, соответствующих числу первичных ошибок решающих блоков, ограничения которых необходимо установить.

При решении уравнений точности, как известно, наиболее сложным представляется вычисление значений частных производных, которые при исследовании АВУ, предназначенных для решения систем нелинейных дифференциальных уравнений, могут быть сложными функциями, зависящими от входных переменных и времени. В связи с этим расчет точности специализированных АВУ по заранее ус-

тановленным значениям частных производных требует дополнительного выполнения значительного объема вычислительных работ.

Представляется целесообразным для выполнения исследований и расчетов точности использовать схемы так называемых преобразованных АВУ (ПАУ), построение которых осуществляется на основе уравнений точности. Решение рассматриваемой задачи синтеза в значительной степени облегчается при использовании в ПАУ обратимых решающих блоков. В работе показана структурная схема ПАУ, соответствующая исследуемому АВУ, предназначенному для решения нелинейных дифференциальных уравнений. На входы ПАУ в общем случае подаются напряжения, пропорциональные заданным ограничениям на погрешности выходных параметров; напряжения, пропорциональные входным и выходным параметрам исследуемого АВУ, необходимые для формирования частных производных уравнений точности; напряжения, соответствующие заданным первичным ошибкам коэффициентов передач решающих блоков, а также напряжения, пропорциональные первичным ошибкам на входные параметры. В общем случае для формирования частных производных схема ПАУ должна быть сопряжена с исследуемым АВУ. При решении конечных уравнений решение можно выполнить отдельно, без указанного сопряжения. Рассматривается применение ПАУ и для решения задач точности при рассмотрении серий однотипных АВУ.

На основе выполненных исследований, для решения задачи синтеза специализированных АВУ, исходя из условий обеспечения требуемой точности решения, предлагается: по заданным уравнениям построить блок-схему исследуемого АВУ; составить машинные уравнения; на основе машинных уравнений составить уравнения точности, в которых в качестве первичных ошибок следует принимать ошибки коэффициентов передач решающих блоков, а также ошибки входных параметров; построить схему ПАУ, основанного на использовании обратимых решающих блоков; в соответствии с числом заданных выходных параметров, ограниченных допусками, выбрать решающие блоки, ограничения погрешностей параметров для которых необходимо вычислить. Задавая на входы ПАУ значения ограничений выходных параметров, а также подключив ко входам ПАУ, в соответствии с уравнениями точности, выходы исследуемо-

го АВУ, для единичного экземпляра АВУ получим кривые изменения ограничений погрешности параметров решающих блоков. При рассмотрении серии однотипных АВУ, изготавливаемых по одному проекту, с помощью ПАУ можно получить значения ограничений погрешностей параметров решающих блоков для конкретных значений входных параметров и времени. Основываясь на принципе независимости действия первичных ошибок, следует поочередно определить значение ограничений погрешностей параметров решающих блоков от действия каждого заданного ограничения в отдельности. При этом, для получения слагаемых уравнений допусков, к соответствующим входам ПАУ следует подключать блок квадратора. Определив поочередно все слагаемые формулы допусков, можно будет вычислить требуемые ограничения погрешностей параметров решающих блоков. Рассматриваются частные случаи построения ПАУ для решения задач точности АВУ, предназначенных для решения систем линейных дифференциальных и алгебраических уравнений.

Если число первичных ошибок исследуемого АВУ превышает число выходных параметров, ограниченных допусками, то возможно множество вариантов решения рассматриваемой задачи точности. Число вариантов решения можно значительно сократить, если исходить из дополнительных условий, например, условия минимальной стоимости изготовления. Эта задача для случая механических систем, имеющих одну выходную переменную, ограниченную допуском, была рассмотрена в работах Баранова Г.Г., Забелина Н.А. В работе Маслакова Н.Д. эта задача решается для линейных электрических цепей, причем в основу положен графоаналитический метод расчета, реализация которого из-за большого объема вычислительных работ требует использования ЦВМ.

В диссертации предлагается решение этой задачи осуществлять с помощью АВМ, причем для специализированных АВУ, имеющих в общем случае несколько выходных параметров, ограниченных допусками. В основу решения положен метод неопределенных множителей Лагранжа.

Зависимость между точностью и стоимостью изготовления разных типов решающих блоков, предназначенных для выполнения одной и той же элементарной математической операции, может быть весьма сложной. Для решения на АВМ эту зависимость предлагается представить не аналитически, а графически. При этом упроща-

ется математическое представление исходных уравнений, а также представляется более удобным моделирование ограничений кривых стоимости.

Для решения рассматриваемой задачи следует составить

$$\rho \text{ уравнений допусков}$$

$$a_{j1}^2 \delta_1^2 + a_{j2}^2 \delta_2^2 + \dots + a_{jp}^2 \delta_p^2 - \delta_{uj}^2 = 0,$$

$$(j = 1, 2, \dots, \rho),$$

а также на основе функционала Лагранжа ρ уравнений оптимизации вида:

$$\frac{\partial f_q}{\partial \delta_q} + (\lambda_1 a_{1q}^2 + \lambda_2 a_{2q}^2 + \dots + \lambda_\rho a_{\rho q}^2) 2\delta_q = 0,$$

$$(q = 1, 2, \dots, \rho),$$

где: ρ - число параметров решающих блоков, для которых требуется вычислять значения допусков;
 δ_q - допуск на q -й параметр решающего блока;
 a_{jq} - частная производная (коэффициент передачи) уравнения допусков;
 λ_j - неопределенный множитель Лагранжа;
 f_q - функция стоимости решающего блока от допуска.

В результате получим систему $\rho + \rho$ уравнений с таким же числом неизвестных. Из решения этих уравнений можно будет установить значения допусков на параметры решающих блоков, при которых обеспечивается минимальная стоимость изготовления АВУ.

Аналитическое решение этих уравнений представляет значительные трудности. В диссертации предлагается один из возможных вариантов решения полученных уравнений и показана соответствующая блок-схема моделирования. В частности, с целью упрощения схемы моделирования, решение предлагается выполнить последовательно для определенных значений входных переменных. При этом значение частных производных моделируются с помощью блоков постоянных коэффициентов. Приведены также частные случаи решения рассматриваемой задачи.

В качестве примера приводятся результаты исследования точности специализированного АВУ, предназначенного для решения уравнений синхронных генераторов. Исследование выполнено с

учетом точности исходной информации. На этом примере рассматривается также степень влияния точности решающих блоков АВУ на точность решения уравнений синхронного генератора при различной точности задания значений параметров моделируемых уравнений. Установлено, что влияние точности решающих блоков АВМ на точность решения при учете точности исходной информации составляет сравнительно небольшой процент от общей погрешности. Результаты расчета, полученные на ряде других примеров, показывают, что точность АВУ для решения целого ряда задач энергетических систем и их элементов не может быть причиной ограничивающей их применение.

Разработка и исследование специализированных дискретно-моделирующих устройств, предназначенных для решения больших систем уравнений, применительно к некоторым задачам электроэнергетических систем и их элементов.

Построение возможно простых схем специализированных АВУ в значительной степени определяется алгоритмом расчета, составление которого требует выполнения целого ряда исследований, необходимых для обоснования упрощений, а также преобразований исходных уравнений к виду наиболее удобному для моделирования.

Следует отметить, что при рассмотрении больших систем уравнений, помимо общих, в каждом конкретном случае имеют место и свои специфические трудности решения, требующие отдельных дополнительных разработок. В связи с этим в настоящей работе с целью доведения разработок до практического осуществления решение больших систем уравнений рассматривается на конкретных примерах построения специализированных АВУ, предназначенных для решения некоторых задач электроэнергетических систем и их элементов. А именно, рассматриваются вопросы построения специализированного АВУ, предназначенного для экономичного распределения тепловых и электрических нагрузок между теплоагрегатами станции, вопросы построения специализированного АВУ, предназначенного для решения задач экономичного распределения нагрузок между станциями системы, а также АВУ, предназначенных для исследования

электрохимических переходных процессов в электроэнергетических системах. В каждом конкретном случае при составлении алгоритма расчета и структурной схемы были использованы разработанные методы обеспечения нормального функционирования и требуемой точности расчета.

Для решения задач рассматриваемого типа предлагается создание дискретно-моделирующих устройств, основанных на параллельно-последовательном принципе использования решающих блоков аналоговой вычислительной техники. В основу таких устройств положен метод разделения сложной системы уравнений на отдельные подсистемы с решением каждой отдельной подсистемы на протяжении шага расчета, независимо от остальных уравнений системы.

Применение принципа дискретного моделирования наряду с сокращением используемого оборудования, благодаря уменьшению числа замкнутых контуров в схеме моделирования, позволяет в значительной степени упростить и задачу обеспечения структурной устойчивости.

Задача экономичного распределения тепловых и электрических нагрузок между теплоагрегатами ТЭС состоит в том, чтобы заданную тепловую (производственный и теплофикационный отборы пара) и электрическую нагрузку распределить между включенными в работу теплоагрегатами так, чтобы получить наименьший расход топлива или тепла. Осуществление оперативного оптимального распределения тепловых и электрических нагрузок требует решения этой задачи за ограниченное время.

В настоящее время для решения задач экономичного распределения нагрузок в энергосистеме применяют различные методы оптимизации. Учитывая особенности и возможности АБУ, а также опыт выполненных работ, в основу построения математической модели рассматриваемой задачи был принят метод равенства относительных приростов. Подлежащая моделированию система уравнений включает в себя 3 уравнения балансов (производственного, теплофикационного отборов и электрической мощности) и $3n$ уравнений оптимизации с большим числом нелинейностей, соответствующих частям высокого, среднего и низкого давлений, включенных в работу n турбоагрегатов.

Согласно разработанному алгоритму исходная система уравнений представляется в виде трех отдельных подсистем: производственного отбора, теплофикационного отбора и электрической мощности. В каждом шаге итерации сначала решается подсистема уравнений производственного отбора, причем в первую очередь решаются уравнения той турбины, у которой значение неопределенного множителя по производственному отбору минимальное. После удовлетворения производственного отбора в процессе решения включается подсистема уравнений теплофикационного отбора (части среднего давления), а затем уравнения части низкого давления. Решение закончится, если в очередном шаге расчета, после обеспечения балансов производственного, теплофикационного отборов и электрической мощности, полученное новое значение неопределенного множителя Лагранжа по электрической мощности окажется равным заданному значению в начале шага.

Приводятся необходимые условия нормального функционирования схемы разработанного устройства, а также некоторые результаты исследования точности решения. Приводятся результаты испытаний изготовленного опытного образца АБУ, в котором смонтировано также разработанное устройство, предназначенное для экономичного распределения нагрузок между котлоагрегатами станции.

Испытания изготовленного устройства показали, что время для получения решения одного варианта распределения нагрузок между котлоагрегатами составляет 1+2 сек., а для турбинного цеха - 30+60 сек. Образец изготовленного устройства передан для опытной эксплуатации в Армэнерго.

В работе приводятся результаты разработок и исследования специализированного дискретно-моделирующего устройства, предназначенного для экономичного распределения активных мощностей между станциями системы с учетом потерь электрической энергии в линиях электропередач. Для моделирования характеристик относительных приростов расхода условного топлива (ХОПРТ) использованы электрохимические функциональные кулачковые блоки. Применение таких блоков удобно не только с точки зрения простоты изменения ХОПРТ, а также и с точки зрения упрощения конструкции АБУ и удобств моделирования ограничений кривых ХОПРТ.

Кроме того, разработанное функциональное устройство удобно и для использования в качестве запоминающего устройства, необходимого для осуществления принципа дискретного моделирования.

Для учета потерь в электрической сети разработан специализированный блок, основанный на применении принципа дискретного моделирования. С помощью этого блока можно моделировать ряд известных из литературы формул относительных приростов потерь.

Приводятся необходимые условия обеспечения нормального функционирования схемы рассматриваемого дискретно-моделирующего устройства, а также результаты исследования точности изготовленного опытного образца. Разработанное АВУ защищено авторским свидетельством, а также патентами /Л.31, 32/.

С помощью существующих универсальных АВМ, как известно, могут быть реализованы математические модели электроэнергетических систем, содержащих не более 3-5 электрических машин. Универсальные АВМ недостаточно приспособлены для реализации задач рассматриваемого типа не только из-за ограниченного числа решающих блоков, но и из-за отсутствия в них целого ряда необходимых для моделирования дополнительных решающих и логических блоков. В связи с этим, как отмечалось, у нас в Союзе и за рубежом, для исследования электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах разработан ряд специализированных вычислительных устройств. В основу построения большинства таких устройств положен принцип параллельного использования решающих блоков.

Одним из основных вопросов при построении таких специализированных устройств является способ моделирования электрической сети. В машинах, разработанных во ВНИИЭ, Энергосетьпроект и ряде др. организаций для моделирования электрической сети используются модели сети переменного тока (МСПТ). Однако, наряду с целым рядом удобств МСПТ, сопряжение МСПТ с решающими блоками АВМ связано с использованием в одной машине различных типов устройств работающих на постоянном и переменном токах. Поэтому представляется целесообразным моделирование электрической сети осуществлять также с помощью решающих блоков АВМ.

Как известно, зависимость между токами и напряжениями

электрической сети, имеющей $n+1$ узел, можно представить в виде системы $2n$ линейных алгебраических уравнений с действительными коэффициентами, составленными на основе метода узловых напряжений. Однако, как отмечалось, моделирование таких уравнений на АВМ связано с трудностями обеспечения устойчивости. В работе на конкретных примерах показаны способы обеспечения устойчивого решения уравнений электрической сети, основанные на результатах исследований, изложенных в первой части работы. Особой особенностью рассматриваемых уравнений электрической сети является плохая обусловленность матрицы коэффициентов, что затрудняет обеспечение устойчивости АВУ. Предложен способ частичного преобразования исходных уравнений, основанный на введении в моделируемую систему дополнительных переменных. Введение дополнительного переменного соответствует присоединению к узловой точке электрической сети двух взаимно компенсирующих нагрузок: емкостной и индуктивной. При включении индуктивной нагрузки в электрическую сеть емкостная нагрузка представляется в качестве отдельного нагрузочного узла. Показаны условия выбора типа и величины такой дополнительной нагрузки, определяемой матрицей коэффициентов решаемых уравнений. Предложенный способ повышения устойчивости удобен при решении по методу последовательных интервалов.

Для обеспечения устойчивости решения АВУ электрической сети предлагается также использовать в схеме моделирования наряду с необратимыми, один или два обратимых решающих блока. При сочетании в одном АВУ обратимых и необратимых решающих блоков уменьшается число условий устойчивости.

При моделировании электрической сети, содержащей $n+1$ узел, в общем случае может потребоваться $2n$ сумматоров и примерно такое же количество инвертирующих блоков. С целью сокращения числа используемых решающих блоков, а также для повышения устойчивости решения, построение АВУ электрической сети, имеющей большое число узлов, представляется целесообразным осуществлять по методу дискретного моделирования. Разработанная схема такого АВУ электрической сети защищена авторским свидетельством.

Отмеченные выше исследования, связанные с моделированием электрической сети, были применены для разработки некоторых типов специализированных АВУ, предназначенных для исследования электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах.

Для исследования систем с небольшим числом электрических машин (6+8) разработано специализированное АВУ, основанное на параллельном принципе использования решающих блоков. Для создания такого АВУ изготовлено устройство, предназначенное для моделирования электрической сети, имеющей до 12 узловых точек. Наборное поле этого устройства выполнено в соответствии с матрицей решаемых уравнений, что удобно для моделирования и осуществления изменения коэффициентов уравнений в процессе решения задачи.

Основным преимуществом указанного выше способа построения АВУ, работающего только на постоянном токе, является высокое быстродействие и однотипность используемых решающих блоков. К числу недостатков следует отнести ограниченный объем моделируемой энергосистемы, а также трудности, связанные с обеспечением структурной устойчивости. Разработанное АВУ позволяет исследовать как кратковременные, так и длительные переходные процессы. В работе приводятся результаты испытания рассматриваемой схемы, реализованной на базе машин МПТ-9 и МН-14.

Для моделирования электроэнергетических систем с большим числом станций, разработана схема дискретно-моделирующего устройства, в котором электрическая сеть моделируется с помощью емкостных операционных усилителей. В диссертации показана структурная схема такого специализированного дискретно-моделирующего устройства, а также приводятся некоторые результаты испытания. На конкретных примерах установлено, что точность решения при применении метода последовательных интервалов и предложенного в работе способа уточнения правых частей подсистемы решаемых уравнений находится в пределах точности решения АВМ. Схема разработанного дискретно-моделирующего устройства защищена авторским свидетельством.

Для исследования и расчета электромеханических переходных

процессов в электроэнергетических системах, электрическая сеть которых должна быть смоделирована с учетом значительного числа узловых точек, разработано специализированное дискретно-моделирующее устройство, в котором для моделирования электрической сети использована модель сети переменного тока. Работы по созданию такого устройства проводились в Арм.НИИЭ при участии автора. Схема устройства защищена авторским свидетельством /Л.30/. Образцы разработанного устройства переданы для эксплуатации в ряд энергосистем Союза.

В основу разработанных дискретно-моделирующих устройств, предназначенных для исследования электромеханических переходных процессов, положен метод последовательных интервалов. Для повышения точности решения, выполняемого по методу последовательных интервалов, на основе анализа систематических погрешностей решения, предложены варианты преобразования исходных уравнений синхронных генераторов. На примере упрощенного уравнения синхронного генератора показан способ уменьшения погрешности расчета, основанный на уточнении в каждом шаге расчета правых частей уравнений. В работе приводятся результаты исследований устойчивости решения на АВМ некоторых возможных вариантов написания уравнений синхронных генераторов.

Для создания отмеченных выше дискретно-моделирующих устройств потребовалось проведение разработок ряда дополнительных специализированных блоков /Л.6, 7, 11, 12, 16, 19/. В работе приводятся результаты исследования и метод расчета параметров квадраторов, основанных на использовании нелинейных полупроводниковых сопротивлений (варисторов) /Л.6/. Применение таких квадраторов, как известно, удобно для построения малогабаритных множительных блоков. В отличие от известных в литературе методов расчета параметров квадратора, разработанный метод предусматривает использование стэнда, который может быть реализован на АВМ, позволяющем в значительной степени упростить процесс расчета.

В работе приводятся результаты исследования точности работы запоминающего устройства (ЗУ) на конденсаторах, включенных посредством переключающих элементов в обратную связь усилителя

постоянного тока. Рассматриваемое ЗУ одновременно используется и в качестве интегрирующего блока /Л.12/, что весьма удобно для построения схем дискретно-моделирующих устройств. Как показало исследование, погрешность вносится в информацию в момент переключения запоминающих конденсаторов обратной связи. С целью устранения указанной утечки заряда на основе выполненных исследований предложено в момент переключения конденсаторов в цепь установки нуля усилителя подключать дополнительное сопротивление.

Для уменьшения утечки заряда конденсатора ко входу усилителя ЗУ можно подключить также и диод. Работа схемы при этом упрощается, но как показывают исследования, несколько уменьшается точность интегрирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены вопросы синтеза и точности специализированных аналоговых вычислительных устройств, предназначенных для решения больших систем уравнений, основанных на использовании электронных, электрических, механических решающих блоков. На основе выполненных исследований разработан ряд специализированных дискретно-моделирующих устройств применительно к некоторым задачам электроэнергетических систем, которые сводятся к решению больших систем конечных и дифференциальных уравнений. Построение таких устройств связано с разработкой возможно простых математических моделей и схем моделирования, а также и исследованиями по обеспечению нормального функционирования и заданной точности решения.

Ниже приводятся основные результаты выполненной работы:

1. Разработана методика построения нормально функционирующих схем специализированных аналоговых вычислительных устройств, предназначенных для решения конечных уравнений, основанных на использовании электронных, электрических, механических решающих блоков. Выведены необходимые условия, или так называемые практические критерии, необходимые для построения работоспособных, устойчиво работающих схем специализированных

АВУ. Предложен способ построения устойчиво работающих схем АВУ, предназначенных для решения систем алгебраических уравнений по методу непосредственного моделирования.

2. Разработан метод решения инверсной задачи точности специализированных АВУ, т.е. метод проектирования АВУ, исходя из условий требуемой точности решения. Метод основан на применении обратимых решающих блоков АВМ.

3. Предложена методика расчета допусков параметров решающих блоков специализированных АВУ, обеспечивающая требуемую точность решения при условии минимальной стоимости изготовления АВУ. Методика позволяет выполнять решение задачи и при задании ограничений одновременно на несколько выходных параметров АВУ.

4. На конкретных примерах задач электроэнергетических систем разработаны основные элементы построения специализированных дискретно-моделирующих устройств, предназначенных для решения больших систем конечных и дифференциальных уравнений.

5. Разработан алгоритм и определены необходимые условия построения специализированного дискретно-моделирующего устройства, предназначенного для оперативного экономического распределения тепловых и электрических нагрузок между теплоагрегатами электрической станции. Выполнены разработки и исследования необходимые для построения специализированного дискретно-моделирующего устройства, предназначенного для экономического распределения активных мощностей между станциями энергосистемы.

6. Предложены некоторые способы построения устойчиво работающих схем специализированных АВУ электрических сетей, предназначенных для использования в качестве отдельного узла специализированного АВУ многомашинной электроэнергетической системы.

7. Разработаны принципы и схемы построения некоторых типов специализированных устройств, предназначенных для исследования электромеханических переходных процессов в многомашинных энергосистемах. Предложены способы повышения точности решения при применении метода дискретного моделирования. Исследованы особенности моделирования и решения на АВМ уравнений электрических машин.

8. На основе выполненных разработок и исследований изготовлены: специализированное устройство для экономичного распределения тепловых и электрических нагрузок между теплоагрегатами электрической станции, специализированное устройство для экономичного распределения активных мощностей между станциями энергосистемы, специализированное устройство для моделирования электрической сети энергосистемы и специализированное устройство для исследования электромеханических переходных процессов в многомашинной энергосистеме.

9. Разработан ряд дополнительных блоков, предназначенных для создания дискретно-моделирующих устройств. Выполнены исследования и предложены методы расчета параметров некоторых из этих блоков.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Определение мощности и направления передачи энергии в связях сложных устройств. Труды Института машиноведения. Семинар по точности в машиностроении и приборостроении. Изд. АН СССР, 1959, №13.
2. Некоторые вопросы анализа и синтеза механических и электронных устройств с замкнутыми контурами. Труды Института машиноведения АН СССР. Вторая научная конференция научных сотрудников. Том I, Изд. АН СССР, 1959.
3. Исследование точности сложных устройств с замкнутыми контурами. Труды Института машиноведения. Семинар по точности в машиностроении и приборостроении. Изд. АН СССР, 1960, № 14.
4. Некоторые вопросы построения электронных устройств для решения алгебраических уравнений. Труды Института машиноведения. Семинар по точности в приборостроении и машиностроении. Изд. АН СССР, 1961, № 15.
5. К вопросу решения матричных уравнений электрических цепей на машинах непрерывного действия. Известия АН Арм.ССР, 1962, № 2.
6. Множительное устройство на варисторах. Серия технических наук. Известия АН Арм.ССР, 1963, № 5.
7. Получение на математических машинах непрерывного действия функции синуса и косинуса при большом диапазоне изменения аргумента. "Промышленность Армении", № 12, 1964, (Соавтор Акопян С.Г.).
8. Выбор структурной схемы моделирования уравнений синхронного генератора на математических машинах непрерывного дей-

- ствия. "Электричество", 1964, № II. (Соавторы Адонц Г.Т., Акопян С.Г.).
9. Автоматизация расчетов динамической устойчивости энергосистем с помощью моделей сетей переменного тока, сопряженной с аналоговой машиной. I Всесоюзная конференция по технической кибернетике. Тезисы докладов. Секция "Энергетика и транспорт". Изд. НТУ радиосвязи и радиотехники им. А.С. Попова, 1964. (Соавторы Адонц Г.Т., Акопян С.Г., Айрапетян Г.А., Гамбуриян К.А., Егиазарян Л.И., Мурадян С.Г., Мусаелян А.Н.).
10. Влияние активного сопротивления и переходных процессов в обмотке статора на изменение роторного угла синхронной машины. "Электричество", 1965, № I. (Соавторы Адонц Г.Т., Акопян С.Г.).
11. Преобразователь постоянного напряжения в угол сдвига фазы переменного напряжения. "Промышленность Армении", Ереван, 1965, № 3. (Соавтор Мурадян С.Г.).
12. Исследование точности работы запоминающего устройства на конденсаторах, используемого в математических машинах непрерывного действия. Труды Института машиноведения. Семинар по точности в машиностроении и приборостроении. Москва, 1965, вып. 19. (Соавтор Мурадян С.Г.).
13. Исследование формулы роторного угла синхронной машины в режиме трехфазного короткого замыкания с помощью цифровой машины. Известия АН Арм.ССР, 1966, № 3. (Соавторы Адонц Г.Т., Акопян С.Г.).
14. Решение уравнения синхронного генератора на аналоговой машине по методу последовательных интервалов. Известия АН СССР. "Энергетика и транспорт", 1966, № 5. (Соавторы: Акопян С.Г., Мурадян С.Г.).
15. Методика расчета точности устройств, описываемых системами нелинейных дифференциальных уравнений. Арм. ИИТИ, Информационный листок, Ереван, 1967.
16. Электромеханическое функционально-множительное устройство Арм. ИИТИ, Информационный листок, Ереван, 1967. (Соавтор Акопян С.Г.).
17. К вопросу о расчете точности аналоговых математических моделей. Изв. АН Арм.ССР, 1968, № I. Серия технических наук.
18. К вопросу об устойчивости решения уравнений энергосистемы на аналоговой математической модели. Известия АН СССР, Энергетика и транспорт, 1968, № 3. (Соавторы: Мурадян С.Г., Согомонян С.С.).
19. Электронное реле времени. "Промышленность Армении", 1968, № I. (Соавтор Мурадян С.Г.).
20. Некоторые вопросы автоматизации оптимального распределения тепловых и электрических нагрузок ТЭЦ. Тезисы докладов IV Всесоюзного совещания по автоматическому управлению. "Технической кибернетики". Книга 2, Тбилиси, 1968, (Соавторы: Погосян Г.С., Бакунц Г.А., Букин В.Н.).

21. Исследования точности аналоговой математической модели на примере модели синхронного генератора. Доклады Пятой межвузовской конференции по физическому и математическому моделированию. Секция аналогового моделирования в различных областях техники. Москва, 1968. (Соавтор: Согомонян С.С.)
22. Некоторые вопросы моделирования уравнений оптимального распределения тепловых и электрических нагрузок ТЭЦ. Доклады Пятой межвузовской конференции по физическому и математическому моделированию. Секция моделирования в области теплоэнергетики. Москва, 1968 (Соавтор: Букин В.Н.).
23. К вопросу построения вычислительного устройства для оптимального распределения тепловых и электрических нагрузок на ТЭЦ. Сб. "Применение новейших математических методов кибернетики в экономике энергетики" Изд. Полиграфкомбинат Гос. ком. по печати Арм. ССР, Ленинград-Ереван, 1969 г, (Соавторы: Погосян Г.С., Бакунц Г.А Букин В.Н.).
24. Применение итеративного метода расчета при реализации с помощью специализированных АВМ математической модели оптимального распределения нагрузок между теплоагрегатами ТЭЦ. Сб. I. Оптимизация режимов работы тепловых электрических станций с применением вычислительной техники. Тезисы докладов. Научно-техническое совещание. Киев, 1969г, (Соавтор: Букин В.Н.).
25. Необходимые условия построения схем АВМ для решения алгебраических уравнений. Тезисы докладов. III Всесоюзная конференция по аналоговой вычислительной технике. Москва, 1969.
26. К вопросу построения аналоговых вычислительных устройств. Изв. АН Арм.ССР. Серия технических наук, 1970, №5.
27. Об одном методе моделирования электрической сети при построении дискретно-моделирующего устройства многомашинной электрической системы. "Электричество, 1970, №6, (Соавторы: Аветикова Е.Г., Согомонян С.С.).
28. К вопросу построения специализированных дискретно-моделирующих устройств для расчета режимов электрических систем. Изв. АН "Энергетика и транспорт", 1970, №4. (Соавторы: Аветикова Е.Г., Согомонян С.С.).
29. Проектирование специализированных аналоговых вычислительных устройств из условий заданной точности. ИНТИ, информационный листок, Ереван, 1970.
30. Моделирующее устройство для расчетов и исследования установившихся и переходных процессов в энергосистемах. Описание изобретения к авторскому свидетельству с приоритетом от 10. XII. 1965г. Зарегистрировано 31 августа 1967г. по заявке № 1042308. (Соавторы: Адонц Г.Т., Айрапетян Г.А., Акопян С.Г., Гамбуриян К.А., Егиазарян Л. В., Мурадян С.Г., Мусаелян А.Н.).

31. Вычислительное устройство для экономичного распределения активных мощностей. Описание изобретения к авторскому свидетельству с приоритетом от 27 ноября 1965г. Зарегистрировано 16 октября 1967г. по заявке № 1039932.
32. Вычислительное устройство по заявке № 1039932. Патенты: Италия № 785653 от 14. 12. 67г.; Франция № 1520858 от 4.3.58г. ; Турция № 14457от 12.6.67г.; ОАР № 8928от 30.7.69г.; Англия №1184068 от 16.1.70г. США № 3493733 от 3.3.70г.
33. Устройство для моделирования электрической сети энергосистемы. Описание к авторскому свидетельству № 251948 с приоритетом от 22 января 1968г. Зарегистрировано 30 июня 1969г, (Соавтор: Аветикова Е.Г.).

Заказ І8

ВФ 03410

Тираж 200

Цех "Ромайор" Ереванского политехнического института
им. К.Маркса, ул. Теряна, І05.