Киевский ордена Ленина политехнический институт имени
50-летия Великой Октябрьской социалистической революции

На правах рукописи

МЕЛЬНИК Виктор Петрович

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ КИБЕРНЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Специальность 05.14.06 - Электрические системы
и управление ими

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1973

Киевский ордена Ленина политехнический институт имени
50-летия Великой Октябрьской социалистической революции

На правах рукописи

МЕЛЬНИК Виктор Петрович

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ КИБЕРНЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Специальность 05.14.06 - Электрические системы
и управление ими

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1973

Работа выполнена на кафедре "Электрические сети и системы" Киевского ордена Ленина политехнического института имени 50-летия Великой Октябрьской социалистической революции.

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор В.Г.ХОЛМСКИЙ
кандидат технических наук, доцент Ю.В.ЩЕРБИНА.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор О.В.ЩЕРБАЧЕВ
кандидат технических наук В.Н.АВРАМЕНКО.

Ведущее предприятие

Объединенное диспетчерское управление энергосистем Юга.

Автореферат разослан "___"____________1973 г.

Защита диссертации состоится "___"____________1973 г. в _____ час. на заседании Совета по присуждению ученых степеней электроэнергетического факультета Киевского ордена Ленина политехнического института имени 50-летия Великой Октябрьской социалистической революции (ауд.____ главного корпуса).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать свои отзывы в двух экземплярах с подписями, заверенными печатями, Ученому секретарю института по адресу: 252056, г.Киев, Брест-Литовский проспект, 39, КПИ, Ученому секретарю.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ИНСТИТУТА (ИЩЕНКО Г.М.)

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач советской энергетики в настоящее время является создание автоматизированных систем управления производством и распределением электроэнергии (ОАСУ "Энергия") на базе новейших высокопроизводительных средств информационной и вычислительной техники.

Сложность оперативного управления современными объединенными энергосистемами требует дальнейшего совершенствования существующих алгоритмов и программ анализа установившихся и переходных режимов, а также разработки принципиально новых методов. Работы в этих направлениях ведутся под руководством Г.Т.Адонца, В.А.Веникова, Ф.Г.Гусейнова, И.М.Марковича, С.А.Совалова, Х.Ф.Фазылова, Л.В.Цукерника, О.В.Щербачева и др. Одним из перспективных направлений является разработка изофункциональных (кибернетических) моделей, позволяющих имитировать поведение электрических систем в любых заданных ситуациях.

Методы кибернетического моделирования применяются в различных отраслях науки, занимающихся исследованием процессов в больших системах: в биологии, в военном деле, для моделирования социальных явлений и др. Основные идеи кибернетического моделирования электрических систем впервые сформулированы В.А.Вениковым. Дальнейшее его развитие осуществлено в МЭИ, КПИ и др. Весьма близок к этому подходу ряд работ ИЭД АН УССР.

В реферируемой диссертации рассмотрены основные положения методики кибернетического моделирования и некоторые вопросы ее применения для анализа установившихся и переходных режимов электрических систем.

ГЛАВА I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КИБЕРНЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

С точки зрения кибернетики все происходящие в системе изменения представляют собой процессы восприятия, переработки, хранения и выдачи информации отдельными элементами, объединенными посредством причинно-следственных связей. Реальной системе можно поставить в соответствие некоторый абстрактный объект-заместитель - причинную сеть, узлы которой являются отображениями элементов. Каждый узел воспринимает воздействия (причины) от внешней среды и других узлов, изменяет свое состояние и оказывает воздействия (следствия) на другие узлы и внешнюю среду.

В основе кибернетического моделирования лежит представление о кибернетике как науке о причинных сетях, предложенное А.А.Марковым. При этом упор делается не на раскрытие материальной структуры моделируемого объекта, а на характеристику функциональных отношений его элементов. Если для физического моделирования характерен изоморфизм физических процессов, в математической модели обеспечивается только изоморфизм количественных соотношений, то в основе кибернетического моделирования лежит изоморфизм функциональных отношений - изофункционализм. В соответствии с функциональным подходом узлы причинной сети рассматриваются как "черные ящики", функции которых адекватны функциям элементов реальной системы. Основные теоретические положения кибернетического моделирования разработаны У.Р.Эшби, И.Б.Новиком, О.Ланге и др.

Преобразующая функция произвольного динамического элемента при цифровом моделировании может быть получена на основании метода свертки

$$Y^{(i+1)} = H^{(i)} X_0 + \sum_{j=1}^{i} H^{(i-j)} \Delta X^{(j)}, \qquad (I)$$

где Y - вектор-столбец выходных переменных; X_0 - вектор-столбец начальных значений входных воздействий; $\Delta X^{(j)}$ - приращение входных воздействий на j-м интервале времени; $H^{(j)}$ - переходная матрица элемента. Недостатком такого подхода является необходимость хранения предыстории процесса $X^{(j)}$ и $H^{(j)}$, где $=1,2,\ldots,i$, что требует больших объемов памяти.

Поскольку текущее состояние элемента физически определяется в зависимости от его состояний в предыдущие моменты, то в качестве начала отсчета можно использовать рассматриваемый момент времени. Решая исходную систему дифференциальных уравнений с учетом выбранных таким образом начальных уловий и переходя к конечным разностям, получим рекуррентное соотношение

$$Y^{(i+1)} = \sum_{j=0}^{r} [\xi_j Y^{(i-j)} + \alpha_j X^{(i-j)}], \qquad (2)$$

где ξ_j - диагональные, а α_j - полные матрицы коэффициентов, вычисляемых в зависимости от параметров элемента и интервала времени Δt. Величина r, называемая глубиной предыстории процесса, зависит от количества уравнений элемента и порядка каждого из них. Данный метод требует значительно меньшего расхода памяти и времени ЭЦВМ.

Представляет интерес моделирование динамических элементов на основании частотных характеристик, полученных экспериментальным путем.

Кибернетическое моделирование сложной системы в общих чертах сводится к следующему: определяются функции элементов, составляется причинная сеть и осуществляется ее реализация с помощью кибернетических устройств, устанавливается исходный режим, задаются внешние воздействия, "запускается" процесс и фиксируются изменения переменных. Преобразование информации в причинной сети возможно с помощью различных вычислительных устройств: ЭЦВМ (являющихся в настоящее время основным средством), аналоговых машин или гибридных вычислительных комплексов.

Реализация модели на ЭЦВМ сводится к следующему. Составляются операторы переработки информации в каждом узле или ряде однотипных узлов причинной сети. Каждый оператор рассматривается как некоторый абстрактный цифровой автомат, работающий по заданному алгоритму и обладающий памятью для запоминания предыстории. Передача информации между узлами и общее управление моделью осуществляется управляющим оператором. Эффективное программирование моделей такой структуры на ЭЦВМ II поколения возможно при помощи специализированной системы автоматизации программирования САПРЭС.

Недостатком ЭЦВМ является низкая скорость моделирования процессов, вызванная последовательностью выполнения операций. Гибридные комплексы, удачно сочетающие преимущества ЭЦВМ и аналоговых машин, позволяют значительно увеличить скорость

моделирования. Представляет интерес сочетание ЭЦВМ с набором специализированных цифровых моделей некоторых элементов.

Для иллюстрации общих положений в работе рассмотрены два примера: моделирование переходного процесса в RLC-схеме и анализ установившегося режима электрической сети.

Моделирование замкнутой RLC-схемы производится на основании построенной в памяти ЭЦВМ причинной сети, состоящей из преобразующих узлов, узлов суммирования и передаточных связей. Работа преобразующих узлов, обычно описываемых дифференциальными уравнениями, отображается рекуррентными соотношениями

$$U_д^{(i+1)} = \xi_д U_д^{(i)} + \alpha_д J_д^{(i)} - \beta_д J_д^{(i-1)} , \quad (3)$$

$$J_п^{(i+1)} = \xi_п J_п^{(i)} + \alpha_п U_п^{(i)} - \beta_п U_п^{(i-1)} , \quad (4)$$

где $U_д$, $J_д$, $U_п$, $J_п$ – векторы-столбцы напряжений и токов участков дерева и перемычек; ξ, α, β – диагональные матрицы коэффициентов. Движение информации по передаточным связям с учетом узлов суммирования описывается выражениями

$$J_д^{(i+1)} = S_1 J_п^{(i+1)} + S_2 J_д^{(i+1)} , \quad (5)$$

$$U_п^{(i+1)} = S_3 U_д^{(i+1)} - E^{(i+1)} , \quad (6)$$

где S_1, S_2, S_3 – нуль-единичные матрицы, описывающие связи элементов; E – вектор-столбец э.д.с. контуров. Аналогичная методика может быть использована для моделирования переходных процессов в электрических системах с учетом электромагнитных процессов в электрических сетях, а также в других областях электротехники, в радиотехнике и т.п.

Стационарный режим электрической схемы можно рассматривать как установившееся значение переходного процесса. Пусть в электрической сети постоянного тока с заданными токами нагрузок последовательно сопротивлениям перемычек подключены некоторые индуктивности. Тогда преобразование информации в участках дерева и перемычках будет осуществляться согласно выражениям

$$U_\partial^{(i+1)} = Z_\partial J_\partial^{(i+1)} , \qquad (7)$$

$$J_n^{(i+1)} = (E - \xi) J_n^{(i)} + \xi Y_n U_n^{(i+1)} , \qquad (8)$$

где Z_∂, Y_n - диагональные матрицы сопротивлений участков дерева и проводимостей перемычек. Работа узлов суммирования может быть представлена уравнениями

$$J_\partial^{(i+1)} = J_{\partial o} + S_I J_n^{(i)} , \qquad (9)$$

$$U_n^{(i+1)} = S_{II} U_\partial^{(i+1)} , \qquad (10)$$

где $J_{\partial o}$ - вектор токов участков дерева при отсутствии перемычек; S_I, S_{II} - матрицы связей.

Из выражений (7)-(10) вытекает общее рекуррентное соотношение

$$J_n^{(i+1)} = J_{no} + A J_n^{(i)} , \qquad (11)$$

где A - матрица способа действия электрической сети относительно токов перемычек. Ее значение

$$A = E + \xi Y_n S_{II} Z_\partial S_I - \xi . \qquad (12)$$

Для произвольной электрической сети при $\xi = E$

$$A = \left[\frac{R_{k\ell}}{R_k} \right] , \quad k, \ell = 1, 2, \ldots, n , \qquad (13)$$

где $R_{k\ell}$ при $k \neq \ell$ - сопротивление участков дерева, принадлежащих k-му и ℓ-му контуру; R_{kk} - сумма сопротивлений участков дерева, принадлежащих k-му контуру; R_k - сопротивление перемычки k-го контура; n - количество контуров сети.

Итерационный процесс (11) сходится тогда и только тогда, когда все собственные числа матрицы A по модулю меньше 1. Если пренебречь недиагональными элементами, то собственные числа матрицы будут равны ее диагональным элементам. Отсюда вытекает, что для сходимости итерационного процесса при $\xi = E$ необходимо, чтобы сопротивления перемычек были больше сопротивлений остальных частей контуров. При $\xi \neq E$ сходимость будет наилучшей, если диагональные элементы равны 0, откуда

$$\xi_k = \frac{R_k}{R_{kk} + R_k} . \qquad (14)$$

Недиагональные элементы матрицы A с учетом (14) равны $\frac{R_{k\ell}}{R_{kk}+R_k}$. Поэтому перемычки должны быть выбраны таким образом, чтобы взаимные сопротивления контуров $R_{k\ell}$ были наименьшими, а собственные сопротивления контуров $R_{kk}+R_k$ - наибольшими.

Полученные результаты распространяются также на схемы переменного тока. На основании такого подхода разработан алгоритм и составлена программа анализа установившихся режимов электрических сетей при заданных активных и реактивных мощностях нагрузок. Причинная сеть формируется в памяти ЭЦВМ автоматически по заданной схеме соединений с учетом состояний коммутационных аппаратов. Проведенные экспериментальные расчеты полностью подтверждают правильность и эффективность рассмотренной методики.

ГЛАВА П. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ.

Синхронный генератор может быть представлен схемой замещения в виде системы взаимосвязанных электромагнитных контуров. При этом уравнения переходного процесса записываются относительно неподвижных осей a, b и c. Приведением уравнений к системе координат d, q можно устранить зависимость параметров от положения обмоток. Соответствующие уравнения, известные в литературе как уравнения Парка-Горева, являются исходными при исследовании различных процессов в электрических системах.

Наиболее распространенными методами анализа переходных процессов в настоящее время являются методы численного интегрирования дифференциальных уравнений, приведенных к форме Коши. Как известно, эти методы требуют многократного вычисления на каждом шаге громоздких правых частей, что связано с большим расходом памяти и машинного времени.

Анализируя работу генератора, можно выделить в нем следующие элементы: регулятор возбуждения, возбудитель, магнитная, механическая части и статор. Регулятор в зависимости от внешних условий вырабатывает поправку ΔU_p к напряжению возбудителя, что, в свою очередь, ведет к изменению напряжения обмотки возбуждения U_f. Последнее вместе с изменением тока, потребляемого сетью, вызовет изменение потокосцеплений Ψ_d, Ψ_q. В результате электромеханического переходного процесса произойдет изменение угла δ. Наконец, изменение Ψ_d, Ψ_q и δ приведет к изменению модуля и фазы вектора напряжения на зажимах генератора. На основании указанных причинно-следственных зависимостей в работе построена причинная сеть генератора и даны соответствующие аналитические выражения.

После исключения промежуточных переменных магнитная система генератора может быть представлена операторными выражениями

$$\Psi_d = x_d(p)\, i_d + G(p) U_f \quad , \qquad (I5)$$

$$\Psi_q = x_q(p)\, i_q \quad , \qquad (I6)$$

где $x_d(p)$, $x_q(p)$ – продольное и поперечное операторные сопротивления; $G(p)$ – операторная проводимость. Представив (I5) и (I6) в виде дифференциальных уравнений и решив их с учетом начальных значений переменных, соответствующих i-I -му и i -му шагу моделирования, получим рекуррентные соотношения

$$\Psi_d^{(i+1)} = \xi_d \Psi_d^{(i)} - \gamma_d \Psi_d^{(i-1)} + \alpha_d i_d^{(i)} - \\ - \beta_d i_d^{(i-1)} + \alpha_f U_f^{(i)} - \beta_f U_f^{(i-1)} \quad , \qquad (I7)$$

$$\Psi_q^{(i+1)} = \xi_q \Psi_q^{(i)} + \alpha_q i_q^{(i)} - \beta_q i_q^{(i-1)} \quad . \qquad (I8)$$

Коэффициенты ξ, γ, α, β зависят от параметров генератора, интервала времени Δt и вида аппроксимации входных воздействий. В диссертации приведены соответствующие выражения для случаев ступенчатой и линейной аппроксимации.

Аналогично получены рекуррентные соотношения, моделирующие работу возбудителя и АРВ

$$U_f^{(i+1)} = \xi_f U_f^{(i)} + \alpha_b U_b^{(i)} - \beta_b U_b^{(i-1)} \quad , \qquad (I9)$$

$$U_b^{(i+1)} = U_{бн}(1 - \xi_b) + \xi_b U_b^{(i)} + \alpha_p \Delta U_p^{(i)} - \beta_p \Delta U_p^{(i-1)} \quad , \qquad (20)$$

где $U_в$ - напряжение на обмотке возбуждения возбудителя;

$\Delta U_р$ - поправка регулятора, зависящая от процесса регулирования.

Механическое движение ротора с учетом демпферного момента моделируется рекуррентным соотношением

$$\delta^{(i+1)} = \xi \delta^{(i)} - \gamma \delta^{(i-1)} + \alpha \mathcal{E}m^{(i)} - \beta \mathcal{E}m^{(i-1)}, \quad (21)$$

где $\mathcal{E}m$ - небаланс моментов на валу генератора.

Результирующий магнитный поток, которому соответствуют составляющие потокосцепления ψ_d, ψ_q, пронизывая обмотку статора, создает на ее зажимах напряжения U_d, U_q, определяемые из уравнений

$$U_d^{(i+1)} = -\psi_d'^{(i+1)} - \psi_q^{(i+1)}[1+\delta'^{(i+1)}] - r i_d^{(i+1)}, \quad (22)$$

$$U_q^{(i+1)} = -\psi_q'^{(i+1)} + \psi_d^{(i+1)}[1+\delta'^{(i+1)}] - r i_q^{(i+1)}. \quad (23)$$

где $\psi_d'^{(i+1)}$, $\psi_q'^{(i+1)}$, $\delta'^{(i+1)}$ - скорости изменения потокосцеплений и угла δ на i+I -м шаге.

В качестве примера рассмотрен переходный процесс в генераторе, работающем на шины бесконечной мощности. Система подразделена на два элемента: генератор и линия электропередачи. Для генератора причинами являются токи i_d, i_q, момент турбины и уставки регулятора, следствиями - напряжения U_d, U_q и угол δ. Для линии электропередачи причиной является разность потенциалов на ее концах $\dot{U}_r - \dot{U}_c$, следствием - ток $\dot{J}_л = \dot{J}_r$. Переменные генератора представлены в системе координат d, q, переменные линии - в синхронно вращающейся системе (′), (″). При передаче информации между генератором и линией производится преобразование координат.

По экспериментальным программам выполнены расчеты переходных процессов, возникающих при трехфазном к.з. вблизи генератора с учетом демпферной обмотки и без нее. Сопоставление результатов, полученных расчетным путем и на электродинамической модели, подтверждает правильность разработанной методики. Максимально допустимая по условиям точности длина интервала Δt составляет при ступенчатой аппроксимации около 0,00I сек. Машинное время исчисляется секундами.

ГЛАВА Ш. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.

Причинно-следственные связи элементов электрической системы устанавливаются на основе единства процесса производства, распределения и потребления электроэнергии в каждый момент времени. Генераторы и приемники выступают в этом процессе в качестве своеобразных регуляторов, поддерживающих равновесие в системе при различных возмущающих воздействиях внешней среды. Эти воздействия вызывают одновременное протекание электромеханических и электромагнитных процессов, характер которых определяется как динамическими свойствами элементов, так и причинно-следственными связями между ними. Кибернетическое моделирование позволяет совместно с переходными процессами рассматривать работу устройств РЗА, однако эти вопросы требуют специальной разработки.

В реальных условиях под действием случайных возмущений частота в системе непрерывно изменяется, что соответствует изменению углов δ, отсчитываемых от синхронной оси, в широких пределах. Для моделирования процессов с учетом изменения частоты целесообразно вводить условный элемент - эквивалентный генератор системы и использовать вращающуюся систему координат, связанную с ротором эквивалентного генератора. Тогда в течение i +1 -го интервала Δt ось ($'$) повернется относительно синхронной оси на угол

$$\Delta\delta_э^{(i+1)} = \Delta\delta_э^{(i)} + \frac{\Delta t^2}{T_{jэ}} \mathcal{E} m_э^{(i)} , \qquad (24)$$

где $T_{jэ}$ - суммарная постоянная инерции генераторов; $\mathcal{E} m_э$-суммарный небаланс моментов. Величина $\Delta\delta_э^{(i+1)}$ является поправкой к изменениям углов δ .

Поворот условного ротора за время Δt на $\Delta\delta_э^{(i+1)}$ соответствует изменению частоты $f^{(i+1)}$. Отклонение $f^{(i+1)}$ от номинального значения f_H вызовет работу регуляторов скорости турбин, увеличивая или уменьшая их механические моменты. При этом добавка регулятора к номинальному моменту турбины m_{TH} определяется из рекуррентного соотношения

$$\mathcal{E} m_T^{(i+1)} = \xi_T \mathcal{E} m_T^{(i)} + (1-\xi_T)\frac{m_{TH}}{\sigma}\cdot\frac{f_H - f^{(i+1)}}{f_H} , \qquad (25)$$

где ξ_T - коэффициент, зависящий от постоянной времени исполнительного механизма T_s и интервала Δt ; σ - статизм регулятора. Аналогично можно учесть действие регулятора частоты.

Причинная сеть сложной электрической системы состоит из пяти видов узлов: условный эквивалентный генератор, АРС, синхронные генераторы, узлы нагрузок и электрическая сеть. В эквивалентном генераторе суммарный небаланс моментов системы приводит к изменению частоты. В АРС отклонение частоты от номинальной вызывает изменение механических моментов турбин. Для

генератора причиной является момент турбины и ток, потребляемый сетью, следствием - напряжение на зажимах генератора. Для узла нагрузки причиной являются подведенное напряжение, следствием - ток, потребляемый нагрузкой. В электрической сети напряжения генераторов и токи нагрузок преобразуются в токи генераторов и напряжения нагрузок.

Узлы нагрузок можно представлять эквивалентными асинхронной, синхронной и осветительной нагрузками. Количественные соотношения эквивалентного асинхронного двигателя могут быть установлены на основе Г-образной схемы замещения. Ток $\dot{J}_a^{(i+1)}$, потребляемый асинхронной нагрузкой в конце i +1 -го интервала времени, можно определить из выражения

$$\dot{J}_a = \frac{\dot{U}_H}{\dot{Z}_a(s)} , \qquad (26)$$

где $\dot{U}_H$ - подведенное напряжение; $Z_a(s)$ - сопротивление двигателя, определяемое на основании схемы замещения в зависимости от скольжения. Изменение скольжения описывается соотношением

$$s^{(i+1)} = s^{(i)} + \frac{\Delta t^2}{T_j}\mathcal{E} m_a^{(i)} . \qquad (27)$$

Синхронная нагрузка замещается эквивалентным синхронным двигателем с постоянной э.д.с. E_c , приложенной за сопротивлением x_d. Тогда

$$\dot{J}_c = \frac{U_H - E_c(\cos\delta_c + j\sin\delta_c)}{R_{cc} + j(X_{cc} + x_d)} , \qquad (28)$$

где $R_{cc} + jX_{cc}$ - эквивалентное сопротивление связи синхронного двигателя. Изменение δ_c по аналогии с генератором моделируется рекуррентным соотношением (2I). Ток, потребляемый осветительной нагрузкой, определяется согласно ее статической характеристике.

Таким образом, узел нагрузки может быть подразделен на три обобщенных элемента, причем асинхронная и синхронная нагрузки включают в себя механическую и электрическую составляющие. Возможны также более детальное описание узла нагрузки (с учетом электромагнитных процессов, с выделением питающей и распределительной сети и т.п.) или упрощенное ее представление (на основе динамической или статической характеристик).

При уточненных расчетах т.к.з., динамической устойчивости, самовозбуждения, самораскачивания и др. электрическую сеть следует рассматривать как динамический элемент, состоящий из трех (для каждой фазы) RLC-схем. Напряжения U_q+jU_d и токи $J'_н+jJ''_н$, получаемые как следствия переходных процессов в генераторах и нагрузках, преобразуются в составляющие неподвижной системы координат U_a, $U_в$, U_c и i_a, $i_в$, i_c. На основании методики, рассмотренной в первом примере главы I, производится моделирование переходных процессов в каждой фазе и затем осуществляется обратный переход к токам i_q+ji_d и напряжениям $U'_н+jU''_н$, являющимся входными воздействиями для генераторов и нагрузок. В других случаях возможно упрощенное представление электрической сети как статического элемента с использованием огибающих.

Для моделирования исследуемого переходного процесса необходимо иметь начальные значения переменных. Пусть характеристики установившегося режима сети являются известными. Тогда ис-

ходные режимы генераторов и нагрузок могут быть определены по известным значениям токов и напряжений в пунктах сети. Для нагрузок, кроме того, должны быть заданы процентные составы и потери мощности в сопротивлениях связей.

Синхронный генератор в установившемся режиме описывается системой алгебраических уравнений, вытекающих из дифференциальных уравнений Парка-Горева. Этой системе соответствует схема замещения в виде постоянной э.д.с. E_Q, приложенной за сопротивлением $r+jx_q$ и направленной вдоль оси q. Тогда

$$\delta = arctg\frac{U''_г+rJ''_г+x_qJ'_г}{U'_г+rJ'_г-x_qJ''_г} \qquad (29)$$

Зная δ, можно определить i_d, i_q, U_d, U_q, затем ψ_d, ψ_q, U_f и, наконец, $U_в$, ΔU_p.

Установившийся режим узла нагрузки рассчитывается следующим образом. По заданному процентному составу определяются мощности $\dot{S}_a$, $\dot{S}_c$, $\dot{S}_o$ и токи $\dot{J}_a$, $\dot{J}_c$, $\dot{J}_o$. Поскольку сопротивление асинхронного двигателя $Z_a=\frac{\dot{U}_н}{\dot{J}_a}$, то на основании схемы замещения может быть найдено скольжение s и сопротивление связи Z_{ca}. Исходное значение угла δ_c эквивалентного синхронного двигателя находится из выражения

$$\delta_c = \psi_c + arccos\frac{P_c-\Delta P_c}{E_cJ_c} \qquad (30)$$

где ψ_c - аргумент вектора тока $\dot{J}_c$; ΔP_c - потери мощности в сопротивлении связи синхронной нагрузки. Параметры осветительной нагрузки определяются на основании ее статической характеристики.

В диссертации приводится подробное изложение методики расчета установившегося режима генераторов и нагрузок.

ГЛАВА IУ. АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

Расчеты статической устойчивости, как известно, подразделяются на две группы.

Первая группа расчетов, связанная с выбором АРВ, выполняется с учетом самораскачивания системы. Задача решается обычно путем выделения областей устойчивости с последовательным изменением настроечных или конструктивных параметров. Представляет интерес кибернетическое моделирование переходных процессов при различных малых возмущениях. Получаемые при этом результаты будут отличаться большой наглядностью и должны способствовать выявлению "слабых звеньев" системы.

Вторая группа расчетов связана с определением запасов устойчивости на основании реальных условий утяжеления режима при заданных ограничениях. Предполагается, что нарушение устойчивости может происходить только апериодически. Критерием устойчивости в этом случае может служить знак свободного члена характеристического уравнения.

Возможен упрощенный анализ апериодической устойчивости на основе предположения о постоянстве э.д.с. генераторов. Как показывает анализ, свободный член характеристического уравнения a_o такой системы зависит от демпферных моментов $P_д$ и матрицы Якоби режима электрической сети. Если $P_д$ =0, то свободным членом становится коэффициент a_1, зависящий от постоянных инерции. Для системы, не имеющей шин бесконечной мощности, учет демпферных моментов при анализе апериодической устойчивости

является принципиально важным. Если предположить, что в системе имеются шины бесконечной мощности, то свободный член равен якобиану, и апериодическая устойчивость системы полностью определяется режимом электрической сети.

Изменение мощностей станций при моделировании переходного процесса с учетом шин бесконечной мощности может быть описано выражением

$$P^{(i)} = P_o + A^{(i)} \mathcal{E} P_o \quad , \qquad (31)$$

где P_o - исходное установившееся значение вектора мощностей; $\mathcal{E}P_o$ - небалансы мощностей на валах генераторов в начальный момент времени; $A^{(i)}$ - матричный степенной ряд

$$A^{(i)} = \sum_{j=1}^{i} (-1)^{j-1} a_j B^j \ . \qquad (32)$$

Матрица $B = \mathcal{J}\alpha$. Здесь $\mathcal{J}$ - матрица Якоби, α - диагональная матрица коэффициентов, зависящих от постоянных инерции, демпферных моментов и интервала времени Δt . Как известно, $A^{(i)} \to [0]$ при $i \to \infty$ тогда и только тогда, когда все собственные числа матрицы B расположены внутри области сходимости числового ряда, получаемого из (32) путем замены матрицы B переменной $\dot{x}$ на комплексной плоскости. В результате расчетов установлено, что при $P_д$ =0 числовой ряд сходится, если $0 \leq \dot{x} \leq 3,61$.

Таким образом, для устойчивого функционирования модели необходимо и достаточно, чтобы собственные числа матрицы B были действительными и находились в пределах $0 \leq \lambda \leq 3,61$. Нижний предел λ_{min} =0 соответствует пределу апериодической устойчивости системы. Верхний предел λ_{max} =3,6I ограничивает величину интервала Δt. Поэтому наличие $\lambda > 3{,}61$ указывает на неустойчивость модели, а не системы. Появление комплексно-сопряженных собственных чисел свидетельствует о самораскачивании системы.

Если учесть демпферные моменты, то область устойчивости превращается в овал, площадь которого тем больше, чем больше P_∂. Показано, что в пределе при $P_\partial \to \infty$ область устойчивости превращается в окружность радиуса I.

Учет статических характеристик нагрузок влияет на значение матрицы Якоби и, тем самым, изменяет область устойчивости электрической системы. Разработана причинная сеть статической части системы на основании частных производных характеристик.

Параметры предельного режима определяются в результате последовательного утяжеления системы. При этом на каждом шаге утяжеления рассчитывается режим и определяется критерий устойчивости, которым обычно служит знак свободного члена или практический критерий $\frac{\partial P}{\partial \delta}$. Опубликован ряд работ, в которых устойчивость системы проверяется в процессе итерационного расчета режима. Это возможно при допущении о наличии в системе шин бесконечной мощности, когда критерием устойчивости может служить знак якобиана режима электрической сети. Однако не всякий вычислительный процесс нарушает сходимость при достижении предела устойчивости.

Наиболее общий подход к выявлению устойчивости в процессе выхода на режим требует, чтобы траектория движения изображающей точки в многомерном пространстве соответствовала переходному процессу установления режима. Возможно применение методи-

ки численного интегрирования уравнений динамики. В диссертации разработан метод, основанный на моделировании процесса утяжеления с помощью рекуррентных соотношений.

Расчет предела статической устойчивости предложенным методом выполняется при последовательном изменении внешних воздействий P_T, E и $\dot{S}_H$.

Небалансы мощностей, появляющиеся в результате утяжеления, вызывают относительные движения роторов, моделируемые рекуррентным соотношением

$$\Delta\delta^{(i+1)} = \xi\Delta\delta^{(i)} + \alpha\mathcal{E}P^{(i)}, \qquad (33)$$

где ξ и α - коэффициенты, определяемые в зависимости от T_j, P_∂ и Δt. Приращение $\Delta\delta^{(i+1)}$ вызывает изменение вектора э.д.с. $\dot{E}$, которое при $E = const$ отображается рекуррентным соотношением

$$\dot{E}^{(i+1)} = \dot{E}^{(i)} + j\dot{E}^{(i)}\Delta\delta^{(i+1)}. \qquad (34)$$

Поскольку нагрузки представлены статическими характеристиками, то напряжения $\dot{U}_H$ нагрузочных пунктов при определенных значениях $\dot{E}$ устанавливаются мгновенно. Пусть на очередном шаге небаланс мощности, потребляемой нагрузкой и получаемой от сети, составляет $\mathcal{E}\dot{S}_H$. Тогда условный регулятор, воздействуя на проводимость нагрузки, изменит $\dot{U}_H$ таким образом, чтобы уменьшить величину $\mathcal{E}\dot{S}_H$ на следующем шаге:

$$\dot{U}_H^{(i+1)} = \dot{U}_H^{(i)} + \frac{\mathcal{E}\dot{S}_H^{(i)}}{\dot{y}_H \hat{U}_{H0}} \qquad (35)$$

где $\dot{y}_H$ - собственная проводимость нагрузочного пункта. Выражение (35) получено из уравнения узловых потенциалов при условии постоянства напряжений в примыкающих пунктах.

Расчет напряжений на каждом шаге переходного процесса производится за одну итерацию. Происходит как бы наложение переходного процесса в генераторах и итерационного процесса расчета $\dot{U}_н$, что равносильно воздействию на систему постоянно изменяющихся и убывающих по амплитуде внешних возмущений, вызванных небалансами мощностей из-за неточности определения $\dot{U}_н$. Поскольку устойчивость в малом не зависит от формы прикладываемых возмущений, то условия статической устойчивости реальной системы и ее модели при достаточно малом Δt практически совпадают.

Благодаря влиянию $P_д$ происходит затухание переходного процесса, и в системе устанавливается новый режим. После этого внешние воздействия снова изменяются в том же направлении. Предел устойчивости определяется по неограниченному увеличению углов δ.

Разработана экспериментальная программа анализа статической устойчивости сложных электрических систем с предельным объемом 128 пунктов, 128 генераторов и 192 участка. Утяжеление исходного режима предусмотрено путем общего увеличения нагрузки системы, перераспределения мощности или снижения уровней напряжений в заданных пунктах. Результаты проведенных расчетов подтвердили известный вывод о том, что предел апериодической устойчивости системы, имеющей шины бесконечной мощности, не зависит от постоянных инерции и демпферных моментов, а устойчивость системы, склонной к самораскачиванию, зависит от динамических свойств отдельных генераторов.

Программа может быть использована также для обычных рас-

четов установившегося режима, если задавать большие значения $P_д$, обеспечивающие быструю сходимость процесса.

ГЛАВА У. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

Анализ установившихся режимов составляет основную часть расчетов электрических систем. В качестве независимых переменных обычно задают либо активные и реактивные мощности P_s, Q_s всех пунктов сети, либо P_s, U_s генерирующих и P_s, Q_s нагрузочных пунктов. При этом установившийся режим описывается системой нелинейных алгебраических уравнений, которая в принципе может иметь множество решений, удовлетворяющих законам Ома и Кирхгофа.

Несмотря на ряд полученных важных результатов (Л.В.Цукерник, Х.Ф.Фазылов, В.И.Идельчик и др.), проблема неоднозначности требует дальнейших исследований. Необходимо выяснить, сколько решений может иметь конкретная система при заданных независимых переменных, как получить все неоднозначные решения, допустимые по уровням напряжений, как организовать итерационный процесс, приводящий к реально наблюдаемому решению, какими свойствами обладают неоднозначные режимы и при каких условиях возможно их длительное существование и др.

Итерационный процесс расчета режима может рассматриваться как некоторая гипотетическая система автоматического регулирования с электрической сетью в качестве объекта регулирования и совокупностью регуляторов, воздействующих на пункты сети. Коэффициенты усиления регуляторов могут быть как постоянными, так и переменными. При постоянных коэффициентах усиления начальные приближения должны выбираться с учетом принятых значений коэффициентов, что представляет сложную задачу. При переменных коэффициентах, получаемых в зависимости от положения изображающей точки в пространстве характеристик, сходимость итераций к тому или иному решению обеспечивается практически с любых начальных приближений.

Разработаны соответствующие модификации алгоритмов и программ. Как показали расчеты, система нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима может иметь множество реальных решений с допустимыми уровнями напряжений. В частности, в разомкнутой схеме, предложенной Х.Ф.Фазыловым, при заданных P и Q получено 7 таких решений. Аналогичные расчеты сети Молдавэнерго также показали существование значительного количества допустимых неоднозначных режимов. Некоторые неоднозначные режимы могут быть найдены с помощью обычных итерационных алгоритмов, если для генерирующих пунктов задать модули напряжений, соответствующие этим неоднозначным режимам. Однако, удалось получить неоднозначные решения с одинаковыми модулями напряжений во всех пунктах, Следовательно, фиксация модулей напряжений не может избавить от неоднозначности. При задании P и Q во всех пунктах сети обычные алгоритмы приводят к решению с наименьшими суммарными потерями активной мощности, а не к решению с наибольшими уровнями напряжений, как предполагалось ранее.

В ряде известных алгоритмов итерационный процесс расчета режима при заданных P, Q или статических характеристиках подразделяется для улучшения сходимости на внутренний (ВНУП) и

внешний (ВНЕП). Если обеспечена устойчивость ВНУПа, то его функцию при любом методе расчета можно предоставить известным выражением

$$\dot{U} = \dot{U}_{on} + \dot{Y}^{-1}\dot{J} \quad . \qquad (36)$$

На ВНЕПе производится уточнение токов пунктов в соответствии с полученными значениями напряжений. Если отклонения переменных достаточно малы, то нелинейный ВНЕП можно линеаризировать так

$$\dot{J}^{(i+1)} = \dot{J}_{\infty} + \left(\frac{\partial \dot{J}}{\partial \dot{U}}\right)_{\infty} \mathcal{E}\dot{U}^{(i)} . \qquad (37)$$

На основании (36) и (37) в работе построена линеаризированная причинная сеть, преобразование информации в которой описывается рекуррентным соотношением

$$\dot{U}^{(i+1)} = \dot{U}_{\infty} + B\mathcal{E}\dot{U}^{(i)} , \qquad (38)$$

где B - матрица внешнего итерационного процесса

$$B = \dot{Y}^{-1}\left(\frac{\partial \dot{J}}{\partial \dot{U}}\right)_{\infty} . \qquad (39)$$

Итерационный процесс (38) сходится тогда и только тогда, когда все собственные числа матрицы B по модулю меньше единицы.

Если учесть демпфирование вычислительного процесса, то функция ВНЕП может быть представлена выражением

$$\dot{J}^{(i+1)} = \xi\dot{J}_{\infty} + (1-\xi)\dot{J}^{(i)} + \xi\left(\frac{\partial \dot{J}}{\partial \dot{U}}\right)_{\infty} \mathcal{E}\dot{U}^{(i)} \qquad (40)$$

Преобразование информации в причинной сети, построенной с учетом (36) и (40), описывается соотношением

$$\dot{U}^{(i+1)} = \dot{U}_{\infty} + A^{(i+1)}\mathcal{E}\dot{U}_{o} \quad , \qquad (41)$$

где $A^{(i+1)}$ – матричный степенной ряд

$$A^{(i+1)}=\sum_{j=1}^{i+1}(-1)^{j-1}\alpha_j(\xi)B^j \quad . \tag{42}$$

Таким образом, сходимость ВНЕПа с учетом демпфирования определяется свойствами $A^{(i+1)}$. Как указывалось, матричный степенной ряд (42) сходится, если собственные числа матрицы расположены внутри области сходимости соответствующего числового ряда. Экспериментальными расчетами установлено, что область сходимости такого ряда представляет собой круг радиуса

$$R=\frac{1}{\xi} \quad . \tag{43}$$

При ξ=I область сходимости ограничена окружностью радиуса I, при ξ=0 представляет собой часть комплексной плоскости, расположенную справа от прямой $x'=-1$, при $\xi=\infty$ превращается в точку с координатами $x'=-1$, $x''=0$. Очевидно, если собственные числа матрицы B расположены справа от прямой $x'=-1$, то выбором соответствующего коэффициента демпфирования всегда можно обеспечить сходимость итерационного процесса. В противном случае сходимость не может быть обеспечена при любом ξ.

Для решения вопроса о возможности длительного существования неоднозначных режимов выполнен ряд исследований с помощью программы анализа статической устойчивости, рассмотренной в главе IУ. В результате оказалось, что при неизменности активных и реактивных мощностей нагрузок, а также активных мощностей и модулей напряжений генераторов часть неоднозначных режимов является статически устойчивой. Остальные неоднозначные режимы "сползают" к устойчивым; получены соответствующие кривые переходных процессов. Устойчивые неоднозначные режимы характеризуются различными запасами устойчивости, отклонениями модулей напряжений от номинального значения, суммарными потерями мощности и др. Реально существующий режим может быть получен путем кибернетического моделирования переходного процесса при условии, что напряжения на зажимах генераторов в процессе моделирования изменяются в соответствии с работой реальных регуляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненных в диссертации исследований сводятся к следующему.

I. Разработана общая методика кибернетического моделирования процессов в электрических системах. Рассмотрены примеры моделирования переходного процесса в RLC-схеме и установившегося режима электрической сети.

2. Построена причинная сеть электромагнитного и электромеханического переходных процессов в генераторе с АРВ. Получены рекуррентные соотношения на основании системы уравнений Парка-Горева.

3. Разработана причинная сеть и методика моделирования переходных процессов в сложных электрических системах с уче-

том изменения частоты. Составлена причинная сеть и получены рекуррентные соотношения узла нагрузки. Разработана методика преобразования информации в сети с учетом ее динамики.

4. Разработана методика анализа статической устойчивости системы при $E = const$ и представлении нагрузок статическими характеристиками с использованием рекуррентных соотношений.

5. Разработан алгоритм итерационного расчета неоднозначных режимов. Исследованы условия сходимости итераций к неоднозначным решениям. Выполнены расчеты по нахождению неоднозначных режимов, анализу их устойчивости и др. Даны рекомендации для получения на ЭЦВМ режима, наблюдаемого в натуре.

6. Основной объем исследований и разработок выполнен на ЭЦВМ М-220. Программная реализация осуществлялась с помощью системы автоматизации программирования САПРЭС.

7. Практическая часть диссертации составляет разработку шести экспериментальных и двух промышленных программ. Некоторые идеи кибернетического моделирования были реализованы в программах оптимизации сетевых моделей ремонта энергооборудования, эксплуатировавшихся в РЭУ "Донбассэнерго". Результаты исследований частично использованы при разработке информационно-вычислительной системы анализа установившихся и переходных режимов, компоненты которой проходят в настоящее время опытно-промышленную эксплуатацию. Основные алгоритмы и

экспериментальные программы приняты Киевским ОКП Энергосетьпроекта для использования при разработке математического обеспечения ОАСУ "Энергия".

По теме диссертации опубликованы следующие материалы.

I. Мельник В.П. Применение ЦВМ для расчетов сетевых моделей с оптимизацией ресурсов при капитальных ремонтах энергетического оборудований. В сб.: "Применение ЦВМ в энергосистемах", Киев, "Техника", 1969.

2. Мельник В.П. Расчет автоматической частотной разгрузки системы на ЦВМ "Урал-2", там же.

3. Холмский В.Г., Щербина Ю.В., Мельник В.П. Кибернетическое моделирование установившихся и переходных режимов работы электрических систем. В сб.: "Применение вычислительной техники в электроэнергетике", М., МДНТП, 1970.

4. Щербина Ю.В., Банин Д.Б., Мельник В.П. Система автоматизации программирования расчетов электрических сетей (САПРЭС) в варианте для ЭЦВМ М-220. В сб.: "Применение ЭВМ М-220 для решения задач оперативного и перспективного планирования режимов энергосистем", Рига, 1970.

5. Холмский В.Г., Щербина Ю.В., Мельник В.П. Неоднозначность итерационных расчетов режимов электрических сетей. "Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах Украинской ССР, Электротехника", вып. IУ, 1972.

6. Мельник В.П. Некоторые результаты применения метода кибернетического моделирования для анализа установившихся и переходных режимов электрических систем. В сб.: "Основные направления и технические решения по созданию автоматизированной системы управления энергетикой и применение вычислительной техники", часть П, Киев, 1972.

7. Холмский В.Г., Щербина Ю.В., Мельник В.П. Алгоритм и программа итерационного расчета неоднозначных режимов. "Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах Украинской ССР, Электротехника", вып. У, 1973.

Материалы диссертации докладывались на Всесоюзной конференции по применению вычислительной техники в электроэнергетике (г.Москва, 1970 г.), на Всесоюзном совещании по применению ЭВМ М-220 для решения задач оперативного и перспективного планирования режимов энергосистем (г.Рига, 1970 г.), на Республиканском совещании по основным направлениям и техническим решениям по созданию автоматизированной системы управления энергетикой и применению вычислительной техники (г.Киев, 1972 г.), на семинаре по гибридным вычислительным машинам и комплексам (г.Киев, 1971 г.), на семинаре научного Совета АН УССР по проблеме "Теоретическая электротехника и электроника" (г.Киев, 1972 г.) и др.