

А. А. СМАЛЬКО

**Моделирование статических  
характеристик энергетических  
установок на ЭВМ**

Дереуэт 19. *СЗ*

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

А. А. СМАЛЬКО

Моделирование статических  
характеристик энергетических  
установок на ЭВМ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

✓ 0.0. 1696



ОНАХТ 12.06.12  
Моделирование статич

Одесса — 1969



Работа выполнена в Проблемной лаборатории кафедры инженерной теплофизики Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Саркисов А. А.**,  
кандидат технических наук, доцент **Миронов И. С.**

Ведущая организация — Свердловский турбомоторный завод.

Автореферат разослан „23“ август 1969 г.

Защита диссертации состоится „23“ июль 1969 г. на заседании Ученого совета Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова.

Просим Ваши отзывы в двух экземплярах присылать по адресу: г. Одесса-39, ул. Свердлова, 112, Технологический институт.

Ученый секретарь Совета **Л. А. Запорожец.**

Важным разделом теории энергетических установок (ЭУ) является анализ статических характеристик, задача которого изучать новые равновесные состояния ЭУ, когда существующее в ней в данный момент равновесие, вследствие какой бы то ни было причины, нарушается. Траектория равновесных состояний составляет так называемую статическую характеристику энергетической установки. Изучение этих характеристик ЭУ необходимо прежде всего для того, чтобы знать показатели работы установки на режимах, отличных от расчетного, и убедиться в том, что ЭУ может надежно и экономично работать во всем диапазоне изменения нагрузки от холостого хода до полной мощности, кроме того, статические характеристики являются исходной информацией проектирования системы управления энергетической установкой.

Рабочий процесс энергетической установки — это совокупность ряда тесно связанных между собой сложных процессов, которые в большей либо меньшей степени изучены и найдено их математическое описание. Уравнения процессов установки достаточно сложны и некоторые из них заданы графически, поэтому совместное решение этих уравнений и получение явной зависимости между различными параметрами затруднительно. Широко распространенные в настоящее время методы решения подобных задач характерны производством последовательных приближений, прежде чем будет достигнут желаемый результат, и индивидуальным характером алгоритма решения задач для различных схем энергетических установок. По сути дела, приходится рассчитывать ряд вариантов ЭУ, отличающихся степенью сжатия, расходом, температурой рабочего вещества и т. д. При этом количество возможных сочетаний исходных параметров ЭУ настолько велико, что даже при наличии заранее подготовленных расчетов проанализировать их и выбрать определенное решение весьма сложно. Вместе с тем, расширение круга задач, которые ставятся перед исследователем ЭУ, усложнение схем и изучение схем с различными рабочими веществами, создает необходимость разработки общей и удобной для практического использования методики построения статиче-

ских характеристик энергетических установок. Развитие этих работ в прошлом в значительной мере сдерживалось громоздкостью решения задачи и лишь появление современных вычислительных машин устранило это ограничение.

Цель настоящей работы — синтез на базе универсальной электронно-вычислительной машины системы автоматического определения статических характеристик класса ЭУ, состоящих из элементов типа теплообменник, турбина и компрессор (или насос). Функция такой системы состоит в генерировании на выходе соответствующей информации о статических характеристиках ЭУ при подаче на вход информации о состоянии и структуре исследуемой установки. Кроме того, к системе предъявляются требования полной автоматизации процесса преобразования исходной информации; инвариантности структуры системы относительно структуры исследуемых объектов; минимума времени подготовки исходной информации и времени ее преобразования и максимума пропускной способности. Наличие системы, обладающей подобными свойствами, приводит к тому, что основная задача исследователя в процессе расчета статических характеристик ЭУ сводится лишь к подготовке информации об исходном состоянии установки; все остальные операции выполняются машиной автоматически.

Рассмотрим произвольную систему определения статических характеристик и выделим ее элементы; она представляет собой информационную цепь с обратной связью. Основные элементы цепи — математическое моделирование, алгоритмизация, программирование, подготовка исходных данных, электронное моделирование. Изучив свойства элементов цепи, убеждаемся, что каждый из них может находиться в одном из возможных (свойственных ему) состояний, которые мы называем методами или способами. При одной и той же форме информации на входе в данный элемент форма информации на выходе из него может быть различной и определяется состоянием элемента. Таким образом, задача построения системы автоматического определения статических характеристик сводится к задаче синтеза структуры этой информационной цепи, удовлетворяющей условиям, предъявленным выше в системе. Метод синтеза цепи сводится к многократному последовательному переходу от изучения теории ее элементов к созданию машинных программ, моделирующих процессы в элементах и от изучения этих программ снова к теории. В конечном счете, ЭВМ превращается в систему, моделирующую статические характеристики энергетических установок, поэтому, по аналогии с математической моделью, эту систему можно называть электронной моделью статики ЭУ.

Главы 1—3 настоящей работы посвящены анализу особенностей и некоторых свойств этой модели. В заключении (глава 4) приведен пример моделирования статических характеристик углекислотной энергетической установки.

## Глава I. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТАТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

§ 1. Математический аппарат исследования. § 2. Математическое моделирование статики ЭУ. § 3. Математическая модель теплообменника. § 4. Математическая модель турбины. § 5. Математическая модель компрессора.

С математической точки зрения задача анализа статических характеристик ЭУ состоит в изучении свойств поверхности

$$F(X, Y) = 0, \quad (1)$$

где  $X$  и  $Y$  соответственно, вектор внешних воздействий на ЭУ и вектор ее реакций на эти воздействия.

К внешним воздействиям энергетических установок (входные величины установок) относятся:

- термические воздействия горячих источников тепла;
- термические воздействия холодных источников тепла;
- геометрические воздействия;
- воздействие на массу рабочего вещества;
- механические воздействия.

В качестве выходной величины (реакции) энергетической установки целесообразно рассматривать не только координату ее состояния  $Y$ , но и некоторые другие величины, однозначно определяющиеся этой координатой. К числу таких величин относятся полезная мощность установки —  $N_n$ , коэффициент полезного действия —  $\eta$ , надежность работы установки —  $\varphi$  и др. Необходимость рассмотрения этих величин обусловлена тем, что задача управления ЭУ сводится не столько к тому, чтобы привести ЭУ в определенное состояние, сколько к достижению определенных значений  $N_n$ ,  $\eta$ ,  $\varphi$  и т. д.

В уравнении (1) — математической модели статики ЭУ — содержится информация о статических характеристиках ЭУ, однако, извлечение этой информации — достаточно сложная математическая задача; она связана с проблемой решения системы нелинейных алгебраических уравнений. Поэтому назначение первого (по потоку информации) элемента, синтезируемой системы состоит в том, чтобы информацию, содержащуюся в теории элементов энергетических установок, и информацию о структуре исследуемого объекта и его со-

стояний с помощью метода линеаризации преобразовать в линейную математическую модель статики вида

$$AX + BY = 0, \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$ , соответственно, матрицы внешних воздействий и реакций ЭУ.

Процесс применения общего правила линеаризации, приведенного в работах [1–5], к конкретным случаям достаточно трудоемкий; вследствие этого, при выполнении данной работы выведен ряд формул для быстрой (непосредственной) линеаризации выражений стандартного типа, часто встречающихся в практике. Совокупность этих формул представляет собой математический аппарат метода линеаризации.

Для определения конкретного вида уравнения (2) в работе приводится анализ внешних воздействий и реакций элементов ЭУ и строятся их линейные модели [16].

В математической модели теплообменника представлены уравнения:

теплового баланса

$$G_{xy}(i_x - i_y) = G_{uz}(i_u - i_z); \quad (3)$$

коэффициентов теплоотдачи

$$d_{xy} \sim \beta_{xy} G_{xy}^m, \quad (4)$$

$$d_{uz} \sim \beta_{uz} G_{uz}^m, \quad (5)$$

где  $\beta$  — комплекс теплофизических свойств потока вещества

$$\beta = f(c_p, \lambda, \mu) = f_1(t_{cp}, P_{cp});$$

коэффициента теплопередачи

$$k \sim \frac{d_{xy} d_{uz}}{d_{xy} + d_{uz}}; \quad (6)$$

среднего температурного напора процесса теплообмена

$$\Delta t = \begin{cases} \frac{\Delta t_6 - \Delta t_\mu}{\ln \Delta t_6 / \Delta t_\mu} & \text{при } \frac{\Delta t_6}{\Delta t_\mu} > 1,75 \\ 0,5 (\Delta t_6 + \Delta t_\mu); & \end{cases} \quad (7)$$

теплопередачи

$$k \Delta t \sim G_{xy}(i_x - i_y) \quad (8)$$

и гидравлических потерь

$$\Delta p = \Delta p_\mu + \Delta p_\tau, \quad (9)$$

где

$$\Delta p_\mu \sim G^{2\sigma_{cp}}, \quad \Delta p_\tau \sim G^{1,75\sigma_{cp}}.$$

В математической модели турбины представлены уравнения:

работы адиабатического процесса сжатия

$$h_{ад} = i_x - i_s, \quad (10)$$

температуры конца адиабатического процесса расширения

$$s_x - s_s = 0 \quad (s - \text{энтропия}), \quad (11)$$

температуры конца действительного процесса расширения

$$i_y - i_x + h_{ад} \cdot \eta_\tau = 0, \quad (12)$$

экономической характеристики турбины

$$\bar{\eta}_\tau = f(\bar{v}_\tau), \quad (13)$$

где

$$\bar{v}_\tau = \bar{n}_\tau \bar{h}_{ад}^{-0,5},$$

и расхода вещества через турбину (уравнение Флюгеля)

$$\bar{G}_\tau = \bar{P}_x \bar{T}_x^{-0,5} \bar{\sigma}_x^a \cdot \left( a = \frac{1}{\sigma^2 + 1} \right). \quad (14)$$

В математической модели компрессора представлены уравнения:

работы адиабатического процесса сжатия

$$h_{ад} = i_s - i_x; \quad (15)$$

температуры конца адиабатического процесса сжатия

$$s_s - s_x = 0; \quad (16)$$

температуры конца действительного процесса сжатия

$$i_y - i_x - h_{ад} \cdot \eta_\kappa^{-1} = 0; \quad (17)$$

числа оборотов компрессора

$$\bar{\psi} = f(\bar{\varphi}), \quad (18)$$

где

$$\bar{\psi} = \frac{\bar{h}_{ад}}{n_2}, \quad \bar{\varphi} = \frac{\bar{Q}_\kappa}{n};$$

экономической характеристики компрессора

$$\bar{\eta}_k = f(\bar{\psi}) \quad (19)$$

и расхода вещества через компрессор

$$\begin{cases} N_k = N_r & i=1, \\ n_{ki} = n_{ki+1} & i>1, \end{cases} \quad (20)$$

где  $i$  — количество компрессоров, расположенных на одном валу.

Несмотря на наличие различных аналитических методов определения характеристик турбомашин, задача определения экономических характеристик (13), (19) и характеристики (18) остается во многих частях нерешенной. Поэтому при выполнении данной работы предполагается, что относительное изменение характеристик турбомашин эквивалентно изменению соответствующих характеристик «средней ступени». Это позволяет использовать данные, полученные экспериментально для лопаток и ступеней турбомашин различной геометрии. Эти данные систематизированы в работе; в координатах  $v_r - \eta_r$  и  $\varphi - \psi$ , характеристики различных ступеней турбомашин «стремятся» к определенным линиям, как к своим пределам.

При наличии моделей элементов ЭУ, работа по созданию ее математической модели носит формальный характер. Получают модели конкретных элементов установки, приписывая параметрам с индексами  $x, y, z, \dots$  цифровые обозначения, принятые в схеме, затем строят матрицу модели ЭУ, дополняя ее строками условий совместной работы элементов в составе схемы.

## Глава II. ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ СТАТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

§ 1. Обобщенный алгоритм электронной модели. § 2. Алгоритм модели ЭМ-4М. § 3. Алгоритм модели ЭМ-4. § 4. Программирование статики ЭУ.

Приведенный в главе I способ формализации процессов ЭУ предполагает следующий алгоритм решения задачи:

- задание исходного состояния установки (вектора параметров номинального режима ее работы);
- задание типа внешнего воздействия на установку;
- расчет коэффициентов моделей элементов ЭУ;

формирование матрицы реакций и внешних воздействий модели установки;

определение корней (решения), полученной системы линейных уравнений;

вычисление параметров нового состояния установки;

проверка условия окончания расчета (признак окончания — достижение некоторым характерным параметром установки определенного значения), если условие окончания не выполнено, то операции алгоритма повторяются, начиная с расчета коэффициентов моделей элементов.

Важное свойство алгоритма — циклический характер выполняемых операций; на каждом исследуемом цикле (шаге расчета) используется вектор состояния установки, полученный на предыдущем цикле.

Характерное свойство математической модели ЭУ состоит в том, что в ее состав входят несколько однотипных моделей элементов установок, коэффициенты которых вычисляются по одним и тем же формулам; переменным является лишь вектор исходных данных, характеризующий конкретный элемент данного типа. Это ведет к тому, что одна и та же последовательность вычислений должна много раз повторяться в разных местах алгоритма. Поэтому для его упрощения вводятся специальные операции, которые выполняют расчет коэффициентов математических моделей теплообменника, турбины и компрессора. Алгоритм характеризуется также многочисленными пересылками кодов из одних ячеек памяти в другие, поэтому для его изображения вводятся дополнительные операторы, осуществляющие пересылку содержимого ячеек памяти с различными номерами в подрядстоящие ячейки, из подрядстоящих ячеек памяти в ячейки с разными номерами и из различных ячеек в различные.

Анализируются блок-схемы алгоритмов модели ЭМ-4М, предназначенной для моделирования статических характеристик элементов ЭУ или простейших схем ЭУ (максимальная размерность матрицы модели  $n=15_{10}$ , модель использует при работе лишь оперативную память машины) и модели ЭМ-4, способной решить задачу практически неограниченной сложности, так как в процессе работы она использует внешнюю память машины.

В основу программирования алгоритмов положен метод подпрограмм; при этом для задания информации о том, какую операцию и над какими величинами нужно выполнить в данный момент, строятся псевдокоманды. Для перевода псевдокоманд на язык машины подпрограммы дополняются интерпретирующей программой.

Условия синтеза электронной модели однозначно определили матричную форму задания функций, описывающих

свойства рабочего вещества установки и ее машин. Поэтому в основе подпрограммы, выполняющей соответствующие расчеты, лежит известный алгоритм поиска значений функции, заданной в виде таблицы; подпрограмма дополнена операциями вычисления безразмерных производных этой функции. Специфика подпрограммы состоит в том, что ее основные операции выполняются для некоторого множества функций, обладающих различной размерностью матриц, а в пределах каждой матрицы, различными значениями аргументов. Так как при расчетах на ЭВМ возникают серьезные трудности использования функций, заданных в виде таблиц, в связи с их большой размерностью, то в работе выполнено исследование, посвященное вопросу уменьшения размерности таблиц (уменьшение избыточности информации исходных таблиц). Полученный в результате исследования алгоритм реализован на ЭВМ «Раздан-2» и прошел испытание, подтвердившее его эффективность, при уменьшении размерности таблиц термодинамических свойств углекислого газа.

Для выполнения операции решения систем линейных алгебраических уравнений, в связи со спецификой формирования математической модели ЭУ, построена подпрограмма в основе которой лежит алгоритм Гаусса. Особенность подпрограммы в том, что она оперирует с матрицей системы уравнений, записанной в виде подсистем (моделей элементов ЭУ) на зонах внешней памяти. На количество таких подсистем подпрограмма ограничений не накладывает.

В работе освещаются особенности процесса подготовки исходных данных для моделирования статики энергетических установок и основные свойства электронной модели ЭМ-4 [15]. Отмечается, что точность результатов моделирования соответствует точности исходной информации.

Модель ЭМ-4 (ЭВМ «Раздан-2») находится в эксплуатации; практическая работа с ней показала удобство использования и достаточную эффективность при решении ряда задач для отдельных схем энергетических установок. Но основная задача анализа статических характеристик ЭУ заключается не столько в анализе характеристик отдельных схем, сколько в изучении механизма формирования этих характеристик, для достаточно мощного множества схем ЭУ. В то же время, подобный анализ на модели ЭМ-4 и на машинах с оперативной памятью 4000<sub>8</sub> ячеек требует значительных затрат времени. Это препятствие на пути анализа значительного множества схем ЭУ, без привлечения новых концепций о строении энергетических установок и о методе их исследования.

### Глава III. СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ СТАТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

§ 1. Исходные положения. § 2. Гипотезы структурной модели. § 3. Алгоритм электронной модели ЭМ-2. § 4. Вопросы оптимального управления энергетическими установками. § 5. Эволюция связей энергетической установки.

Дальнейшее исследование посвящено уменьшению сложности математического описания статики энергетических установок путем представления установки как системы иерархических связей и выяснения требований к точности воспроизведения статических характеристик. Применение новой концепции строения энергетических установок приводит не только к уменьшению размерности модели установки без существенной потери информации о ее статических характеристиках, но и к формулировке общего принципа моделирования статики ЭУ—для моделирования статики ЭУ необходимо и достаточно подвергнуть анализу систему уравнений сплошности течения рабочего вещества через турбомашины этой установки; в этих уравнениях содержится основная информация.

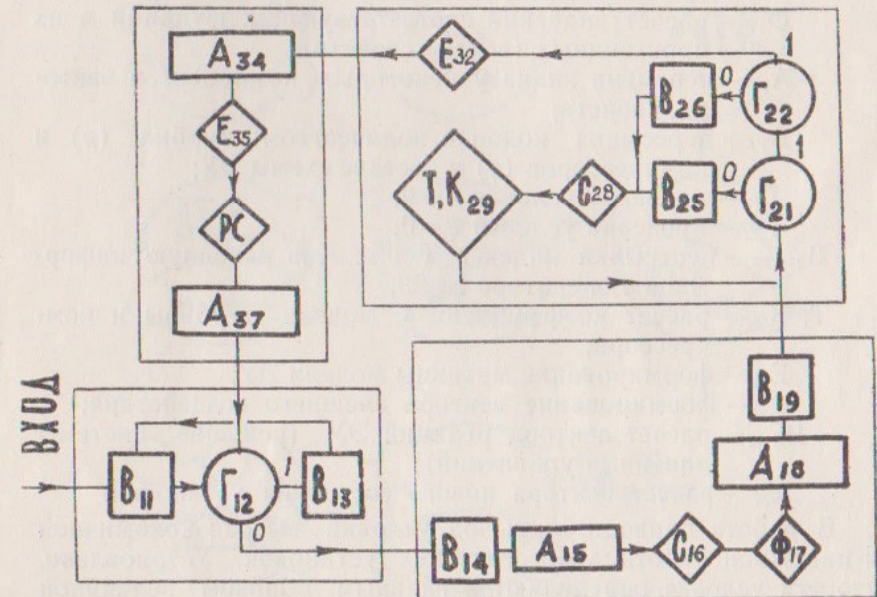


Рис. 1. Алгоритм модели ЭМ-2.

В результате исследования построена так называемая структурная модель статики ЭУ (ЭМ-2). Время ожидания

результатов на этой модели в сравнении с моделью ЭМ-4 значительно меньше. Возможности ЭМ-2 для машин с оперативной памятью в 4000<sub>8</sub> ячеек ограничены анализом схем с числом турбомашин, равным семи. В модели используются гипотезы идеальной регенерации тепла в установке и течения рабочего вещества без гидравлических потерь. Проведена оценка влияния этих гипотез на результаты моделирования.

Для изображения блок-схемы алгоритма модели ЭМ-2 введем в рассмотрение следующие операторы (рис. 1).

- $V_{11}$ — перепись вектора состояния установки на зону внешней памяти и пересылка числа шагов расчета до следующей печати результатов моделирования в ячейку  $m$ ;
- $\Gamma_{12}$ — проверка условия  $m=0$ ;
- $V_{13}$ — печать результатов моделирования;
- $V_{14}$ — запись из внешней памяти машины в оперативную память массива (таблиц) свойств рабочего вещества;
- $A_{15}$ — расчет некоторых аргументов, не вошедших в вектор состояния ЭУ;
- $C_{16}$ — формирование вектора аргументов функций, описывающих свойства рабочего вещества;
- $\Phi_{17}$ — расчет значений соответствующих функций и их производных (вектор свойств);
- $A_{18}$ — перемена знака у некоторых компонентов вектора, свойств;
- $V_{19}$ — пересылка кодов с количеством турбин ( $p$ ) и компрессоров ( $q$ ) в составе схемы ЭУ;
- $\Gamma_{21}$ — проверка условия  $p=0$ ;
- $\Gamma_{22}$ — проверка условия  $q=0$ ;
- $V_{25, 26}$ — пересылка индекса Т или К в исходную информацию оператора № 29;
- $T, K_{29}$ — расчет коэффициентов модели турбины и компрессора;
- $E_{32}$ — формирование матрицы модели ЭУ;
- $E_{35}$ — формирование вектора внешнего воздействия;
- $PC_{36}$ — расчет вектора реакций ЭУ (решение системы линейных уравнений);
- $A_{37}$ — расчет вектора нового состояния установки.

В работе приводится вывод условий высокоэкономичной и надежной работы энергетических установок. Установлено, что эти условия определяются главным образом величиной  $a = \frac{dP_n}{dT_n}$ , где  $T_n, P_n$  — температура и давление перед турбиной полезной мощности установки.

Исследование характеристик множества схем энергетиче-

ских установок даже с помощью модели ЭМ-2 связано со значительными трудностями, так как число элементов множества очень велико. Для выполнения этих исследований необходим алгоритм перехода от анализа одной схемы множества к другой заведомо лучшей в смысле определенной характеристики. Характерные черты этого алгоритма обнаружены при изучении вопросов эволюции связей энергетических установок.

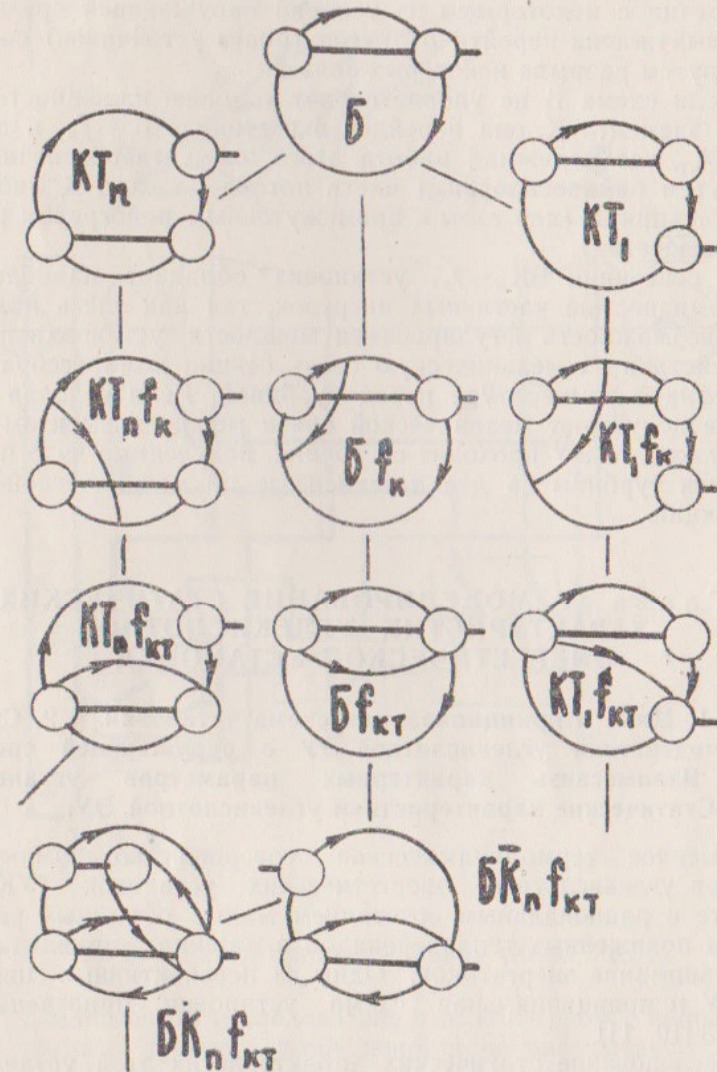


Рис. 2. Начальный этап процесса эволюции связей ЭУ.

Любой элемент множества схем ЭУ можно представить как некоторое устойчивое состояние процесса эволюции схемы-ядра энергетической установки. Схема-ядро ЭУ (на уровне двух типов связей) состоит из турбины и компрессора (рис. 2,Б). Эволюция связей этой схемы обусловлена изменением условий окружающей среды, то есть требований надежности, высокой экономичности работы элементов ЭУ, технологичности изготовления установки и т. д. Так как в общем случае характеристики этой схемы находятся в противоречии с некоторыми из условий окружающей среды, то она вынуждена перейти в другое (более устойчивое) состояние, путем разрыва некоторых связей.

Если схема Б не удовлетворяет условию надежности работы элемента К, она перейдет в состояние Б —  $f_k$  и далее Б —  $f_{кт}$ , где надежная работа этого элемента обеспечивается путем байпасирования части потока на вход К либо на вход секции Т (для схем с промежуточным подогревом рабочего вещества).

В состоянии БК<sub>п</sub> —  $f_{кт}$  установка обладает наибольшей экономичностью частичных нагрузок, так как здесь появляется возможность регулирования мощности установки путем воздействия на механическую связь секции компрессора при постоянной температуре перед турбиной. Если условия среды не допускают механической связи между элементом К и нагрузкой, то ЭУ проходит состояния, полученные из Б путем деления турбины на две независимые по механической связи секции.

#### Глава IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕКИСЛОТНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

- § 1. Цикл и принципиальная схема установки. § 2. Схема взаимодействий углекислотной ЭУ с окружающей средой.  
 § 3. Взаимосвязь характерных параметров установки.  
 § 4. Статические характеристики углекислотной ЭУ.

Высокое термодинамическое совершенство замкнутых циклов углекислотных энергетических установок (УКЭУ) вместе с рациональным сочетанием малых объемных расходов и пониженных теплоперепадов в машинах, привлекает к себе внимание энергетиков. Один из перспективных циклов УКЭУ и принципиальная схема установки приведены на рис. 3 [10, 11].

Исследование статических характеристик этой установки сопряжено со значительными трудностями, прежде всего потому, что отсутствует опыт анализа статики замкнутых схем

ЭУ с конденсацией рабочего вещества в цикле. Известна попытка применить к решению этой задачи модификацию метода последовательных приближений [12], но этот прием не мо-

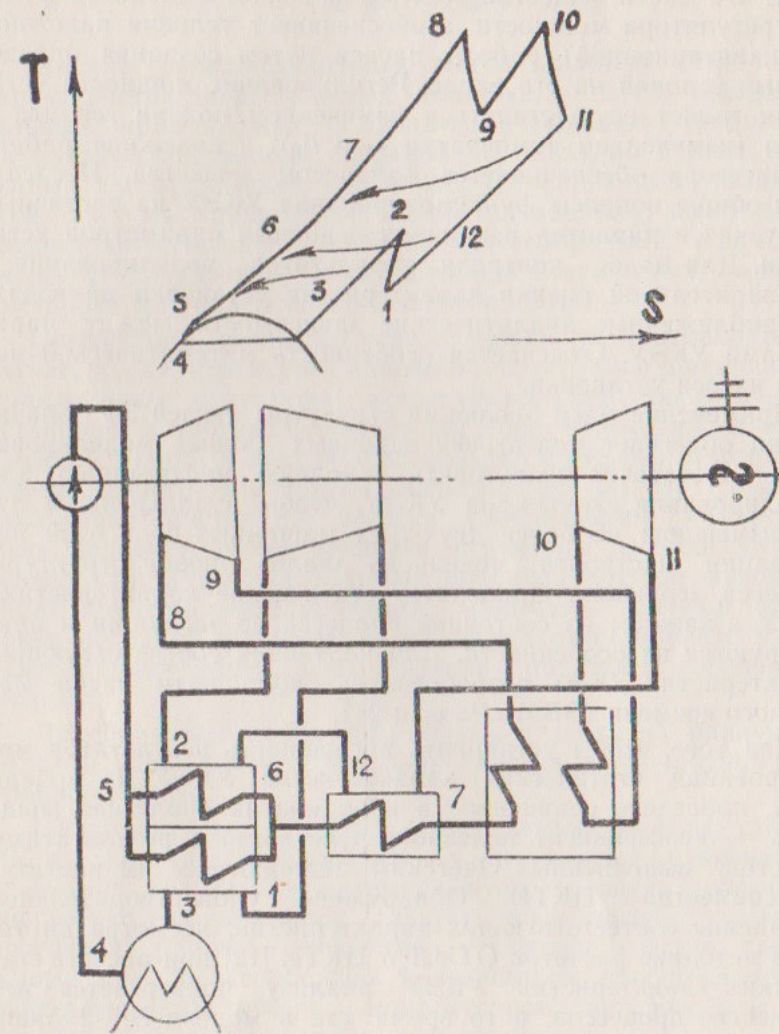


Рис. 3. Цикл и принципиальная схема УКЭУ.

жет удовлетворить исследователя так как требует напряженного труда в процессе вычислений и не раскрывает особенностей процесса управления этой установкой. Для решения этой задачи используем идею эволюции связей УКЭУ и электронную модель ЭМ-2.

В главе приводится схема внешних воздействий на УКЭУ и выделяются регулирующие параметры установки. Специфика УКЭУ (конденсация рабочего вещества) приводит к тому, что масса вещества в схеме не может выполнять функции регулятора мощности, а обеспечивает условия надежной (безкавитационной) работы насоса путем создания определенных условий на его входе. Регулирование мощности установки может осуществляться изменением подачи топлива в котел (изменением температур  $t_8$  и  $t_{10}$ ), а надежная работа компрессора обеспечивается байпасом вещества. Исследуются общие вопросы функционирования УКЭУ на частичных нагрузках и характер изменения основных параметров установки. Для целей контроля результатов моделирования и предварительной оценки характеристик установки приводятся приближенные аналитические зависимости между параметрами УКЭУ. Отмечается особенность математической модели насоса установки.

Применение идеи эволюции структуры связей ЭУ значительно облегчает подготовку исходных данных моделирования — достаточно подготовить исходную информацию для моделирования схемы-ядра УКЭУ, чтобы в дальнейшем путем изменения не более двух-трех машинных слов этой информации настроить модель на анализ любой структуры процесса эволюции. Приводятся статические характеристики УКЭУ в каждом из состояний процесса ее эволюции и анализируются их особенности. Для получения соответствующих характеристик УКЭУ потребовалось около пяти часов машинного времени (ЭВМ «Раздан-2»).

Для того, чтобы установить погрешность результатов моделирования статических характеристик УКЭУ на модели ЭМ-2, проведено сравнение (в координатах «полезная мощность — коэффициент полезного действия») с результатами расчетов, выполненных Одесским технологическим институтом совместно с ЦКТИ. Обнаружено удовлетворительное совпадение соответствующих характеристик, несмотря на то, что в методике расчетов ОТИЛ и ЦКТИ [12] при расчете статических характеристик УКЭУ анализу подвергается все множество процессов, в то время как в модели ЭМ-2 лишь ограниченное множество процессов.

Основная цель дальнейших исследований в области анализа статических характеристик энергетических установок состоит в построении электронной модели эволюции связей и связанных с ней характеристик широкого класса ЭУ. Предполагается построить модель, обладающую свойством генерировать информацию о структуре связей энергетической установки (или группы установок), наилучшим образом удовлетворяющей некоторым наперед заданным статическим

характеристикам. Последние подаются на вход модели и выполняют роль окружающей среды процесса эволюции.

## Выводы

Широко распространенный метод анализа статических характеристик энергетических установок — метод последовательных приближений — сводится к решению трудоемкой математической задачи, связанной с анализом систем нелинейных алгебраических уравнений. Линеаризация уравнений этой системы приводит к более наглядному, но столь же трудоемкому способу. Наиболее целесообразный способ решения этой задачи — моделирование статических характеристик ЭУ на универсальной цифровой ЭВМ.

Применение вычислительных машин эффективно в том случае, когда структура машинной программы инвариантна относительно структуры исследуемых схем энергетических установок; в противном случае мы лишь переходим от одной сложной задачи к другой (составление и отладка программ). Поэтому программа-модель (электронная модель) статических характеристик ЭУ должна удовлетворять компромиссным условиям инвариантности структуры модели относительно структуры исследуемых объектов, полной автоматизации процесса моделирования, минимума времени подготовки исходной информации об исследуемом объекте и времени моделирования, максимальной пропускной способности модели.

Линейная математическая модель статики ЭУ наилучшим образом удовлетворяет условиям синтеза инвариантной электронной модели.

Инвариантность структуры электронной модели статики ЭУ предполагает инвариантность структуры уравнений ее элементов. Поэтому в математических моделях элементов энергетических установок следует использовать уравнения состояния рабочего вещества установки в форме таблиц. Кроме того, целесообразно пользоваться обобщенными характеристиками турбин и компрессоров, допуская при этом некоторые потери информации об установке.

Применение линейной математической модели статики ЭУ приводит к циклическому алгоритму, допускающему простую интерпретацию на языке вычислительной машины. Электронная модель приобретает свойство инвариантности структуры, главным образом благодаря применению в алгоритме специальных операторов и метода подпрограмм в процессе программирования.

Целесообразно применение трех вариантов электронной

модели: ЭМ-4М, ЭМ-4 и ЭМ-2 в зависимости от сложности исследуемых объектов и целей исследования.

Правила подготовки исходных данных для моделирования статики настолько формальны, что могут выполняться исследователем, не знакомым с элементами программирования.

Для моделирования статики ЭУ необходимо и достаточно анализировать уравнения сплошности течения рабочего вещества через турбомашину. В этих уравнениях содержится существенная информация о характеристиках установки.

Моделирование статических характеристик сложных схем энергетических установок в большинстве случаев целесообразно производить на модели ЭМ-2. В этом случае время ожидания результатов минимально, а потери полезной информации незначительны.

При анализе статических характеристик множества схем ЭУ следует руководствоваться алгоритмом перехода от изучения одной схемы ЭУ к другой. Основные черты этого алгоритма проявляются при изучении эволюции связей схемы-ядра энергетической установки. Любая схема ЭУ может рассматриваться как некоторое устойчивое состояние процесса эволюции.

Построенные в работе электронные модели решают вопросы математического описания статики ЭУ, вопросы производства вычислений и времени ожидания результатов, поэтому они могут быть рекомендованы в качестве эффективного средства анализа статических характеристик отдельных схем энергетических установок и их множеств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кантор С. А. Применение линеаризованного анализа для расчета сложных газотурбинных установок. Труды ВНИТОСС, т. VI, 1955.
2. Котляр И. В. Переменный режим работы газотурбинных установок. Машгиз, 1961.
3. Котляр И. В. Частичные и переходные режимы работы судовых газотурбинных установок. Судостроение, 1966.
4. Черкез А. Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений. Машиностроение, 1965.
5. Консетов В. В. Применение метода линеаризованного анализа для ГТУ. «Энергомашиностроение», № 5, 1965.
6. Гутер Р. С. и др. Элементы теории функций. Физматгиз, 1963.

7. Газотурбинные установки морских судов, под ред. А. Г. Курзона. Транспорт, 1967.
8. Быков Г. А. «Теплоэнергетика», № 11, 1965.
9. Самойлович Г. С. и Трояновский Б. М. Переменный режим работы паровых турбин. ГЭИ, 1955.
10. Гохштейн Д. П. «Электрические станции», № 4, 1962.
11. Дехтярев В. Л. «Электрические станции», № 5, 1962.
12. Козорез А. И. «Известия ВУЗов, Энергетика», № 10, 1966.
13. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. «Наука», 1968.
14. Лернер А. Я. Начала кибернетики. «Наука», 1967.
15. Смалько А. А. «Теплоэнергетика», № 9, 1968.
16. Смалько А. А. «Теплоэнергетика», № 8, 1968.

#### По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Смалько А. А. К вопросу построения системы автоматического определения статических характеристик энергоустановок. «Теплоэнергетика», № 8, 1968.
2. Смалько А. А. Электронная модель статических характеристик энергетических установок. «Теплоэнергетика», № 9, 1968.
3. Смалько А. А. К вопросу определения статической устойчивости характеристик циклов энергетических установок. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции по термодинамике, Ленинград, 1968.
4. Смалько А. А. Анализ переменных режимов работы углекислотной установки, выполненной по простейшей схеме. Тезисы докладов XXVIII научной конференции ОТИЛ, Одесса, 1966.

Содержание работы докладывалось на семинаре по методам анализа энергетических установок. Новосибирск, 1966 г.