

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.586

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

И. Ю. Петрова, Ю. А. Лежнина, О. И. Евдошенко

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет

Используя энергоинформационные модели для описания цепей различной физической природы и аппарат параметрических структурных схем, можно все многообразие взаимосвязей между величинами и параметрами представить в виде сложного графа. В данной работе в этот граф введены элементы, отражающие динамические процессы в операторной форме (параметры и величины). С возникновением мощных вычислительных средств появилась возможность автоматизировать целенаправленный процесс синтеза структурных схем. В данной статье решается важная задача автоматизации исследования динамических характеристик как существующих, так и синтезированных параметрических структурных схем. Расчетная часть эффективно обеспечивает качественную и количественную оценку параметрических структурных схем.

Ключевые слова: энергоинформационный метод цепей, параметрические структурные схемы, динамические характеристики, новые технические решения.

AUTOMATE THE CALCULATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMPLEX PARAMETRIC STRUCTURAL SCHEMES

I. Yu. Petrova, Yu. A. Lezhnina, O. I. Evdoshenko

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering

Using the energy-information models to describe the chains of different physical nature and the apparatus of the parametric structural schemes, it is possible to present all the variety of relationships between the values and parameters in the form of a complex graph. In this paper, elements reflecting dynamic processes in the operator form (parameters and quantities) are introduced in such graph. With the advent of powerful computing tools, it became possible to automate the targeted process of synthesis of structural schemes. In this article the important task of automation of research of dynamic characteristics of both existing, and the synthesized parametric structural schemes is solved. The calculation part effectively provides qualitative and quantitative assessment of the parametric structural schemes.

Keywords: energy-information method of circuits, parametric block diagrams, dynamic characteristics, new technical solutions

В настоящее время существует ряд инструментальных средств, созданных для полной или частичной автоматизации труда разработчика технических устройств [1]. Лишь немногие из этих систем позволяют проводить синтез технических решений, каждая из таких систем имеет под собой оригинальную теоретическую базу. На данный момент можно выделить несколько различных подходов к представлению и использованию инженерных и физических знаний, необходимых для решения задач автоматизированного проектирования современных технических объектов.

Известны ряд подходов к автоматизации проектирования измерительных устройств, в частности датчиков измерения. При разработке новых технических решений инженер использует накопленный им объем практически полезных знаний в своей предметной области. Однако, число физических эффектов и явления, которые изучают инженеры при подготовке в ВУЗах и в дальнейшей практической деятельности, составляет 200–300 модулей информации, тогда как на сегодняшний день в мире известно более 3000 физических эффектов и явлений.

Широкое использование вычислительной техники и создание автоматизированных банков данных по физическим эффектам и явлениям позволит эффективно решать задачу информационного обеспечения инженеров-конструкторов новых технических решений.

Эффективность банков данных, используемых для автоматизации процесса получения новой техники, зависит от той концептуальной модели базы данных которая лежит в их основе. Задача концептуальной модели - описывать данные в целом и сделать это описание независимым от конкретных технических задач. Поэтому при разработке банков данных по ФТЭ целесообразно использовать теорию аналогии и подобия для выработки концептуальной модели, позволяющей описывать процессы и явления разной физической природы с помощью единого математического аппарата. В качестве такой концептуальной модели банков данных по ФТЭ целесообразно использовать энергоинформационные модели цепей различной физической природы [2–5].

Использование операторного метода расчета

позволяет исследовать динамические характеристики проектируемых элементов систем управления различной физической природы. Однако, при этом остается актуальной задача автоматизации расчета динамических характеристик элементов информационно-измерительных и управляющих систем.

Постановка задачи

Решение задачи поиска новых принципов действия элементов и устройств ИИИУС с учетом динамических характеристик сводится к поиску вариантов физического принципа действия (ФПД) элемента или устройства ИИИУС на основе структурно-параметрического синтеза по информации в БД физико-технических эффектов и выбор лучших вариантов по совокупности эксплуатационных характеристик. Необходимо разработать подпрограмму оценки динамических характеристик этого устройства.

Используя энерго-информационные модели для описания цепей различной физической природы и аппарат ПСС, можно все многообразие взаимосвязей между величинами и параметрами представить в виде сложного графа (рис.1). В этот граф введены элементы, отражающие динамические процессы в операторной форме (параметры и величины). Вершины графа – величины цепей различной физической природы, а ребра - параметры или эффекты. В общем случае можно считать, что все они пред-

ставлены своими изображениями в операторной форме. Связь между цепями разной физической природы осуществляется с помощью физико-технических эффектов, коэффициенты которых в упрощенном виде можно считать квазипостоянными.

С помощью графа возможно определить по заданным входной и выходной величинам элемента или устройства ИИИУС возможные варианты ФПД (т.е. пути по графу) и выбрать наиболее оптимальный из них по совокупности требований к эксплуатационным характеристикам и оценить динамические характеристики полученных ПСС.

Общие свойства поставленной задачи сводятся к следующим:

- конечное множество вариантов выбора - семейство ПСС, отражающих варианты ФПД датчика с заданными входом и выходом;
- каждому варианту ПСС сопоставляется совокупность количественных эксплуатационных характеристик (чувствительность, надежность, погрешность, диапазон изменения входных и выходных величин, степень нелинейности выходной характеристики, быстродействие и др.), рассчитываемых по значениям характеристик отдельных звеньев (ФТЭ или параметров);
- требуется выбрать вариант ФПД датчика по совокупности эксплуатационных характеристик удовлетворяющий некоторым заранее сформулированным требованиям.

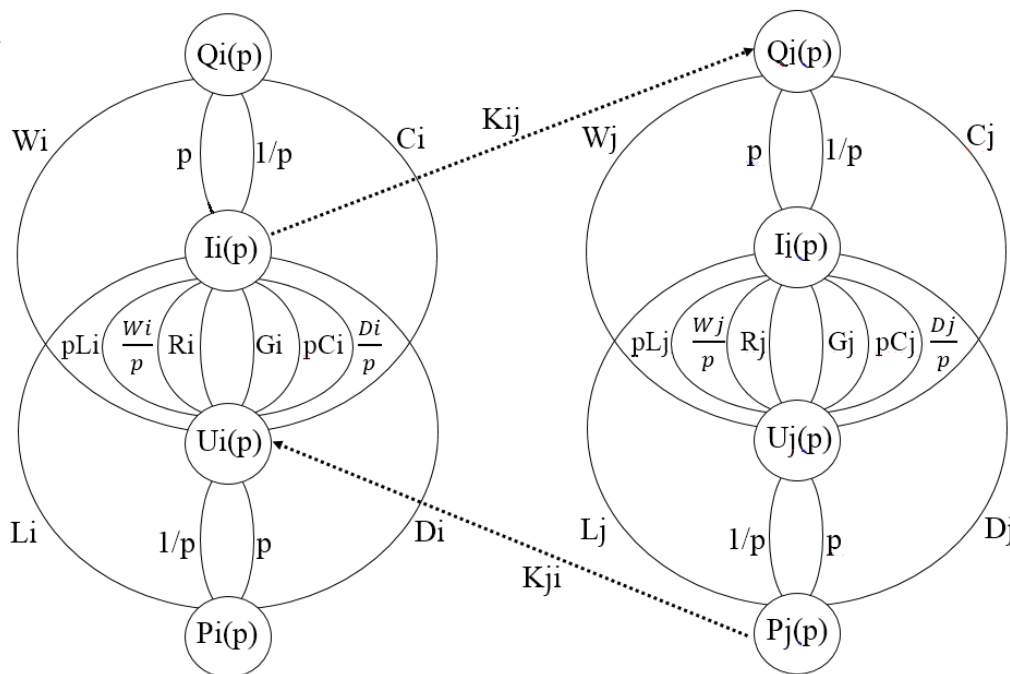


Рис.1. Граф взаимосвязей между величинами и параметрами в операторной форме для цепей разной физической природы (i-ой и j-ой природы)

Таким образом, поставленная задача сво-

дится к задаче полного перебора с использованием стратегии с возвращением. В результате

мы получаем цепочки последовательных преобразований, отражающие динамику происходящих процессов.

Метод решения

Для оценки динамических характеристик необходимо найти сначала аналитический вид передаточной функции по параметрической структурной схеме в операторной форме, а затем от изображения перейти к оригиналу функции и получить временную зависимость.

Поэтому был выбран метод, основанный на получении отображения по Лапласу искомой передаточной функции ПСС и перевода ее в область оригинала [6].

В общем случае каждый блок при соединении нескольких параметров (например, R, L(p) и C(p) описывается линейным дифференциальным уравнением вида

$$a_n y^n(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_0 = b_m x^m(t) + b_{m-1} x^{(m-1)}(t) + \dots + b_0 \quad (1)$$

где

- $x(t)$ – закон изменения входного сигнала;
- $y(t)$ – закон изменения выходного сигнала;
- a_n, b_m – числовые коэффициенты.

Параметрическая структурная схема представляет собой совокупность блоков, соединенных определенным образом (параллельно, последовательно и с обратной связью). Ее можно

описать системой дифференциальных уравнений, состоящей из уравнений блоков при заданной функции изменения во времени входной величины.

Рассмотрим в качестве примера структурную схему, представленную на рис. 2. Элементарные блоки описываются уравнениями типа (1), а вся структура описывается, в общем случае, системой дифференциальных уравнений (2).

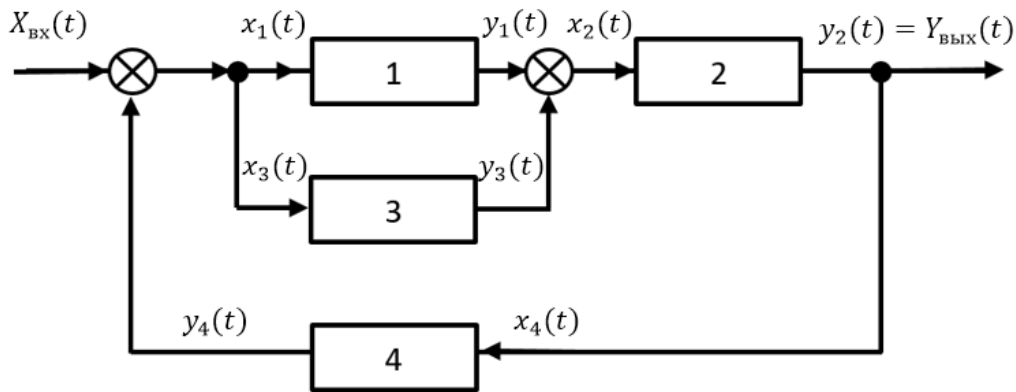


Рис.3.1. Пример сложной параметрической структурной схемы.

$$\left\{ \begin{aligned} a_{n1} y^{n1}(t) + a_{n1-1} y^{(n1-1)}(t) + \dots + a_{01} &= b_{m1} x^{m1}(t) + b_{m1-1} x^{(m1-1)}(t) + \dots + b_{01} \\ a_{n2} y^{n2}(t) + a_{n2-1} y^{(n2-1)}(t) + \dots + a_{02} &= b_{m2} x^{m2}(t) + b_{m2-1} x^{(m2-1)}(t) + \dots + b_{02} \\ a_{n3} y^{n3}(t) + a_{n3-1} y^{(n3-1)}(t) + \dots + a_{03} &= b_{m3} x^{m3}(t) + b_{m3-1} x^{(m3-1)}(t) + \dots + b_{03} \\ a_{n4} y^{n4}(t) + a_{n4-1} y^{(n4-1)}(t) + \dots + a_{04} &= b_{m4} x^{m4}(t) + b_{m4-1} x^{(m4-1)}(t) + \dots + b_{04} \end{aligned} \right.$$

$$x_1(t) = x_3(t) = X_{\text{вх}}(t) - y_4(t)$$

$$x_2(t) = y_1(t) + y_3(t) \quad (2.)$$

$$x_4(t) = y_2(t) = Y_{\text{вых}}(t)$$



Поиск решения полученной системы уравнений (2) сводится к определению аналитического представления функций $x_1(t), \dots, x_n(t), y_1(t), \dots, y_m(t)$ при заданной функции $X_{вх}(t)$.

Современная теория линейных систем рассматривает два основных метода решения этой проблемы. Для обоих используется теория опе-

рационного исчисления, т.е.: функции изменения во времени входных величин преобразуются по Лапласу в их отображения; функциональной характеристикой блока становится не дифференциальное уравнение типа (1), а соответствующая ему комплексная передаточная функция, которая выглядит в общем виде так, как показано в уравнении (3).

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0} \quad (3)$$

Методы заключаются в следующем:

1. Последовательное упрощение схемы путем замены последовательно, параллельно и с обратной связью соединенных звеньев одним звеном с передаточной функцией, выраженной через передаточные функции элементарных звеньев.

Этот метод был отклонен, так как он более пригоден для аналитического исследования схем, чем для автоматизированных расчетов, так как для его использования необходим большой объем знаний эксперта, занимающегося преобразованием структурных схем. Как показывает практика, при исследовании даже небольших (порядка 10 блоков), но достаточно сложных схем, даже знаний эксперта оказывается недостаточно, чтобы произвести необходимые преобразования.

2. Универсальный алгоритм нахождения передаточных функций по структурным схемам с использованием формулы Мейсона [7, 8]. Основная идея данного метода заключается в том, что система представляется в виде ориентированного графа, в котором дуги эквивалентны элементарным звеньям и характеризуются передаточной функцией этого звена (блока), а вершины - линиям передачи сигналов. Направление дуги соответствует направлению распространения сигнала. Контрольной точкой, в которой будет вычисляться искомая функция, может быть только вершина. Каждой вершине ставится в соответствие одна из величин параметрической структурной схемы (изображение переменной по Лапласу). Поскольку каждая вершина может быть инцидентна, как по входящим, так и исходящим дугам, то сигнал в вер-

шине представляет собой суперпозицию выходных сигналов блоков, соответствующих входящим в вершину дугам, т.е. если к вершине подходят несколько дуг, то соответствующая вершине переменная равна сумме выходных величин этих дуг (аналог суммирующего звена структурной схемы). Если из вершины выходит несколько дуг, то входные величины всех этих дуг одинаковы (аналог точки ветвления в структурных схемах). Входная величина представляется дугой, начальная вершина которой может быть только исходящей.

Ориентированный граф (орграф) можно построить по параметрической структурной схеме. При построении орграфа по структурной схеме необходимо придерживаться следующих правил:

1. Модифицируем структурную схему так, чтобы в звеньях суммирования все переменные складывались с положительным знаком, отрицательные знаки вносятся в передаточные функции соответствующих звеньев.

2. Каждое суммирующее звено структурной схемы заменяется вершиной, которой ставится в соответствие выходная переменная этого звена.

3. Каждое элементарное звено структурной схемы заменяется дугой с оператором, равным передаточной функции этого звена.

4. Каждой величине, включая и входную, соответствует своя вершина.

После того, как структурная схема преобразована в ориентированный граф, можно использовать формулу Мейсона (7) для нахождения изображения комплексной передаточной функции всей структурной схемы.

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{\Delta(p)} \sum_{i=1}^n W_{np i}(p) \Delta_i(p) \quad (7)$$

где $W(p)$ - передаточная функция для выходной величины по входному воздействию;

$W_{np i}(p)$ - передаточная функция i -го отдельного прямого пути от $X(p)$ к $Y(p)$, вычисляется как результат перемножения передаточных функций отдельных дуг, входящих в этот путь;

$\Delta(p)$ - определитель ориентированного графа, который определяется по формуле (8):

$$\Delta(p) = 1 - \sum_j W_j(p) + \sum_{jk} W_j(p) \cdot W_k(p) - \sum_{jkm} W_j(p) \cdot W_k(p) \cdot W_m(p) + \dots \quad (8)$$

Где $W_j(p)$ - передаточная функция j -го замкнутого контура, вычисленная как произведение передаточных функций дуг, входящих в этот контур;

$W_j(p) \cdot W_k(p)$ - перемножение передаточных функций пары (j -го и k -го) замкнутых контуров, которые не касаются ни дугами, ни вершинами, причем суммирование осуществляется по всем парам таких несовпадающих контуров;

$W_j(p) \cdot W_k(p) \cdot W_m(p)$ - умножение тройки (j -го, k -го и m -го) контуров, не касающихся друг

друга ни дугами, ни вершинами, причем, суммирование производится по всем тройкам таких контуров;

$\Delta_i(p)$ - определитель графа, полученного при удалении дуг и вершин i -го отдельного прямого пути, определяется по формуле.

В результате реализации алгоритма Мейсона получаем передаточную функцию всей системы:

Обратное преобразование Лапласа позволяет получить оригинал функции $f(t)$ по его изображению $F(p)$:

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\{F(p)\} = \frac{1}{2\pi i \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(p)e^{pt} dp} \quad (9)$$

Использование этого выражения весьма затруднительно, особенно, для сложных выражений $F(p)$. Поэтому были разработаны более приемлемые способы определения оригинала $f(t)$. Чтобы перейти от изображения $\mathcal{L}\{F(p)\}$ к оригиналу, нужно преобразовать его к рациональной дроби, разложить на простейшие дроби и, пользуясь табличными преобразованиями, представить сумму простейших дробей как сумму соответствующих им оригиналов.

В результате выполнения разработанных алгоритмов работы с ориентированным графом, можно комплексную передаточную функцию структурной схемы, определенную по формуле Мейсона выразить через передаточные функции элементарных звеньев. Однако для этого необходимо представить рациональную функцию в виде суммы элементарных дробей. Но для этого необходимо знать корни числителя и знаменателя т.е. нужно автоматизировать решение алгебраического уравнения с комплексными коэффициентами

$$P_n(p) = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 + \dots + a_n p^n = 0 \quad (a_n \neq 0)$$

Задача отыскания корней уравнения эквивалентна задаче отыскания всех локальных минимумов специальной функции.

При всем многообразии и вариативности численной реализации алгоритмов для организации их поиска был выбран один из методов сопряженных градиентов, а именно итерационный метод безусловной оптимизации Флетчера-Ривса [9]. Этот метод позволяет найти минимум нелинейной целевой функции многих переменных. Метод обладает квадратичной сходимостью.

Методы сопряженных градиентов основаны на вычислении значений только первых производных и обладают положительными свойствами по сравнению с ньютоновскими методами (методы Коши, Ньютона и другие), которые относят к методам, использующим производные второго порядка. Ньютоновские методы гарантируют получение минимума нелинейных функций цели, но при этом невозможно судить заранее о количестве необходимых итераций даже для случая квадратичных функций цели. Методы сопряженных градиентов гарантируют

достижение минимума квадратичной функции цели за конечное число шагов, не превосходящее величины n - размерности пространства R^n [10] Такие методы называются квадратично сходящимися, так как скорость сходимости квадратична. Это является существенным преимуществом при сравнении с обычными градиентными методами (метод наискорейшего спуска или метод координатного спуска). Методы сопряженных градиентов сходятся в 4-5 раз быстрее метода наискорейшего спуска. Эти методы отличаются высокой надежностью и быстро сходятся в окрестности точки минимума. Они позволяют гарантировать сходимость за конечное число шагов, а нужная точность может быть достигнута значительно раньше.

Преимуществом алгоритма Флетчера-Ривса является то, что он не требует трудоемких вычислений вторых частных производных как ньютоновские методы и экономит память ЭВМ, так как ему не нужны матрицы Гессе, использу-

емые в методе Ньютона и других методах второго порядка. В то же время этот метод почти столь же эффективен как квази-Ньютоновские алгоритмы [11].

Алгоритм Флетчера-Ривса чувствителен к точности одномерного поиска, поэтому при его использовании нужно устранять любые ошибки округления, которые могут возникнуть. Гарантии сходимости всегда и везде у алгоритма нет, но как показали практические вычисления, почти всегда алгоритм приводит к приближенному оптимуму.

Таким образом для перехода от изображения к оригиналу передаточной функции параметрической структурной схемы необходимо выполнить следующие действия:

1. Найти корни знаменателя выходной передаточной функции, используя алгоритм Флетчера-Ривса.

2. Разложить выходную передаточную функцию на элементарные слагаемые.

3. Перевести элементарные слагаемые в область оригинала и представить оригинал выходной передаточной функции в целом.

Алгоритмы для реализации задачи поиска передаточной функции элементов ИИИУС с динамическими звеньями

Для вычисления передаточной характеристики параметрической структурной схемы по формуле Мейсона в данной работе предложен следующий набор алгоритмов работы с графом, представляющем схему:

1. **Алгоритм поиска всех простых путей в графе (Algorithm of search all single ways in graph).**

Алгоритм представляет собой, по существу, алгоритм поиска в графе в глубину, дополненный ограничениями на выбор из списка прямого соответствия следующей вершины при присоединении ее к пути на текущем шаге.

При включении дуги в путь помечаются включенные в путь дуга и ее начальная вершина. В дальнейшем, помеченные вершины в текущий путь не включаются (что обеспечивает построение простых путей, т.е. путей, не содержащих одинаковых вершин a , следовательно, и дуг). Пометка дуг используется для того, чтобы на шаге возврата повторно не включать уже рассмотренную дугу в текущий путь.

2. **Алгоритм поиска всех простых циклов (Algorithm of search all single cycles).**

Идея алгоритма заключается в следующем: последовательно, для каждой вершины графа находятся все контуры, проходящие через нее, затем она помечается и процесс поиска продолжается аналогично для следующей вершины, и так далее для всех вершин графа.

После поиска всех контуров, проходящих через некоторую вершину, она помечается. Таким

образом исключается дублирование контуров в итоговом множестве. Т.е. для каждой вершины находятся практически не все контуры, проходящие через нее, а только те из них, которые не проходят через те вершины, для которых уже найдены все проходящие через них контуры.

При программной реализации, в целях оптимизации, может быть учтен тот факт, что при количестве вершин N достаточно рассмотреть с помощью данного алгоритма $(N-1)$ вершину, т.к. для одной вершины заведомо нельзя найти ни одного контура.

3. **Алгоритм поиска множества всех «непересекающихся» контуров (простых циклов) (Algorithm of search all sets of “untouchment” cycles).**

Множество простых циклов есть множество “непересекающихся” контуров. Представим каждый контур как вершину некоторого графа. Любые две вершины этого графа будем соединять ребром, если у контуров есть хотя бы одна общая вершина (т.е. контуры соприкасаются). Тогда задача сводится к поиску всех множеств внутренней устойчивости графа (независимых множеств).

Для решения этой задачи разработан данный алгоритм, представляющий собой модификацию известных алгоритмов нахождения максимальных независимых множеств и алгоритмов поиска в графе в глубину с применением метода ветвей и границ.

Входными данными алгоритма является список всех простых контуров графа. Каждый контур представляет из себя список входящих в контур дуг и ребер.

Выходные данные - список множества номеров “несоприкасающихся” контуров. Например, если контуры с номерами i и j не “соприкасаются”, то список содержит элемент $\{i, j\}$.

4. **Алгоритм поиска множества всех простых контуров в подграфе, образованном из исходного графа путем исключения из него простого пути с дугами, инцидентными входящим в этот путь вершинам (Algorithm of search all single cycles in subgraph).**

Подграф образован из исходного графа путем исключения из него простого пути с дугами, инцидентными входящим в этот путь вершинам. При исключении i -того простого пути из графа в нем “исчезают” все циклы, содержащие хотя бы одну вершину, имеющуюся в этом пути. Таким образом, искомое множество всех простых контуров в подграфе есть множество циклов исходного графа исключая множество контуров, соприкасающихся с i -тым простым путем.

Для решения задачи перехода от изображения передаточной функции к ее оригиналу разработаны алгоритмы разложения рациональной функции на элементарные дроби:

1. Алгоритм поиска всех корней полинома (Algorithm Find_Roots).

Этот алгоритм выполняется пока не будут найдены все корни знаменателя передаточной функции, по мере нахождения корней они исключаются. На вход алгоритма передаётся объект, который содержит списки коэффициентов числителя и знаменателя передаточной функции, и настроечные параметры. На выходе процедуры реализующей данный алгоритм выдаётся список всех корней знаменателя передаточной функции.

$$w_1 = z_k, w_2 = z_k + 0.5 \cdot Step \cdot S(z_k), w_3 = z_k + Step \cdot S(z_k), \text{ что } F(w_1) > F(w_2) < F(w_3).$$

Это условие часто требует длительного дробления шага Step, что занимает длительное время. Если нельзя найти такой шаг, то есть он очень мал, то считается, что минимум найден – это первый критерий окончания поиска корня.

Второй критерий таков: если некоторое количество раз выполняется нижеследующее условие, то считается, что минимум найден.

Для промежуточных вычислений были разработаны алгоритмы вычисления значения функции комплексной переменной вида

$P_n(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n$ методом Горнера, а также производной этой функции, алгоритмы деления многочлена на линейный и квадратичный множители.

2. Алгоритм вычисления коэффициентов элементарных дробей (Algorithm Solve_Matrix)

Реализует разложение передаточной функции на элементарные дроби. У этого алгоритма есть серьёзное ограничение: он справедлив только если знаменатель передаточной функции не имеет кратных корней.

Ненадёжными местами данного алгоритма являются нахождение настроечного параметра и критерий окончания поиска корня. Параметр выбирается в точке минимума параболы полученной в сечении поверхности (при фиксированном z_k переменной является α_k) вертикальной плоскостью ориентированной вдоль направления. При квадратичной аппроксимации необходимо выбрать такие точки

3. Алгоритм вычисления коэффициентов функций оригиналов (Algorithm Solve_Koef).

На вход алгоритма подается список корней знаменателя передаточной функции и результат работы алгоритма Solve_Matrix, содержащий коэффициенты разложения передаточной функции на элементарные дроби. На выходе алгоритма получаем коэффициенты функций оригинала и признак типа функции. В результате работы этого алгоритма получаем элементарные слагаемые. Причём происходит объединение слагаемых, соответствующих комплексно-сопряжённым корням. Затем осуществляется переход в область оригинала.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ

Разработанные алгоритмы позволяют легко построить динамических характеристики чувствительных элементов по параметрическим структурным схемам. Рассмотрим в качестве примера структурную схему на рис.2, преобразовав ее к операторной форме (рис.3).

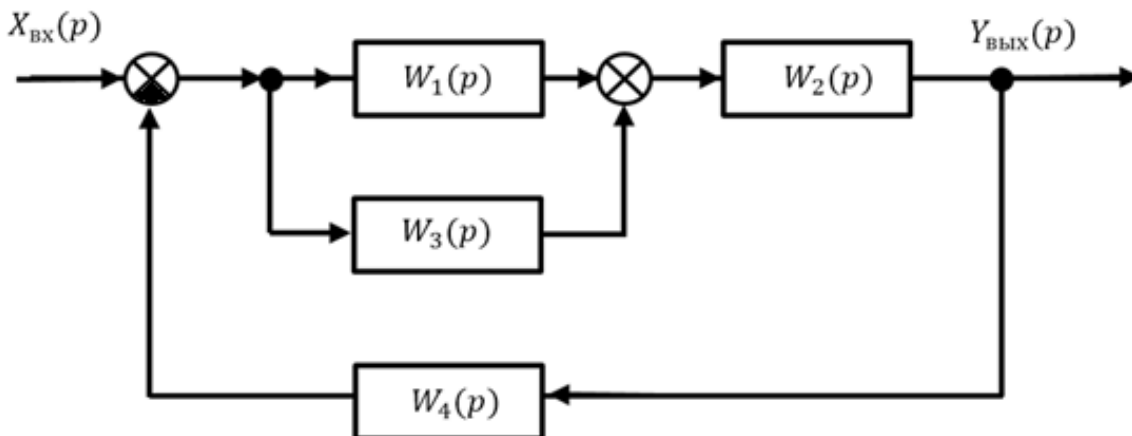


Рис. 3. Пример сложной параметрической структурной схемы в операторной форме записи. Замкнутых контуров в этой структурной схеме два. Запишем их передаточные функции в разомкнутом состоянии

$$W_{k1}(p) = -W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)$$

$$W_{k2}(p) = -W_3(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)$$

Оба контура имеют общие звенья с передаточными функциями $W_2(p)$ и $W_4(p)$, поэтому определитель графа, рассчитанный по формуле (8), имеет вид:

$$\Delta(p) = 1 - W_{k1}(p) \cdot W_{k2}(p)$$

В структурной схеме (рис.3) можно выявить два прямых пути, связывающих вход $X_{вх}(p)$ и выход $Y_{вых}(p)$, оба пути имеют с замкнутыми контурами общие звенья. Передаточные функции прямых путей прохождения сигнала и их определители имеют вид:

$$W_1(p) = W_1(p) \cdot W_2(p), \quad \Delta_1(p) = 1;$$

$$W_2(p) = W_3(p) \cdot W_2(p), \quad \Delta_2(p) = 1;$$

Комплексная передаточная функция системы, рассчитанная по формуле Мейсона (7), имеет вид

$$W(p) = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) + W_3(p) \cdot W_2(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p) + W_3(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)} \quad (10)$$

Проверку полученного выражения можно осуществить на основании расчета передаточной функции этой параметрической структурной схемы, выполненного по формулам соединений звеньев. В прямой ветви прохождения сигнала

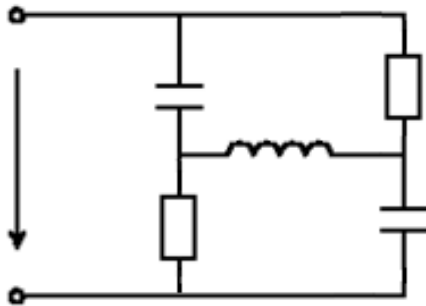


Рис. 4. Пример мостиковой схемы

звенья с передаточными функциями $W_1(p)$ и $W_3(p)$ соединены параллельно, а звено с передаточной функцией $W_2(p)$ к ним последовательно, т.е. можно записать:

$$W_{пр}(p) = (W_1(p) + W_3(p)) \cdot W_2(p) \quad (11)$$

Обратная ветвь имеет передаточную функцию:

$$W_{обр}(p) = W_4(p) \quad (12)$$

С учетом отрицательной обратной связи можно записать комплексную передаточную функцию всей параметрической системы в целом:

$$W(p) = \frac{W_{пр}(p)}{1 + W_{пр}(p) \cdot W_{обр}(p)} \quad (13)$$

Подставляя в (13) выражения (11) и (12), после соответствующих преобразований получим выражение, аналогичное (10):

$$W(p) = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) + W_3(p) \cdot W_2(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p) + W_3(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)}$$

т. е. расчет передаточной функции параметрической структурной схемы, выполненный на основе формул соединений звеньев, полностью совпадает с результатом применения формулы Мейсона.

Для проверки работоспособности системы рассмотрим пример (рис. 4), соответствующий параметрической структурной схеме (рис. 5).

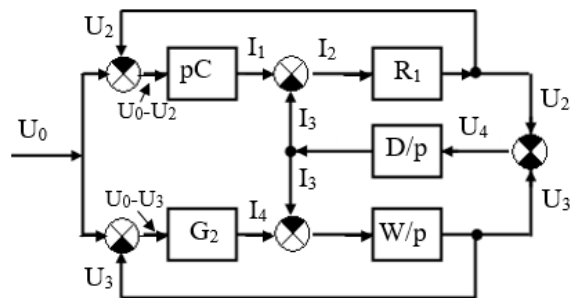


Рис. 5. Пример сложной параметрической структурной схемы в операторной форме записи

Здесь $U_4 = -U_2 - U_3$, $I_2 = I_1 - I_3$, $U_3 = (I_4 - I_3) \cdot W/p$, $I_1 = (U_0 - U_2) \cdot p \cdot C$, $U_2 = I_2 \cdot R_1$, $I_3 = U_4 \cdot D/p$, $I_4 = (U_0 - U_3) \cdot G_2$.

Для рассматриваемого случая передаточная функция будет иметь вид $I_4 = U_0(1 - R_1 \cdot C \cdot p) / p \cdot (p^2 \cdot G_2 \cdot D + p \cdot D + 2 \cdot W)$.

Разработанная система позволяет создавать структурную схему, выполнять расчет временной, амплитудно-частотной, фазо-частотной и комплексно-частотной характеристик (рис.6). В системе происходит расчет соответствующей динамической характеристики параметрической структурной схемы и результаты расчета отображаются во вновь созданном или существующем окне графиков (что определяется пользователем в окне, появляющемся после вы-

бора данного пункта меню). Аналитическое выражение для конкретного графика можно получить в окне графика и выбрав в появившемся диалоговом окне название графика.

В системе предусмотрено конвертирование параметрических структурных схем, созданных с помощью программы синтеза новых технических решений. В открывшемся диалоговом окне следует выбрать имя файла синтезированной структурной схемы. После указания имени файла автоматически создается окно редактора

параметрической структурной схемы с конвертированной в него схемой. Для создания и расчета ПСС следует задать для конвертированной

схемы генератор сигнала и точку контроля сигнала, соединить их со схемой и выполнить действия по расчету динамических характеристик, описанные выше.

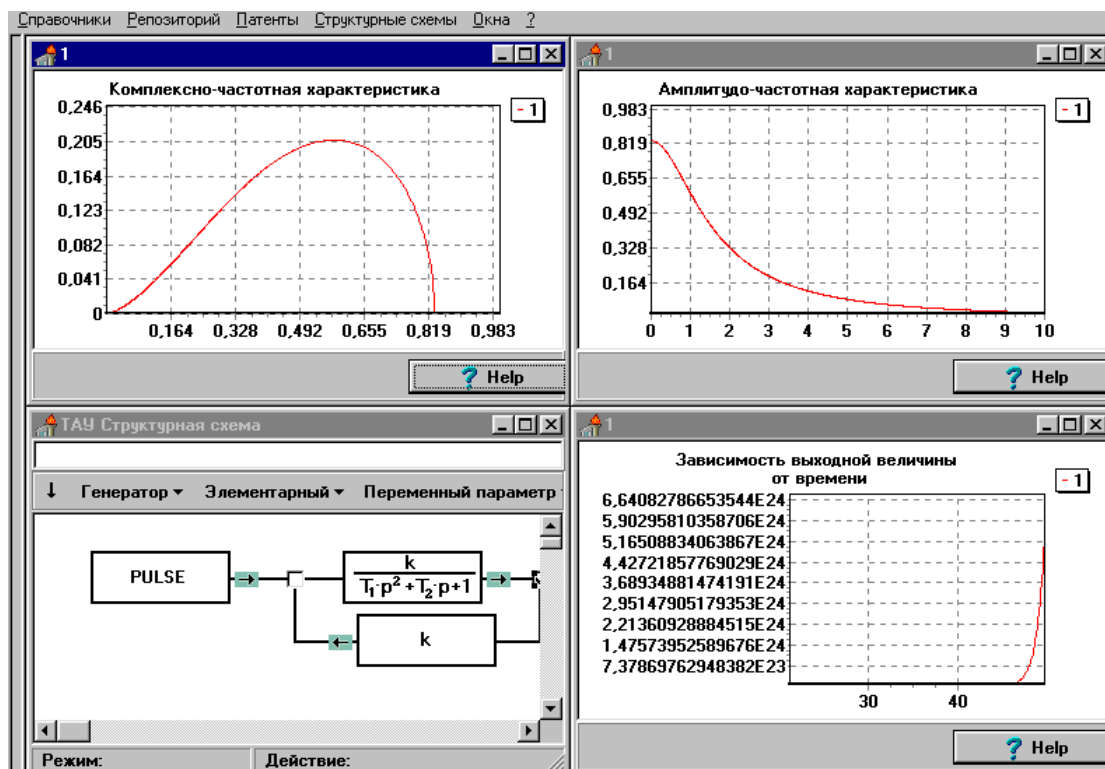


Рис. 4. Пример расчета динамических характеристик сформированной параметрической структурной схемы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика автоматизированного расчета динамических характеристик чувствительных элементов по параметрическим структурным схемам. Для проверки работоспособности была построена автоматизированная

система, которая позволяет исследовать параметрические структурные схемы энергоинформационного метода цепей, построенных на основе элементарных блоков и блоков типа «Переменный параметр» энергоинформационной модели.

Список литературы

1. Зарипова В. М., Петрова И. Ю., Шумак К. А., Лежнина Ю. А. Исследование динамических характеристик элементов автоматизированного дома по параметрическим структурным схемам // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 12 (111). С. 1424–1434.
2. Zaripov M., Petrova I., Zaripova V. Project of creation of knowledge base on physical and technological effects // IMEKO TC1 Symposium on Education in Measurement and Instrumentation 2002: Challenges of New Technologies.
3. Зарипова В. М., Цырульников Е. С., Киселев А. А. «Интеллект» для развития навыков инженерного творчества // Alma Mater (Вестник высшей школы). 2012. № 1. С. 58–61.
4. Зарипова В. М. Модели и комплексы программ для синтеза датчиков с поддержкой многопользовательской работы в сети : дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2006. 162 с.
5. Zaripova V., Petrova I. System of Conceptual Design Based on Energy-Informational Model // PROGRESS IN SYSTEMS ENGINEERING, Proceedings of the 23rd International Conference on Systems Engineering, August, 2014, Las Vegas, NV, Series: Advances in Intelligent Systems and Computing. 2015. Vol. 1089. P. 365–373.
6. Будин В. И. Математические основы автоматики и управления: учеб. пособие. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2016. 119 с.
7. Нейдорф Р. А. Теория автоматического управления в технологических системах : учеб. пособие. Ухта : Институт управления, информации и бизнеса, 2005. С.109–112.
8. Сурженко В. Е., Барышевский С. О. Способ преобразования структурных схем систем автоматического управления при помощи графов. URL: <https://www.scienceforum.ru/2017/pdf/36315.pdf> (дата обращения 29_04_2018).
9. Шуп Т. Е. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство // Пер. с англ. М. : Мир, 1982. 238 с.
10. Карманов В. Г. Математическое программирование : учеб. пособие, 5-е изд. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. С. 186–190.
11. Васильев Ф. П. Методы оптимизации. М. : Издательство «Факториал Пресс», 2002. С. 292–300.

© Петрова И. Ю., Лежнина Ю. А., Евдошенко О. И.

Ссылка для цитирования:

Петрова И. Ю., Лежнина Ю. А., Евдошенко О. И. Автоматизация расчета динамических характеристик сложных параметрических структурных схем // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2018. № 1 (27). С. 106–115.

УДК 004.42; 696.6

СИСТЕМА АНАЛИЗА БАЛАНСОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И НАГРУЗОК НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Е. М. Бялецкая, Е. М. Дербасова, А. С. Луцев

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет

В статье проанализирована проблема учета потребления коммунальных ресурсов и обеспечения своевременных и точных расчетов с конечным потребителем. Для решения указанной проблемы и обеспечения более эффективной системы взаиморасчета между потребителями, авторами, на примере одного из предприятий города Астрахани, предлагается внедрение усовершенствованной системы учета и анализа балансов электроэнергии и нагрузок на электрических сетях, позволяющей обеспечить сбор и хранение информации по территориальной принадлежности. Расчет нагрузок в сетях, автоматический расчёт ежемесячных платежей, формирование балансовой отчетности, генерация договоров позволит улучшить условия работы сотрудников организации, сэкономить время персонала.

Ключевые слова: электроэнергия, геоинформационная система, потребитель, нагрузка, счетчик, учет.

SYSTEM ANALYSIS OF ELECTRIC POWER BALANCES AND LOADS ON ELECTRIC NETWORKS

E. M. Bialetskaya, E. M. Derbasova, A. S. Lutsev

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering

The article analyzes the problem of accounting for the consumption of utility resources and ensuring timely and accurate calculations with the end user. To solve this problem and ensure a more efficient system of mutual settlement between consumers, authors, using the example of one of the enterprises of the city of Astrakhan, it is proposed to introduce an improved system of accounting and analysis of electricity balances and loads on electrical networks, allowing for the collection and storage of information on territorial affiliation. The calculation of loads in networks, the automatic calculation of monthly payments, the formation of balance reporting, the generation of contracts will improve the working conditions of employees of the organization, save staff time.

Keywords: electric power, geoinformation system, consumer, load, meter, accounting.

При проектировании и эксплуатации электрических сетей важную роль играет определение нагрузки. При правильном расчете нагрузки на электрические сети снижается аварийность, жалобы. В настоящее время, характерной для энергетики проблемой является ведение расчетов за поставленную тепло- и электроэнергию, а также определения объема потребления электроэнергии конечным потребителем. В любой региональной энергосистеме существует проблема учета потребления и обеспечения своевременных и точных расчетов с ними. Скорость расчетов с потребителями на сегодняшний день составляет в среднем 8-10 месяцев, а в некоторых случаях до 24-х, что крайне неэффективно с экономической точки зрения. Значительно возрастает скорость расчетов с потребителями, и общая собираемость платежей возрастает, по разным оценкам на 30–50 % [1–2, 4, 5].

В энергетике учет расхода/потребления энергии самая актуальная проблема. Для населения важно получать достоверную информацию о расходах на коммунальные услуги. А для производителя электрической энергии важно распределить мощности и человеческие ресурсы. Что помогает оптимизировать работы электростанции. Для более эффективной системы взаиморасчета между потребителями необходимо создать прозрачную систему учета

энергии, что приведет к решению проблемы неоплаты среди населения. Такой системой является геоинформационная система, которая включает как сбор и хранение информации по территориальной принадлежности. А также проведение анализа по расходам для каждого потребителя, отдельного дома, района, города и страны в целом.

Для сетевых компаний система учета энергии в сетях (АИИС КУЭ – автоматизированная интегрированная информационная система комплексного учета энергии) – также представляет большой резерв для экономии. В основе подобной системы лежит комплекс приборов учета всех точек входа и отпуска энергии в сети. По каналам связи информация передается в центр сбора и обработки, откуда в удобном виде направляется службам, занимающимся транспортом и сбытом, для формирования расчета нагрузки на электрические сети, а также для расчета с контрагентами [3].

Помимо представления достоверной, оперативной информации для осуществления коммерческих расчетов транспортной компании с поставщиками и потребителями энергии, система учета энергии в сетях дает возможность локализации источников потерь энергии. Снижение потерь — очень важная в рыночных условиях задача. Подобная система позволит точно знать, где и по чьей