

- для управления каскадно-водопадным режимом измельчения.
- Для достижения оптимальной загрузки камер рудой необходимо осуществить контроль суммарной нагрузки мельницы по величине потребляемой мощности привода элеватора. Оценка уравнения взаимосвязи этих переменных выявила наличие тесной коррелированной связи между ними [6].
 - На режим работы агрегата основное возмущение оказывает гранулометрический состав, характеризуемый широким набором крупности при различном процентном содержании.
 - Значительное повышение эффективности воздействия на гранулометрический состав измельченного продукта возможно в случае двухкамерных мельниц на основе дальнейшего усовершенствования методом косвенного определения заполнения мельницы.
 - Предлагаемое регулирование скорости вращения мельницы обеспечивает оптимальный режим измельчения внутримельничного заполнения, способствует повышению эффективности автоматизированных систем управления процессом измельчения, сочетается с таким режимом работы, при котором траектория движения внутримельничной загрузки становится переменной (каскадно-водопадный режим).
- На основании сделанных выводов была выдвинута научно-техническая идея – осуществить контроль режима измельчения двухкамерных мельниц с объединенной сепарацией применением регулируемого привода с использованием новых управляющих и управляемых параметров. На этой основе разработать эффективную систему управления внутримельничной загрузкой, учитывающей основное технологическое возмущение – резкое изменение измельчаемости руды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бапова Р.Ж. Анализ систем автоматического управления процесса измельчения ископаемых в горнообогатительной и смежных отраслях промышленности // Республиканский сборник научных трудов аспирантов и магистрантов. – Алматы: КазНТУ, 2001. – С. 69–71.
- Пат. 245 Казахстан. МКИ В02С 25/00. Устройство автоматического управления загрузкой двухкамерной сепараторной мельницы / М.Д. Адамбаев, Т.К. Байдавлетов. Заявлено 19.06.1990; Опубл. 30.12.1993, Бюл. № 3. – 3 с.: ил.
- Утеев А.А. Автоматизированная система управления процессом измельчения с переменной траекторией движения внутримельничной загрузки. – Автореф. канд. дисс. – М., 1974. – 15 с.
- Гельфанд Я.Е., Гинзбург И.Б. Автоматическое регулирование процессов дробления и помола в промышленности строительных материалов. – Л.: Стройиздат, 1969. – 173 с.
- А.с. 175379 СССР. МКИ В02С 25/00. Способ автоматического регулирования загрузки многокамерной сепараторной мельницы / Я.Е. Гельфанд. Заявлено 18.09.1963; Опубл. 21.09.1965, Бюл. № 19. – 2 с.: ил.
- Бапова Р.Ж. Оценка уравнения взаимосвязи переменных объекта измельчения // Современная техника и технологии: Труды X Юбил. Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 400-летию г. Томска. – Томск, 2004. – Т. 2. – С. 112–113.

УДК 621.311

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.В. Голдаев

Томский политехнический университет
Тел.: (382-2)-56-40-10

Описан вариант реализации метода интенсивностей переходов (марковских процессов), применяемого для нестационарного анализа надежности технических систем, основанный на численном решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Рассмотрены примеры анализа надежности теплоэнергетического оборудования.

Нестационарный анализ надежности различных технических систем на базе марковских процессов применяется достаточно часто [1, 2], например, при исследовании надежности различных энергетических установок [3, 4], технологических схем котельных [5], водопроводных сооружений [6], тепловых сетей [7].

При описании работы энергетических установок марковским процессом, каждое из возможных состояний определяется предшествующими состояниями ее элементов и зависит от времени [1, 2]. Такой

подход возможен только в том случае, если для каждого момента времени вероятность любого состояния в будущем зависит только от состояния системы в данный момент и не зависит от того, каким путем система пришла в это состояние. Как правило, данный метод используется в предположении экспоненциальных законов определения времени работы и восстановления с постоянными интенсивностями отказов $\lambda_i = \text{const}$ и восстановлений $\mu_i = \text{const}$. Предварительно разрабатываются функционально-струк-

турные связи в виде графа состояний и переходов системы из одного состояния в другое. Затем составляется система линейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) баланса вероятностей достижимых состояний, которая называется системой Колмогорова-Чепмена. Поскольку число возможных состояний системы равно $G_n = 2^n$ (n – количество элементов), то даже при малом n число состояний G становится очень большим. Уменьшение G достигается применением блочных схем, когда энергетическая установка представляется в виде последовательно соединенных блоков, каждый из которых содержит однотипные элементы [3–7].

В упомянутых выше примерах решение подобных задач Коши получено аналитическими методами. Например, при выводе в [7] формулы для расчета основного показателя надежности тепловых сетей учитывались только интенсивности отказов. Каждое из ОДУ такой системы являлось уравнением с разделяющимися переменными, интегрирование которого не вызывало затруднений. В работах [1, 4–6] принимались во внимание интенсивности восстановлений отказавших элементов. Для решения системы Колмогорова-Чепмена, содержащей 3–5 линейных ОДУ, применялось преобразование Лапласа [8].

Таким образом, в случае высокого порядка системы Колмогорова-Чепмена приходится каждый раз получать аналитические зависимости, что предполагает умение пользоваться преобразованием Лапласа. Однако не все учебные программы подготовки бакалавров предусматривают изучение этого эффективного метода.

Цель настоящей статьи заключается в описании опыта решения подобных задач, основанного на использовании численного метода интегрирования задачи Коши [9].

В [4] рассмотрен расчет показателей надежности энергоблока, состоящего из котла и турбоагрегата, структурная схема которого приведена на рис. 1, а. Интенсивности отказов элементов λ_1 и λ_2 , интенсивности их восстановлений μ_1 и μ_2 .

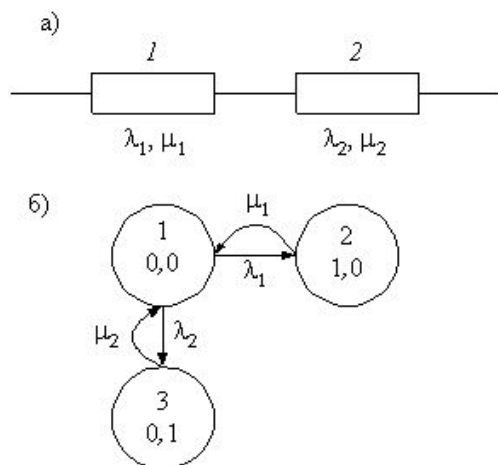


Рис. 1. Структурная схема (а) и граф состояний (б) системы из двух элементов

В данной системе два блока, в каждом блоке по два элемента. Число состояний – $G_n = 2^n = 4$. Число состояний блоков – 4. Достижимые состояния системы следующие: $\{1\} = \{0,0,1\}$; $\{2\} = \{1,0,0\}$; $\{3\} = \{0,1,0\}$. Четвертое состояние $\{4\} = \{1,1,0\}$ – недостижимо. Граф достижимых состояний системы и интенсивности переходов приведены на рис. 1, б.

Математическая постановка задачи, описывающая вероятности возможных состояний, имела вид:

$$\begin{aligned} dP_1(t)/dt &= -(\lambda_1 + \lambda_2)P_1(t) + \mu_1 P_2(t) + \mu_2 P_3(t), \\ dP_2(t)/dt &= \lambda_1 P_1(t) - P_2(t), \\ dP_3(t)/dt &= \lambda_2 P_1(t) - \mu_2 P_3(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Начальные условия записывались так:

$$t = 0: P_1 = 1, P_2 = 0, P_3 = 0. \quad (2)$$

Здесь P_1, P_2, P_3 – вероятности состояний системы, связанные условием нормировки [4]

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1.$$

Поскольку работоспособным является только первое состояние, то система решается относительно $P_1(t)$.

Аналитическое выражение для $P_1(t)$, полученное в [4] с помощью преобразования Лапласа, имело следующий вид:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= \frac{\mu_1 \mu_2}{s_1 s_2} \left\{ 1 + \frac{1}{s_1 - s_2} [s_2 \exp(s_1 t) - s_1 \exp(s_2 t)] \right\} + \\ &+ \frac{\mu_1 + \mu_2}{s_1 - s_2} [\exp(s_1 t) - \exp(s_2 t)] + \\ &+ \frac{1}{s_1 - s_2} [s_1 \exp(s_1 t) - s_2 \exp(s_2 t)], \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} s_{1,2} &= -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} - q}, \quad p = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2}{2}, \\ q &= \lambda_1 \cdot \mu_2 + \mu_1 \cdot \mu_2 + \lambda_2 \cdot \mu_1. \end{aligned}$$

Из найденного решения следует, что при $t=0, P_1(t)=1$, а для $t \rightarrow \infty, P_1(t) = \mu_1 \mu_2 / q$. Для данного варианта значений интенсивностей отказов и восстановлений значение коэффициента готовности k_G , который характеризует заложенную способность обеспечения непрерывной работы при правильном использовании и обслуживании установки, равно вероятности P_1 .

Как видно из (3), аналитическая формула и входящие в нее параметры достаточно громоздки, так что параметрический анализ по полученным выражениям все равно требует использования персонального компьютера (ПК).

Для получения оценки вероятности отказа при выводе в ремонт оборудования отопительных котельных, определения вероятности безаварийного прохождения зимнего максимума нагрузок, в работе [5] была рассмотрена эквивалентная трехэлементная последовательно-параллельная (в смысле надежности) схема. Параллельные элементы 2 и 3

на рис. 2, а отражают процессы, связанные с взаимным резервированием исходной схемы, а последовательный элемент 1 – отказы в технологической цепи производства тепловой энергии при отказе любого расчетного элемента этой цепи.

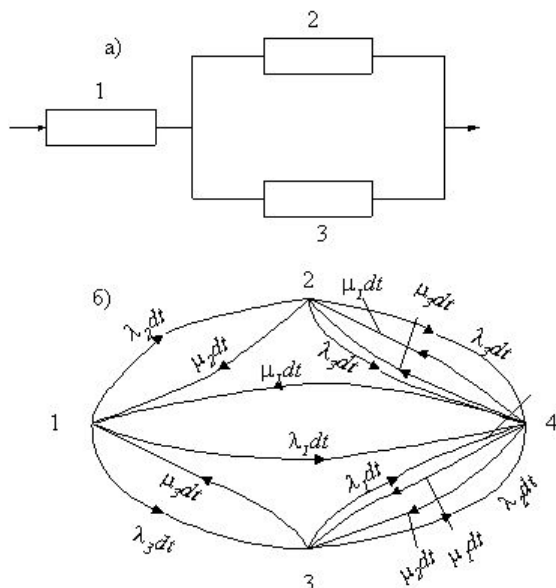


Рис. 2. Общая схема установки: а) базовые блоки котельной; б) граф состояний

Направленный граф состояний эквивалентной схемы котельной показан на рис. 2, б. Вершинам этого графа соответствуют возможные состояния системы – 1, 2, 3, 4, а ребрам – непосредственные переходы из одного состояния в другое. Система может находиться в одном из следующих состояний:

- 1 – система работоспособна, все элементы исправны;
- 2 – отказал элемент 2, элементы 1 и 3 исправны;
- 3 – отказал элемент 3, элементы 1 и 2 исправны;
- 4 – система неработоспособна, отказал либо элемент 1, либо один из параллельных элементов во время восстановления другого.

В каждом состоянии в момент времени t система может находиться с вероятностью $P_i(t)$, а переход из одного состояния в другое происходит с интенсивностью отказов или восстановлений. Для описания такого процесса, происходящего в системе с дискретными состояниями и непрерывным временем, использовались уравнения Колмогорова-Чепмена.

Вероятности состояния рассматриваемой системы (рис. 2) описывались следующей системой линейных ОДУ

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_1(t) + \mu_2 P_2(t) + \mu_3 P_3(t) + \mu_1 P_4(t);$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2 P_1(t) - (\lambda_1 + \lambda_3 + \mu_2)P_2(t) + (\mu_1 + \mu_3)P_3(t);$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_3 P_1(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3)P_3(t) + (\mu_1 + \mu_2)P_4(t);$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_1 P_1(t) + (\lambda_2 + \lambda_3)P_2(t) + (\lambda_1 + \lambda_2)P_3(t) - 3(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)P_4(t). \quad (4)$$

Начальные условия при $t = 0$ и $P_2 = 0$ имеют вид:

- 1) $P_1=1, P_3=0, P_4=0;$
- 2) $P_1=0, P_3=1, P_4=0;$
- 3) $P_1=0, P_3=0, P_4=1.$

При численном решении систем типа (1), (4) программы содержат два основных блока. Один из них предназначен для вычисления правых частей дифференциальных уравнений. Другой блок – для реализации одношагового или многошагового алгоритма, с произвольным числом уравнений. Например, в [10] описан метод Рунге-Кутты интегрирования систем ОДУ и приведен листинг программы в среде "Turbo Pascal" численного решения задачи Коши. Тестирование этой программы осуществлено путем решения системы (1) с использованием аналитической зависимости (3). При модификации программы для интегрирования системы (4) были набраны новые значения констант λ_i, μ_i и операторов, осуществляющих вычисления правых частей ОДУ. Сравнение полученных результатов с аналитическими данными из работы [5] показало их хорошее количественное соответствие (погрешность в пределах 1 %).

Таким образом, для повышения эффективности использования метода анализа надежности технических систем, основанного на теории марковских процессов, целесообразно научить пользователей эксплуатировать и изменять при необходимости программу, реализующую численный метод интегрирования системы ОДУ.

Аналогичная методология осуществляется при обучении проведения расчетов в среде *Mathcad*. Так, в [11] описаны встроенные функции, которые позволяют решать поставленную задачу Коши тремя численными методами, два из которых представляют модификации алгоритма Рунге-Кутты.

Приобретенный опыт будет полезным и при осуществлении математического моделирования тепло-массообменных процессов в различных системах промышленной теплоэнергетики представляющих собой задачи Коши. Например, установок испарительного охлаждения воды [12], поршневых компрессоров [13], эволюции параметров дымового факела [14], прямооточных распылительных аппаратов, служащих для охлаждения дымовых газов, улавливания пыли [15] и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Червонный А.А., Лукьященко В.И., Котин Л.В. Надежность сложных систем. — М.: Машиностроение, 1972. — 304 с.
2. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 318 с.
3. Клемин А.И. Расчет надежности ядерных энергетических установок. Марковская модель. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 207 с.
4. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: Учебное пособие для вузов / Г.П. Гладышев, Р.З. Аминов, В.З. Гуревич и др. - Под ред. А.И. Андрущенко. — М.: Высшая школа, 1991. — 303 с.
5. Иванов Ю.М., Чумакова С.В. К вопросу оценки надежности технологических схем котельных // Известия вузов: Энергетика. — 1982. — № 5. — С. 57–61.
6. Ильин Ю.А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. — М.: Стройиздат, 1985. — 240 с.
7. Ионин А.А. Надежность систем тепловых сетей. — М.: Стройиздат, 1989. — 268 с.
8. Краснов М.Л., Киселев А.И., Макаренко Г.И. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости: Учебное пособие. — М.: Наука, 1981. — 303 с.
9. Турчак Л.И. Основы численных методов. Учебное пособие. — М.: Наука, 1987. — 320 с.
10. Голдаев С.В., Ляликов Б.А. Основы математического моделирования в теплотехнике: Учебное пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 1999. — 106 с.
11. Кирьянов Д.В. Самоучитель Mathcad 2001. — СПб.: БХВ-Петербург, 2001. — 544 с.
12. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий / Под ред. О.Т. Ильченко. — Харьков: Вища школа, 1985. — 384 с.
13. Поршневые компрессоры / Б.С. Фотин, И.Б. Пирумов и др. — Л.: Машиностроение, 1987. — 372 с.
14. Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Зубков П.Т., Фадеев С.А. Математическое моделирование подъема дымового факела в атмосфере // Известия вузов. Энергетика. — 1986. — № 9. — С. 87–89.
15. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 240 с.

УДК 621.384.6:539.12.04

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА

В.А. Колчанова

Томский политехнический университет
E-mail: kolchanova_nika@mail.ru

Показана возможность экспериментального определения параметров схемы замещения трансформатора Тесла из осциллограмм опытов холостого хода и обратного холостого хода.

Одним из критериев обеспечения надежного функционирования трансформатора Тесла – ключевого элемента различных электрофизических комплексов для согласования трансформатора с другими устройствами, является контроль и диагностика его параметров [1, 2]. В данной работе предлагается экспериментальное определение параметров схемы замещения трансформатора Тесла из опытов холостого хода и обратного холостого хода.

Рассмотрим алгоритм определения параметров первичной цепи трансформатора Тесла (рис. 1, а) на примере модельной задачи. После срабатывания ключа S в режиме холостого хода на первичную обмотку трансформатора с индуктивностью L1, разряжается конденсатор C1, заряженный до напряжения U (рис. 1, б).

Решением прямой задачи по расчету колебательного переходного процесса в цепи второго порядка для тока $i_1(t)$ будет выражение вида [1]

$$i_1(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t} = 2 \cdot |A_1| \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega t),$$

где A_1, A_2 – постоянные интегрирования; p_1 и p_2 – комплексно-сопряженные корни характеристического уравнения, которые являются величинами, несущими информацию о параметрах схемы.

Задаем параметрами схемы: R1=0,02 Ом; L1=6 мкГн; C1=8 мкФ; M=0,2 мГн; R2=20 Ом; L2=20 мГн; C2=2,4 нФ; U=50 кВ и, решая характеристическое уравнение, получаем комплексно-сопряжен-

ные корни $p_{1,2} = -1666,6 \pm j144328$ и выражение для тока $i_1(t) = 57739 \cdot e^{-1666,6t} \cdot \sin(144328t)$, А, графическая зависимость которого от времени приведена на рис. 2, а.

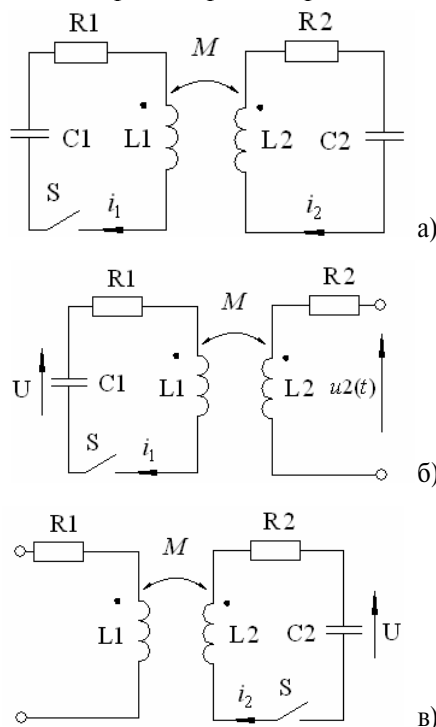


Рис. 1. Схема замещения трансформатора Тесла в режимах: а) рабочем; б) холостого хода; в) обратного холостого хода