

ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ

УДК 621.311

В.М. Рябенкий, А.О. Ушкаренко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦЕПЕЙ МАРКОВА ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Введение. Автономная электроэнергетическая система (АЭЭС) в каждый момент времени может находиться в одном из нескольких состояний, которые определяются количеством параллельно работающих генераторов. Причиной изменения состояний энергосистемы является коммутация потребителей электроэнергии. Количество параллельно работающих генераторов зависит от суммарной мощности, потребляемой нагрузкой, а оптимальным режимом работы энергосистемы является такой режим, в котором использование генерирующих агрегатов наиболее эффективное [1, 2]. Эффективное управление режимами работы АЭЭС требует решения ряда оптимизационных задач, связанных с выбором мощностей силовых агрегатов, диаграмм работы потребителей, которые определяются особенностями технологического процесса, а также прогнозирование изменения нагрузки АЭЭС. Принципиальным аспектом работы АЭЭС является случайный характер процесса изменения нагрузки, поэтому актуальной является проблема разработки имитационной модели, которая позволит решить перечисленный ряд задач, связанных с управлением режимами работы АЭЭС.

Целью статьи является разработка имитационной модели автономной электроэнергетической системы с несколькими генераторами для анализа процессов коммутации потребителей электроэнергии и анализа изменения состояний энергосистемы, а также автоматизации процесса получения суточного графика нагрузки энергосистемы, который может быть использован для решения оптимизационных задач по выбору режимов работы потребителей и прогнозирования нагрузки электростанции.

Основной материал. На практике, при работе реальной системы, существуют случайные факторы, которые приводят к изменению состояний системы. В общем, эти факторы определяются как технологическим процессом, электропитание которого обеспечивает АЭЭС, временем суток, структурой электроэнергетической системы, и даже погодой (при большой температуре работают кондиционеры и вентиляторы, при низкой температуре – обогреватели, мощность которых соизмерима с мощностью генераторов). Поэтому возникает задача моделирования случайных величин с разными законами распределения. В качестве базовых используются случайные величины с равномерным законом распределения, которые с одинаковой вероятностью могут принимать любые значения в заданном интервале [3].

В каждом из режимов работы энергосистемы суммарная мощность, которая потребляется нагрузкой, может находиться в определенных диапазонах. На рис. 1, б, представлен граф переходов цифрового автомата, в котором каждое состояние соответствует определенному состоянию энергосистемы (S0 – все генераторы остановлены, S0 – работа одного генератора, S1 – параллельная работа 2-х генераторов на общую нагрузку, S3 – параллельная работа 3-х генераторов на общую нагрузку). Переход из одного состояния системы в другого описывается случайной величиной, которая имеет свое распределение $F_k(t)$ для каждого k -го состояния.

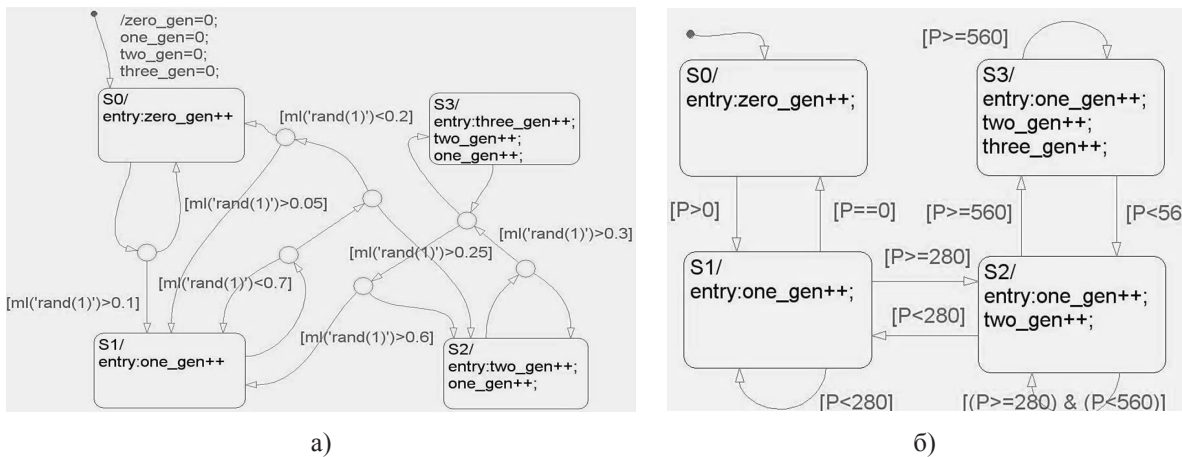


Рис.1. Марковская цепь для моделирования процесса изменения режима работы АЭЭС (а) и граф переходов цифрового автомата для моделирования различных состояний энергосистемы (б)

Марковскую цепь удобно описывать ориентированным графом, «весы» ребер которого соответствуют интенсивности перехода с одного состояния в другое. Зная переходные вероятности p_{ij} и параметр λ_i , распределение $K_i(t)$ времени пребывания процесса в i -м состоянии, можно найти «веса» ребер по формуле:

$$\lambda_{ij} = p_{ij} \lambda_i.$$

Метод графа состояний, с энергетической точки зрения, является наиболее универсальным методом построения структурных схем для исследования диаграммы нагрузки АЭЭС.

Задачу имитационного моделирования работы АЭЭС с целью построения диаграммы нагрузки рассмотрена на примере секции главного распределительного щита судовой электроэнергетической системы. Состав потребителей АЭЭС рассмотрен в работе [5]. Шаг дискретного времени составляет 10 минут, поэтому необходимо выполнить $6 \cdot 24 = 144$ итераций для имитационного моделирования работы АЭЭС в течении суток. По принципу суперпозиции суммарную нагрузку можно рассчитать путем сложения мощностей, которая потребляется каждой нагрузкой. Это и будет исходными данными для построения суточного графика нагрузки АЭЭС. Для генерации базовых случайных величин используются разные способы: аппаратный, табличный, алгоритмический [3]. Генерирование случайных величин выполняется с использованием комбинирования алгоритмического и табличного способов, поскольку такой подход позволяет гибко изменять закон распределения и вводить ограничение на одновременную работу отдельных потребителей. Построенная таким образом модель в наибольшей мере будет соответствовать реальной системе.

В общем виде матрица переходных вероятностей имеет вид:

$$| P_{ij} | = \begin{vmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & P_{03} \\ P_{10} & P_{21} & P_{31} & P_{13} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{30} & P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{vmatrix},$$

$$\sum_{j=0}^n p_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n}.$$

Для автономной электроэнергетической системы, которая состоит из трех генераторов, матрица переходных вероятностей имеет вид:

$$[P_{ij}] = \begin{vmatrix} 0,05 & 0,95 & 0 & 0 \\ 0,1 & 0,7 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0,6 & 0,3 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0,9 & 0,1 \end{vmatrix}.$$

Вероятность нахождения энергосистемы в состоянии S_1 определяется произведением $P_1(\tau)$ на вероятность $(1-\lambda \cdot \Delta\tau)$ того, что энергоблок не перешел в состояние S_2 за промежуток времени $\Delta\tau$. Аналогично определяется вероятность нахождения энергосистемы в состоянии S_2 : $P_2(\tau)\mu\Delta T$. Используя правило добавления вероятностей можно рассчитать значение $P_1(\tau+\Delta\tau)$:

$$P_1(\tau + \Delta\tau) = P_1(\tau)(1 - \lambda\Delta\tau) + P_2(\tau)\mu\Delta\tau.$$

Преобразуем это уравнение к виду:

$$\frac{P_1(\tau + \Delta\tau) - P_1(\tau)}{\Delta\tau} = -\lambda P_1(\tau) + \mu P_2(\tau).$$

Подобные уравнения можно составить для каждого состояния графа. Для АЭЭС с одним генератором система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{d\tau} = -\lambda P_1 + \mu P_2 \\ P_1 + P_2 = 1. \end{cases}$$

Для электростанции, состоящей из двух генераторов и определенного количества потребителей, система уравнений может быть записана в виде:

$$\begin{cases} -\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ -(\lambda + \mu)P_1 + \lambda P_0 + 2\mu P_0 = 0, \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1. \end{cases}$$

Для энергосистемы, которая состоит из трех генераторов, два из которых находятся в работе, а один – в резерве (ненагруженный), вероятности состояний можно определить следующим образом:

$$P_0 = \frac{3}{2\left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)^3 + 1}; P_1 = \frac{2\lambda P_0}{\mu}; P_2 = \frac{\lambda P_1}{\mu}.$$

Уравнение для определения стационарных вероятностей имеет вид:

$$\begin{cases} S_0 = p_{00}S_0 + p_{10}S_1 \\ S_1 = p_{01}S_0 + p_{11}S_1 + p_{21}S_2 \\ S_2 = p_{12}S_1 + p_{22}S_2 + p_{32}S_3 \\ S_3 = p_{23}S_2 + p_{33}S_3 \end{cases}$$

Решение этой системы уравнений позволяет определить вероятности нахождения АЭС в каждом из состояний.

От одновременной работы большого количества приемников электроэнергии в эксплуатационных режимах с разным характером нагрузки зависит суммарная нагрузка АЭС. Функционирование всей электроэнергетической системы интерпретируется как случайный процесс, который в каждый момент времени для каждой из нагрузок принимает значение 1 или 0. Поведение *i*-го элемента (*u* = 1, 2, ..., *N*) описывается случайным процессом *y_i(t)*. Определение суммарных резкопеременных нагрузок следует проводить на основании индивидуальных графиков нагрузок отдельных потребителей с учетом их расхождения. В суточном графике нагрузки АЭС есть пики (рис. 2), обусловленные включением и отключением различных потребителей электроэнергии в эксплуатационных режимах работы электростанции, выявление которых необходимо для предотвращения неблагоприятных условий работы электроприемников.

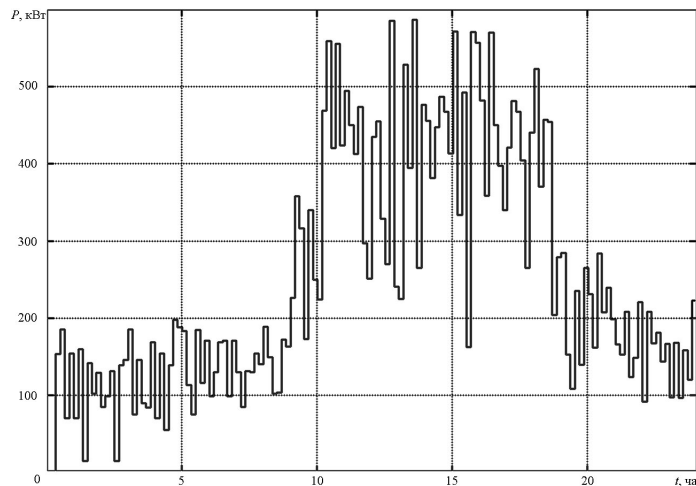


Рис. 2. Изменение суммарной нагрузки энергосистемы в течении суток

Коэффициент заполнения графика нагрузки показывает, во сколько раз произведенное количество электроэнергии за анализируемый период меньше того количества энергии, которая была бы произведена за то же время, если бы нагрузка установки все время была максимальной. Очевидно, что чем равномернее график, тем более близко значение КПД к максимально возможному. Для характеристики графика нагрузки АЭС можно воспользоваться также условной продолжительностью использования максимальной нагрузки:

$$T_{\max} = \frac{W_n}{P_{\max}} = \frac{P_{\text{ср}} T}{P_{\max}} = K_{\text{зан}} T.$$

Эта величина показывает, сколько часов за анализируемый период T установка должна была бы работать с неизменной максимальной нагрузкой, чтобы выработать действительное количество электроэнергии W_n за этот период времени. Степень неравномерности графика работы установки оценивается коэффициентом заполнения:

$$k_{зан} = \frac{W_n}{P_{max}T} = \frac{P_{сеп}}{P_{max}}$$

Одной из причин появления провалов и всплесков напряжения является изменение нагрузки автономной электростанции, особенно при пуске мощных асинхронных двигателей. Принципиальным аспектом работы автономной электроэнергетической системы является случайный характер входного потока заявок на коммутацию нагрузки. На рис. 3 представлена граф переходов, созданный в Matlab Stateflow, с помощью которого моделируется случайный процесс коммутации нагрузки. Переходы между состояниями S0, S1 и S2 происходят случайным образом, с заданными вероятностями. Каждая из нагрузок может быть в одном из двух состояний – выключенном (состояния AD00, AD10, AD20) и включенном (состояния AD01, AD11, AD21).

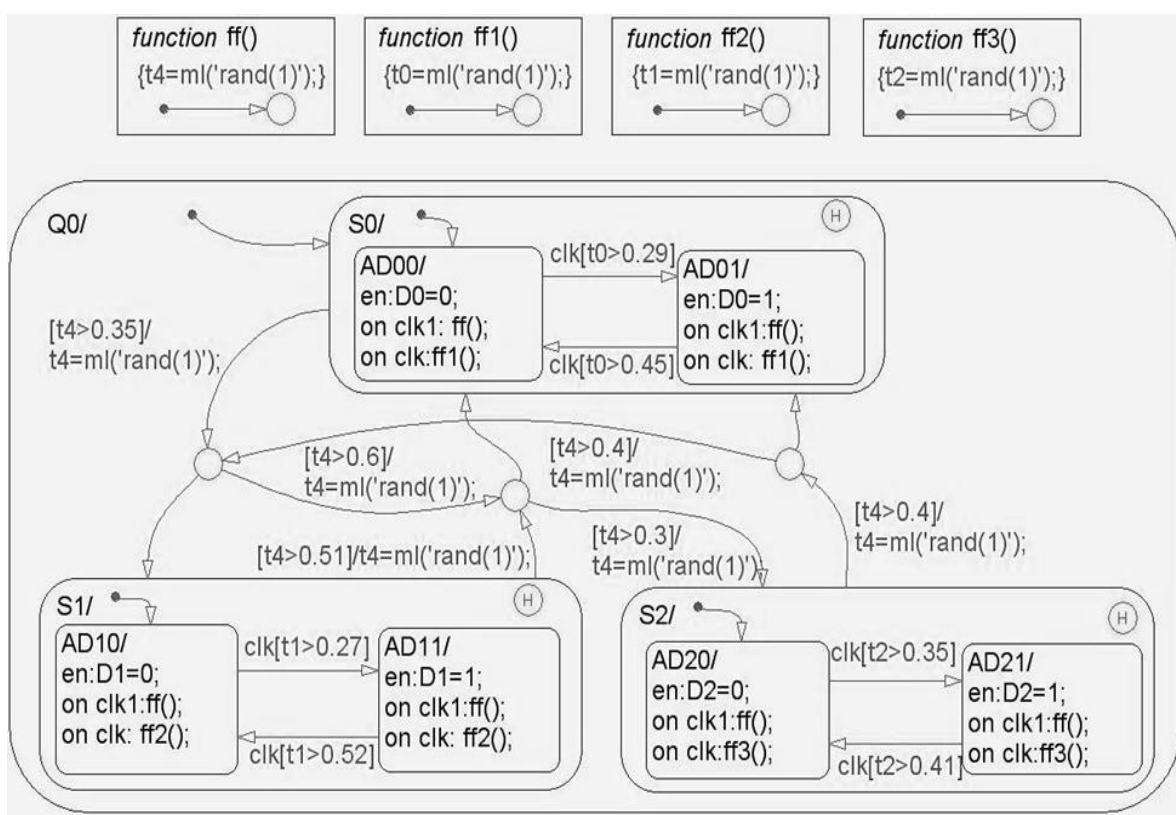


Рис. 3. Модель для исследования процессов коммутации потребителей электроэнергии

Каждый потребитель характеризуется своей диаграммой работы, которая является независимой от режимов работы других потребителей. Рассмотренные потребители характеризуются индивидуальными режимами работы и процесс их коммутации носит случайный характер.

При построении булевых моделей принимается предположение, согласно которому мгновенные состояния элементов (в данном случае состояние нагрузки – включена или отключена) однозначно задают состояние системы в тот же момент времени. Каждому i -му элементу присваивается логическая переменная:

$$x = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{й элемент включен} \\ 0, & \text{если } i - \text{й элемент выключен} \end{cases}$$

Функционирование всей электроэнергетической системы интерпретируется как случайный процесс, который в каждый момент времени для каждой из нагрузок принимает значение 1 или 0. Поведение i -го элемента ($u = 1, 2, \dots, N$) описывается случайным процессом $y_i(t)$. На рис. 4 представлена осциллограмма напряжения АЭС при коммутации нагрузки.

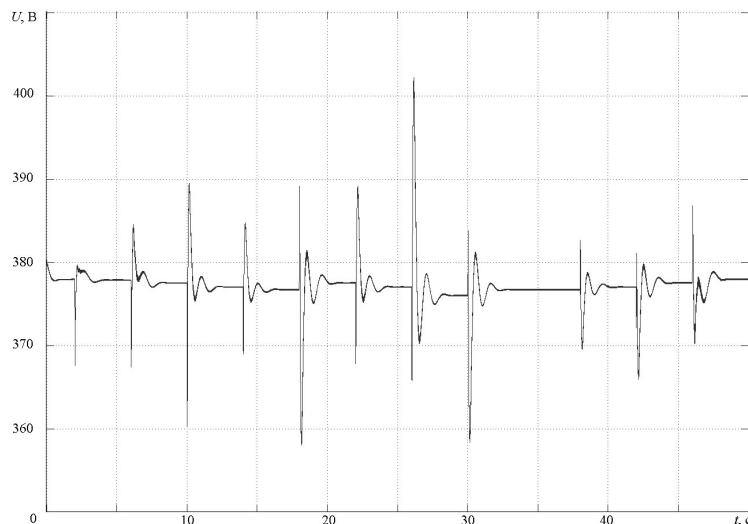


Рис. 4. Оциллограмма напряжения в сети при коммутации потребителей

Исследование провалов и всплесков напряжения в АЭЭС может быть выполнено по методике, которая рассмотрена в работе [5].

Вывод. Рассмотренная методика моделирования АЭЭС с использованием цепей Маркова позволяет получить суточный график нагрузки и спланировать оптимальный режим работы всей энергосистемы для создания более равномерной нагрузки на генераторы. Суточный график изменения нагрузки автономной электростанции, полученный в результате моделирования, может быть использован для решения задач прогнозирования изменения суммарной мощности нагрузки. Использование разработанной имитационной модели позволяет исследовать случайные процессы всплесков и провалов напряжения и их влияние на потребители электроэнергии, например, на работу полупроводниковых преобразователей электроэнергии. При этом важно, чтобы процесс коммутации и велины всплесков и провалов напряжения соответствовали процессам, которые протекают в реальных электроэнергетических системах. Преимущество использования теории Марковских процессов состоит в том, что матрица переходных вероятностей может быть сформирована на основе экспериментальных данных, полученных на реальных объектах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дубицкий, М. А. Выбор и использование резервов генерирующей мощности в электроэнергетических системах [Текст]/М. А. Дубицкий, Ю. Н. Руденко, М. Б. Чельцов. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 272 с.
2. Орнов, В. Г. Задачи оперативного и автоматического управления энергосистемами [Текст] / В. Г. Орнов, М. А. Рабинович. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 223 с.
3. Бабков С.П. Моделирование систем: уч. пособие / С.П. Бабков, Д.О. Бытев, Иван. гос. хим. – технолог. ун-т. – Иваново, 2008. – 156 с.
4. Бородюк В.П. Дискретные цепи Маркова в задачах оптимизации технических систем / В.П. Бородюк Ю.Е. Голяс. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1989. – 76 с.
5. Рябенский В.М. Исследование провалов и всплесков напряжения в автономных электроэнергетических системах / В.М. Рябенский, О.О. Ушкаренко, Нгуен Ван Тхань // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. Київ, 2010. Ч.1. С.182-186.

РЯБЕНЬКИЙ Владимир Михайлович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Теоретической электротехники и электронных систем, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова.

Научные интересы: автоматизация электроэнергетических систем, компьютеризированные системы управления.

УШКАРЕНКО Александр Олегович, к.т.н., доцент кафедры Теоретической электротехники и электронных систем, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова.

Научные интересы: автоматизация электроэнергетических систем, информационное обеспечение автоматизированных систем управления.