

УДК 303.732.4

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ НИЗКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Добаев А.З.

ФГБОУ ВПО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», Владикавказ, e-mail: info@skgmi-gtu.ru

Работа посвящена разработке структуры системы моделирования электроэнергетических сетей и алгоритмов функционирования ее подсистем. Предлагаемые алгоритмы охватывают все этапы функционирования такой модели: построение структуры электросети, описание используемых в ней электроприемников и приборов учета, моделирование действий конечных потребителей электроэнергии, расчет электропотребления в каждой точке сети, расчет показаний приборов учета. Действия конечных потребителей моделируется на основании известного метода Монте-Карло с учетом особенностей различных типов электроприемников и суточных графиков нагрузки электрической сети. Расчет показаний приборов учета производится на основании данных о времени работы электроприемников и точках безучетного потребления (хищения) электроэнергии. Реализация предложенных алгоритмов позволит исследователю строить модели достаточно сложных электросетей, а также получить необходимый набор экспериментальных данных для дальнейшей работы.

Ключевые слова: системный анализ, электроэнергия, прибор учета, имитационное моделирование, метод Монте-Карло

METHODS OF CONSTRUCTION SIMULATION MODELS OF COMPLEX SYSTEMS BY THE EXAMPLE OF LOW-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS

Dobaev A.Z.

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy, Vladikavkaz, e-mail: info@skgmi-gtu.ru

The work is devoted to the system structure developing of electric networks and algorithms of its subsystems functioning. The proposed algorithms cover all stages of the restructuring of such models: the formation of the structure of electric circuit, the description of the used power consuming and metering devices, modeling of the actions of the final consumers, the calculation of the electricity consumption at each point, the calculation of meter readings. Actions of final consumers is modeled on the basis of the famous Monte Carlo method, taking into consideration the features of different types of electrical equipment and daily load function of the electric network. Calculation of metering devices testimony is based on the power consuming time of the electric equipment. Implementation of the proposed algorithms allows the researcher to build rather a complex model of electric network, as well as to get the required set of experimental data for the further research.

Keywords: system analysis, electricity, metering device, simulation model, Monte Carlo method

В настоящее время широкое распространение получили автоматизированные информационно-измерительные системы контроля и учета электроэнергии (АИИСКУЭ). Это позволяет сделать вывод о том, что задача разработки интеллектуальных методов анализа данных в таких системах с целью выявления фактов безучетного потребления электроэнергии является актуальной. Однако при разработке подобных методов исследователь столкнется с определенными трудностями в сборе данных и постановке эксперимента. Наибольшую сложность составляют получение достоверных исходных данных для анализа и проверка полученных результатов. Так, для проверки корректности разработанного метода необходимо тщательно проверить не только выявленные системой возможные точки безучетного потребления, но и каждую точку сети. Число точек может измеряться сотнями и потребовать значительных трудовых и временных ресурсов [2].

Предложенные в данной работе методы позволяют построить имитационную мо-

дель, предназначенную для исследования функционирования сложной электроэнергетической сети, состоящей из узлов, на которых установлены приборы учета потребленной электроэнергии, и электроприемников, подключенных к узлам. Результатом работы модели является имитация данных, поступающих в систему АИИСКУЭ с узлов электrorаспределительной сети, а также данных о реальном электропотреблении на узлах при отсутствии безучетного потребления.

Примером моделируемой сети может быть многоквартирный дом, подключенный к системе АИИСКУЭ. Узлами сети являются квартирные счетчики электроэнергии, соединенные с центральным узлом – домовым счетчиком. В каждой квартире используются осветительные приборы и различная бытовая техника. При включении в квартире какого-либо бытового прибора его электропотребление фиксирует квартирный и домовый счетчики, суммирующие потребление всех приборов на своем

уровне. В случае, когда имеет место безучетное потребление, данные квартирного счетчика могут быть искажены. Однако домовый счетчик фиксирует потребление в полном объеме. Через заданные интервалы времени (как правило час или полчаса)

показания со всех счетчиков поступают в систему АИИСКУЭ, где сохраняются в базе данных и могут быть подвергнуты всестороннему анализу.

Общая схема разработанной модели представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема сегмента модели электросети

Входными параметрами для модели являются:

- структура электроэнергетической сети – содержит информацию об узлах сети, на которых установлены приборы учета, а также электроприемников, подключенных к каждому узлу;
- электроприемники – характеристики используемого в сети электрооборудования;
- точки безучетного потребления – описание случаев вмешательства в структуру сети, препятствующих корректной регистрации потребленной электроэнергии приборами учета;

- распределение суточной нагрузки – описание общего потребления системы в зависимости от времени суток. Может значительно отличаться для разных типов потребителей в сети (промышленные предприятия, бытовые пользователи и т.д.).

Выходными данными являются показания приборов учета, регистрируемые через заданные промежутки времени, а также данные о реальном потреблении на каждом узле сети.

Развернутая структура функционирования модели представлена на рис. 2.



Рис. 2. Развернутая схема функционирования модели электросети

Как показано на рис. 2, работа модели состоит из трех основных этапов. На первом этапе на основании данных о структуре электроэнергетической сети и особенностей используемых в ней электроприемников производится регистра-

ция времени работы каждого электроприемника.

На втором этапе по данным о работе электроприемников и потребляемой каждым электроприемником энергии производится расчет потребления электроэнергии

каждым электроприемником. Также на данном этапе путем суммирования рассчитывается потребление на каждом узле сети.

Полученные данные корректируются на третьем этапе с учетом данных о вмешательстве в нормальное функционирование приборов учета. Результатом являются данные о показаниях приборов учета, поступающие в систему АИИСКУЭ.

Полученные на третьем этапе данные могут быть подвергнуты анализу с помощью методов математического, статистического анализа, алгоритмов интеллектуального анализа данных и т.д. на предмет выявления точек безучетного потребления. Эффективность используемых методов может быть проверена с помощью данных, полученных на втором этапе.

Регистрация времени работы оборудования

Для построения имитационной модели электроэнергетической сети первым шагом является построение модели действий конечных потребителей электроэнергии, роль которых заключается в последовательном включении или выключении оборудования, присоединенного к рассматриваемой сети.

В данном исследовании для этого был применен метод Монте-Карло, который является одним из самых распространенных методов статистических испытаний. Использование данного метода позволяет получить данные о времени работы каждого электроприемника, присоединенного к сети.

Суть метода заключается в последовательном выборе на основании таблицы распределения вероятностей и генератора случайных чисел электроприемника, который будет включен или выключен в определенный момент времени из рассматриваемого временного интервала [5]. При этом время включения и выключения электроприемников регистрируются для последующего расчета потребления электроэнергии.

При формализации модели поведения конечных потребителей электроэнергии с использованием метода Монте-Карло для облегчения ее математического описания был принят ряд допущений [3]:

1. Рассматриваемый интервал времени T , на котором проводятся испытания, представлен в виде множества более коротких непересекающихся временных отрезков t_i , равных между собой. То есть $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, $t_1 = t_2, t_1 = t_3, \dots, t_1 = t_n$.

2. Каждая единица оборудования включается или выключается в определенный интервал времени t_i .

3. Две единицы оборудования не могут быть включены или выключены в один

и тот же момент времени t при условии, что точность определения момента времени t достаточно высока для этого (в общем случае, при $t_i \rightarrow 0$).

4. В целях упрощения построения модели длина интервала времени t_i , при которых выполняются предыдущие условия, принимается равной 1 секунде.

Имея в качестве исходных данных массив оборудования $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ на основании принятых допущений можно утверждать, что в каждую секунду произойдет одно из трех событий: какое-либо оборудование будет включено, какое-либо оборудование будет выключено, состояние системы не изменится. Отсюда следует, что

$$p_0 + \sum_{i=1}^N p_i = 1, \quad (1)$$

где p_0 – вероятность того, что состояние системы не изменится; p_i – вероятность того, что оборудования x_i изменит свое состояние (выключенное оборудование будет включено, включенное – выключено).

В простейшем случае $p_0 = \text{const}$, а $p_i = (1 - p_0)/N$. То есть вероятности включения или выключения каждой единицы оборудования равны между собой (2).

$$\text{const} + \sum_{i=1}^N \frac{1 - \text{const}}{N} = 1. \quad (2)$$

Однако на практике время работы различных видов оборудования различается. Некоторые электроприемники практически всегда подключены к электросети. Другие же – включаются лишь изредка. Поэтому для каждого вида оборудования предлагается внести отдельную оценку, определяющую частоту включения той или иной единицы оборудования p_i . При этом оценка p_i должна меняться в зависимости от того, включено оборудование или выключено. В общем случае для последующего уточнения модели значение вероятности p_i может быть заменено функцией $p(x_i)$, которая в настоящее время имеет вид (3).

$$p(x_i) = \begin{cases} p_i^{\text{вкл}}, & \text{если } x_i \text{ включено} \\ p_i^{\text{выкл}}, & \text{если } x_i \text{ выключено} \end{cases}. \quad (3)$$

Алгоритм, моделирующий регистрацию включения и выключения оборудования потребителями, согласно предложенному методу Монте-Карло, представлен на рис. 3.

Работа алгоритма состоит в последовательном определении изменения состояния системы для каждого момента времени t_i , входящего в рассматриваемый интервал времени. На каждом шаге цикла алгоритма для каждого t_i выполняются следующие действия:

1. Строится таблица распределения вероятностей наступления каждого из событий. Расчет кумулятивной вероятности производится по формуле (4)

$$p_i^k = p_i + \sum_{j=0}^{i-1} p_j. \quad (4)$$

В представленной табл. 1 распределения вероятностей 1 нулевому событию соответствует отсутствие изменений в системе; каждому последующему соответствует какой-либо электроприемник, который меняет свое состояние.

Таблица 1

Распределение вероятностей между событиями

Электроприемник	Вероятность, p	Кумулятивная вероятность, p^k
-	$p_0 = \text{const}$	const
x_1	$p_1 = p(x_1)$	const + p_1
x_2	$p_2 = p(x_2)$	const + $p_1 + p_2$
...
x_n	$p_n = p(x_n)$	1

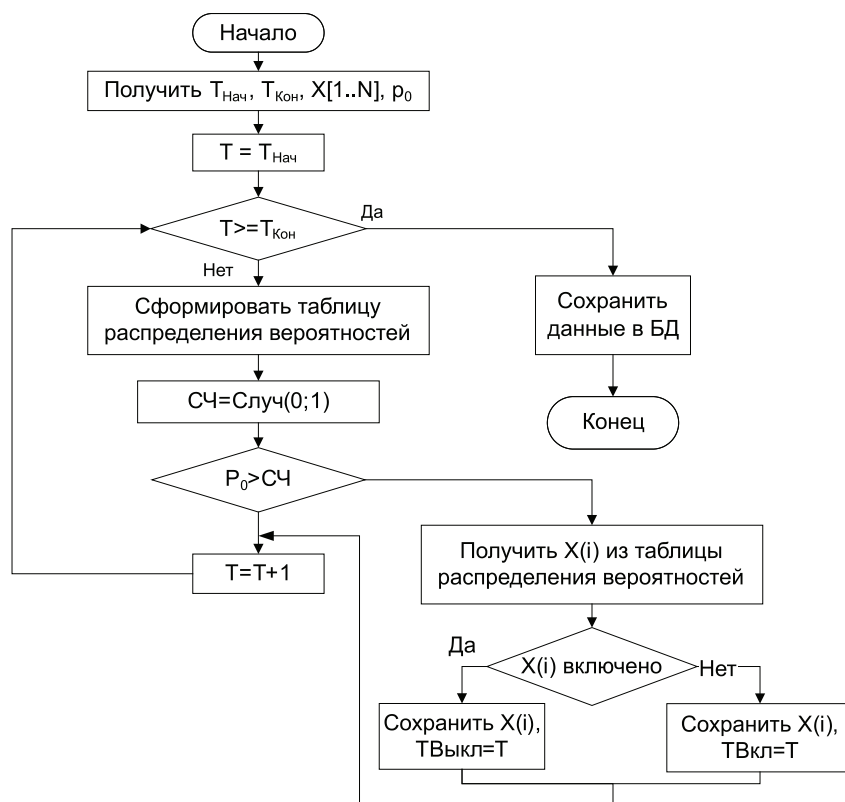


Рис. 3. Блок-схема алгоритма регистрации работы электроприемников

2. Генератором случайных чисел выбирается число СЧ в интервале [0..1] (с требуемым числом разрядов).

3. В таблице распределения вероятностей выбирается строка с минимальным значением p^k , удовлетворяющим условию $p_i^k > \text{СЧ}$. Электроприемник данной строки и будет использоваться в дальнейшей обработке. Если p^k соответствует нулевому событию, то алгоритм переходит к следующей итерации цикла.

Очевидным недостатком приведенной модели является то, что она не учитывает особенности потребления электроэнергии определенной группой потребления, в частности бытовым сектором. Как было сказано выше, действия отдельного потребителя бытового сектора носят случайный характер, не позволяющий описать или спрогнозировать его поведение. Вместе с тем в действиях совокупности потребителей, как правило, можно выявить закономерно-

сти. Энергетики в своей работе используют графики распределения суточной нагрузки, которые наглядно отражает влияние времени суток на величину потребления электроэнергии [1]. Очевидно, что распределение суточной нагрузки является достаточно важным параметром любой энергетической системы и должен быть обязательно учтен в модели.

Устранение данного недостатка модели достигается заменой $p_0 = \text{const}$ на функцию $p_0 = F(t)$, где $F(t)$ – функция, обратная функции распределения суточной нагрузки. Функция принимает значения в диапазоне $[0;1]$ и определяет уровень вероятности того, что в рассматриваемый момент времени состояние системы не изменится. Функция достигает максимального значения в моменты наиболее низкой активности потребителей (согласно графику – ночные часы) и минимального – в момент наиболее высокой активности.

Определение особенностей подключения оборудования и особенностей работы измерительных приборов

Параметры, определяющие точки вмешательства в нормальное функционирование электрической сети и приборов учета, задаются двумя матрицами

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}, B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\},$$

где $a_i \in [0, 1]$, $b_i \in \{0, 1\}$.

Матрица A содержит коэффициенты, определяющие, какая часть действительного потребления в данном узле сети фиксируется прибором учета. Так, коэффициент $a_i = 0,5$ определяет, что прибор x_i регистрирует половину действительного потребления. Значения матрицы B принимают значения 0 или 1 и определяют, регистрируется ли потребление данного электроприемника вышестоящим прибором учета.

Расчет показаний измерительных приборов

Расчет показаний измерительных приборов производится в два этапа: расчет потребления каждого электроприемника и расчет показаний приборов учета.

Расчет потребления каждой единицы оборудования, подключенного к измерительным приборам, производится для каждого интервала снятия показаний. Моделированию потребления различных видов электрооборудования посвящено множество работ, однако в рамках данного исследования точное моделирование потребления каждого вида электрооборудования не применяется,

так как высокая стохастическая составляющая исследуемого процесса снижает его ценность. Таким образом, для расчета потребления была использована простейшая формула расчета с добавлением стохастической составляющей (5). В качестве исходных данных о потреблении различными видами оборудования электроэнергии используются данные из учебных пособий [4]

$$P = (P_{\text{уст}} + P_{\text{случ}}) \cdot t, \quad (5)$$

где $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность оборудования, кВт; $P_{\text{случ}}$ – мощность, рассчитываемая на основании случайной составляющей, суммируемая с мощностью, кВт; t – время работы оборудования в рассматриваемый интервал времени, ч.

Случайная составляющая задается для каждого вида электроприемника в процентах, определяет величину, на которую потребление оборудования может отклоняться от установленной мощности и рассчитывается по формуле (6):

$$P_{\text{случ}} = \frac{P_{\text{уст}} \cdot \text{СЛУЧ(ОТК)}}{100}, \quad (6)$$

где ОТК – заданное для электроприемника отклонение от установленного (в процентах).

Время работы t за интервал $(t_1, t_2]$ рассчитывается по формуле (7):

$$t = \sum_{i=1}^n \left(\min(t_2, t_i^k) - \max(t_1, t_i^h) \right), \quad (7)$$

где n – количество периодов работы электроприемников в заданном интервале; t_1, t_2 – время начала и время окончания интервала t ; t_i^k, t_i^h – время начала и время окончания работы оборудования.

Расчет показаний счетчика производится по формуле (8)

$$V = a \left(\sum_{i=1}^n P_i b_i + \sum_{j=1}^m V_j \right), \quad (8)$$

где P_i – потребление оборудования, подключенного напрямую к измерительному прибору; b_i – коэффициент искажения для оборудования, принимает дискретные значения (0 – потребление оборудования не фиксируется измерительным прибором, 1 – потребление оборудования фиксируется измерительным прибором); a – коэффициент искажения показаний рассчитываемого измерительного прибора, принимающий значения в интервале $[0; 1]$.

Обобщив формулы (5), (6), (7) и (8), получим общую формулу расчета показаний счетчика в указанный интервал (9)

$$V = a \left(\sum b_i P_{\text{уст},i} \left(1 - \text{Rnd}(\text{ОТК}_i) \cdot \sum_{i=1}^n \left(\min(t_2, t_i^k) - \min(t_1, t_i^h) \right) \right) + \sum_{j=1}^m V_j \right). \quad (9)$$

Преобразовав таблицу в вид, представленный ниже (табл. 2), можно получить исходные данные для исследования.

В заключение следует отметить, что реализация и использование представленных алгоритмов невозможно без использования средств вычислительной техники. Реализация

модели в виде программного продукта для ЭВМ позволит создавать модели достаточно сложных электросетей предоставляя обширное поле деятельности для исследований. В настоящее время автором ведется разработка такого программного продукта, которая будет завершена в ближайшем будущем.

Таблица 2

Формат представления выходной информации модели

Период	Прибор учета № 1	Прибор учета № 2	...	Прибор учета № N	Сумма показаний	Корневой прибор учета	Небаланс

Список литературы

1. Большая энциклопедия нефти и газа. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ngpedia.ru/id649229p1.html> (Дата обращения 14.08.2012 г.).

2. Добаев А.З. К вопросу об использовании данных АСКУЭ для разработки методов выявления безучетного потребления электроэнергии // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции. – Саратов, 2011. – С. 49–55.

3. Добаев А.З. Алгоритм моделирования действий бытовых потребителей электроэнергии с использованием метода Монте-Карло // Физико-математические науки и информационные технологии: прошлое, настоящее, будущее. – Новосибирск, 2012. – С. 57–63.

4. Хузмиев И.К., Пагиев К.Х., Кумаритов А.М. Учебное пособие к практическим и лабораторным занятиям «Энергоменеджмент и энергоаудит». – Владикавказ, 2004. – 392 с.

5. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Изд-во «Мир», 1978. – 418 с.

3. Dobaev A.Z. Simulation algorithm of consumers actions using the Method of Monte Carlo // Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies: Past, Present, Future. Novosibirsk, 2012, pp. 57–63.

4. Huzmiev I.K., Pagiev K.K., Kumaritov A.M. Study guide to practical and laboratory work on Energy management and energy audi, Vladikavkaz, 2004, 392 p.

5. Shannon R., Systems simulation – the art and science // Mir, Moscow, 1978, 418 p.

Рецензенты:

Кумаритов А.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных систем в экономике, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), г. Владикавказ;

Хузмиев И.К., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой организации производства и экономики промышленности, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), г. Владикавказ.

Работа поступила в редакцию 26.10.2012.

References

1. Big Encyclopedia of Oil and Gas // URL: <http://www.ngpedia.ru/id649229p1.html> (accessed 14 August 2012).

2. Dobaev A.Z. On the use of metering data to develop methods to identify unregistered electricity consumption // Proceedings of the International Scientific Conference, Saratov 2011, pp. 49–55.