

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.016:622.232.7

А.Г.Захарова

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «ВЕРОЯТНОСТНОГО АВТОМАТА» ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ГОРНО-ШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Энергетическое хозяйство угледобывающего предприятия является сложной системой, функционирование которой определяется характером взаимосвязей между ее элементами, а также внешними и внутренними факторами, часть которых носит случайный характер. Одной из актуальных задач, возникающих при этом, является прогнозирование расхода электрической энергии на единицу производимой продукции, для решения которой необходимо знать статистические характеристики как потребляемой горно-шахтным оборудованием (ГШО) электрической энергии, так и получаемой конечной продукции[1, 2].

Важным вопросом, решение которого необходимо для прогнозирования потребления электроэнергии, является учет случайных воздействий на звенья технологической цепи, так как случайные воздействия на отдельные звенья формируют разбросы характеристик системы при продвижении вверх по иерархической лестнице объектов, образующих систему (угольное предприятие).

Прогнозная схема моделирования электропотребления угольного предприятия может быть построена по принципу "восходящего потока моделей" [3, 4], основанного на иерархии образующих систему объектов, суть которого сводится к следующему. Вначале моделируется поведение объектов самого нижнего уровня иерархии - "звеньев" (к ним можно отнести, например, некоторые виды ГШО: очистные комбайны, конвейеры, перегружатели, насосы главного водоотлива и т.д.) при заданных входных характеристиках случайных воздействий. Нижний уровень объектов характеризуется тем, что его элементы не могут быть разбиты на меньшие составляющие. Именно объекты нижнего уровня - "звенья" - и подвержены случайным воздействиям.

Выходные характеристики "звеньев" являются входными характеристиками для состояний следующего уровня иерархии - "подсистем" (к ним относится совокупность ГШО, объединенная по определенному признаку, например, ГШО отдельных участков). Моделируя выходные характеристики всех объектов второго снизу иерархического уровня по полученным на предыдущем шаге входным параметрам, получают входные парамет-

ры для моделирования объектов следующего над ним иерархического уровня. Описанный процесс продвижения вверх по иерархии продолжается до тех пор, пока не будет промоделировано поведение "системы" (угольного предприятия) - объекта наивысшего иерархического уровня.

Для построения описанной выше прогнозной схемы необходимо установление закономерностей формирования энергетических затрат в виде математических моделей, учитывающих влияние случайных воздействий, что требует привлечения математической теории случайных процессов, описывающей переходы системы между ее состояниями под влиянием случайных воздействий. Для построения математической модели случайного процесса необходимо определить число состояний системы и вероятности переходов системы между ее состояниями. Далее можно промоделировать траектории случайного процесса, - последовательность переходов системы между ее состояниями.

Одним из наиболее перспективных методов численного моделирования случайных процессов является метод прямой генерации реализаций исследуемого процесса при помощи метода Монте-Карло [5, 6], основанного на генерации случайных чисел. Для систем с конечным числом состояний, к которым относится ГШО, отдельная реализация процесса их эволюции может осуществляться при помощи одного из перспективных методов прямого моделирования динамики стохастических систем - метода «вероятностных автоматов» [7].

"Вероятностный автомат" - это система с конечным числом состояний $E_1, E_2, E_3, \dots, E_B$, переходы между которыми описываются при помощи вероятностей перехода P_{ij} . "Вероятностный автомат" генерирует случайные переходы при помощи некоторого заранее определенного правила, основанного на генерации случайных чисел. Это правило и определяет структуру "вероятностного автомата". Моделирование динамики системы при помощи "вероятностного автомата" является реализацией случайного процесса, описываемого уравнением Чепмена-Колмогорова для полной вероятности перехода за произвольное число ша-

гов

$$\Pr\{E_i \rightarrow E_j \text{ за шаги с } k\text{-го по } k+m\text{-й}\} = \sum_{\{n_1\}} P_{in_1}(k)P_{n_1n_2}(k+1)\dots P_{n_m-1}(k+m).$$

Задав начальное состояние системы, при помощи датчика случайных чисел определяется, в какое из допустимых состояний должна перейти система и производится перевод системы в следующее состояние. На следующих шагах рассматриваемого временного интервала проводится та же процедура определения вероятности перехода и перевод системы в соответствующее ей состояние.

В результате описанного процесса случайных переходов на всем рассматриваемом временном интервале получается конкретная реализация случайного процесса – случайная последовательность состояний, в которых система пребывала в промоделированном процессе эволюции

$$s_0, s_1, s_2, \dots, s_N,$$

где s_k – номер состояния, в котором пребывала система на шаге с номером k .

По полученной последовательности состояний может быть построена временная зависимость любой измеряемой величины, связанной с эволюцией системы.

После задания состояний системы определяется матрица вероятностей переходов

ния системы и матрица вероятностей переходов образуют набор входных характеристик модели. Далее производится расчет выходных параметров и анализ результатов.

Для моделирования работы реального звена угледобывающего предприятия с использованием рассмотренного метода в качестве примера был выбран рабочий цикл очистного комбайна KGS-445, так как именно очистной комбайн является основной технологической машиной, задающей нагрузку всем звеньям очистного участка и шахты в целом.

В настоящее время накоплен обширный материал по определению средней продолжительности включения \bar{t}_v , продолжительности времени работы t_p и продолжительности цикла очистных комбайнов t_u в течение смены [3, 4]. Продолжительность включения \bar{t}_v очистных комбайнов с режимами частых пусков определяется по формуле

$$\bar{t}_v = \frac{(nt_n + t_p)}{t_u},$$

где n – число двигателей комбайна; t_n – длительность пуска двигателя; t_p – длительность работы под нагрузкой; $t_u = nt_n + t_p + t_0$ – длительность цикла; t_0 – время паузы. Продолжительность включения для забоев с суточной нагрузкой до 1200 т составляет 0,5 – 0,68; с нагрузкой 2000 – 2500 т – 0,7 – 0,81; с нагрузкой выше 2500 т – 0,85.

Распределение уровней нагрузки во время рабочего цикла показано на рис. 1. В течение време-

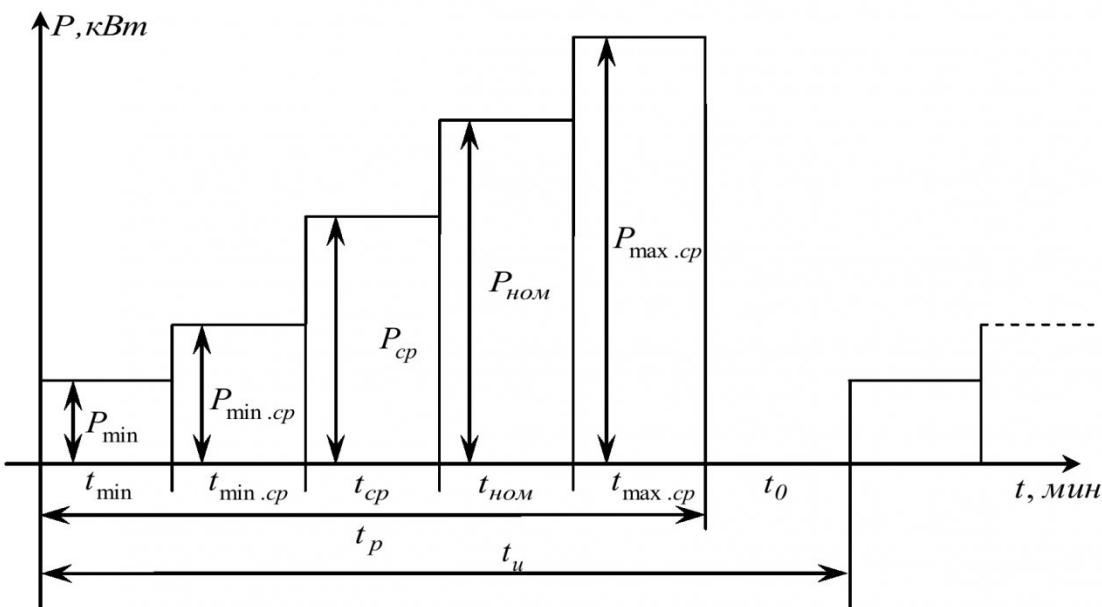


Рис. 1. Распределение уровней нагрузок очистного комбайна во время рабочего цикла

$$P_{ij}(dt) = \begin{cases} 1 - \lambda_i(t)dt, & i = j; \\ a_{ij}(t)dt, & i \neq j, \end{cases} \quad (1)$$

где величина $\lambda_i(t)dt$ имеет смысл вероятности ухода системы из состояния E_i за интервал времени $(t, t+dt)$. Параметры, характеризующие состоя-

ни t_{min} включается и работает на холостом ходу первый двигатель (нижний шнек), затем в течение времени $t_{min.cp}$ включается двигатель верхнего шнека и работает на холостом ходу. Далее, после непродолжительного времени набора нагрузки (оно составляет 3 – 5 с, поэтому им пренебрегаем),

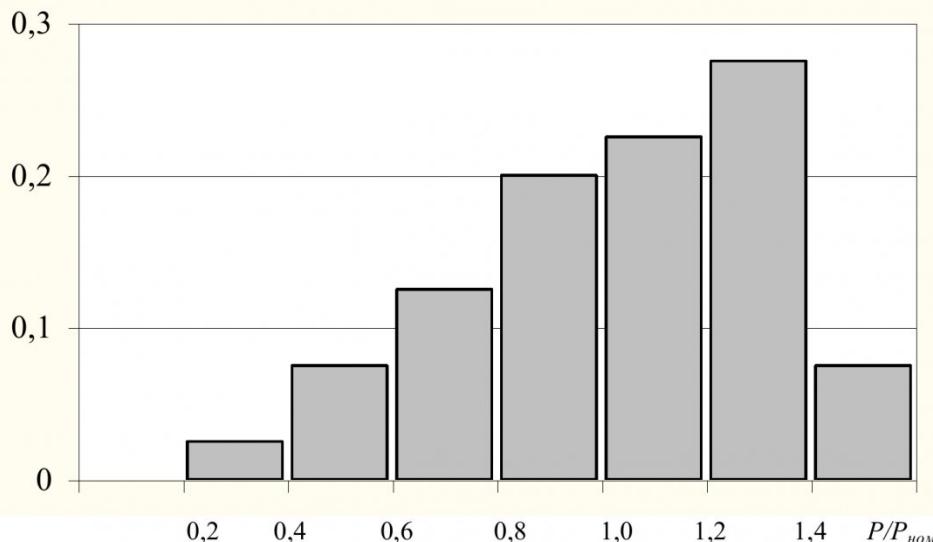


Рис. 2. Гистограмма распределения нагрузок очистного комбайна

комбайн работает с некоторой нагрузкой, гистограмма распределения которой приведена на рис.2. Этой гистограммой удобно воспользоваться для целей моделирования.

Во время технологического цикла, длительность которого составляет от 25 до 80 мин, можно выделить пять уровней нагрузки комбайна: минимальная P_{min} ; минимальная усредненная $P_{min.cp}$; средняя P_{cp} ; номинальная $P_{ном}$; максимальная усредненная $P_{max.cp}$.

Анализ хронометража производственных процессов в очистных забоях показал:

- длительность остановок очистного комбайна по внутризабойным и внезабойным техническим причинам имеет гамма-распределение с плотностью

$$f(t) = \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} t^{\eta-1} e^{-\lambda t};$$

- длительность остановок по внезабойным организационным причинам имеет гамма-распределение, по внутризабойным – экспоненциальное

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t};$$

- длительность остановок из-за горно-геологических нарушений описывается экспоненциальным распределением;

- вероятность возникновения всех видов остановок распределена по закону Пуассона:

$$P(m) = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}.$$

Время работы очистных комбайнов под нагрузкой имеет экспоненциальный закон распределения, а продолжительность цикла описывается распределением Вейбулла-Гнеденко:

$$f(t_u) = \frac{b}{a} \left(\frac{t_u}{a} \right)^{b-1} \exp \left[- \left(\frac{t_u}{a} \right)^b \right],$$

где a , b – параметры распределения. Наблюдения показали, что при нагрузке на очистной забой до 1500 т/сутки продолжительность цикла с доверительной вероятностью $p = 0,9$ находится в пределах 40 – 50 мин, а при нагрузке до 2500 т/сутки – до 78 мин. Очистные забои, работающие с нагрузкой 1,0 млн. т/год и выше характеризуются продолжительностью цикла до 135 – 180 мин. Располагая приведенными статистическими данными,

Период	Описание	Потребляемая мощность	Обозначение состояния
t_0	Двигатели выключены	Отсутствует	E_0
t_{min}	Двигатель нижнего шнека работает на холостом ходу	$P_{min} = (0,12 \div 0,16)P_{ном.дв}$	E_1
$t_{min.cp}$	Двигатели нижнего и верхнего шнека работают на холостом ходу	$P_{min.cp} = (0,26 \div 0,35)P_{ном.дв}$	E_2
t_{cp}	Комбайн работает со средней нагрузкой	$P_{cp} = (0,7 \div 0,8)P_{ном.дв} + 0,8P_{ном.под}$	E_3
$t_{ном}$	Комбайн работает с номинальной нагрузкой	$P_{ном} = P_{ном.дв} + P_{ном.под}$	E_4
$t_{max.cp}$	Комбайн работает с максимальной нагрузкой	$P_{max.cp} = (1,06 \div 1,36)P_{ном.дв} + P_{ном.под}$	E_5

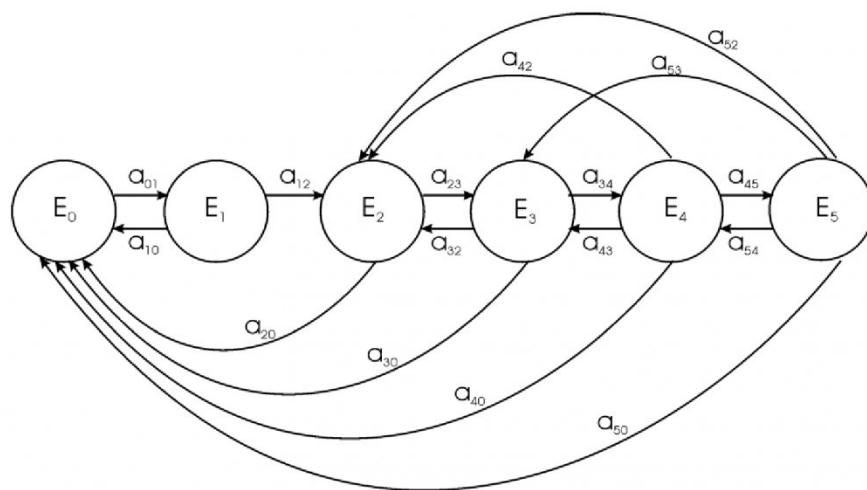


Рис. 3. Граф состояний системы «очистной комбайн»

можно рассчитать вероятности непрерывной работы и остановки комбайна, а также вероятности того, что время непрерывной работы в минутах составит не более t_p и продолжительность остановок не превысит t_0 .

В рассматриваемой модели в течение рабочего цикла очистного комбайна KGS-445 выделены шесть временных периодов, описание которых представлено в таблице, причем значения потребляемой электрической мощности выражены через суммарную номинальную мощность двигателей резания $P_{ном.дв}$ и номинальную мощность двигателя подачи $P_{ном.под}$. Для оценки вероятностей перехода между рассматриваемыми состояниями комбайна воспользуемся результатами исследований [3], откуда следует, что средняя продолжительность остановок по различным причинам составляет 8÷28 мин, а вероятности остановок комбайна лежат в интервале 0,04 – 0,52.

На основе оценок вероятностей перехода и расчета параметров состояний были определены параметры рабочего цикла, показанные в виде графа на рис. 3. Вершины графа соответствуют состояниям системы, а стрелки - переходам из одного состояния в другое.

Эти данные являются основой для составления соответствующей графу матрицы вероятностей переходов (1), с помощью которой могут быть сформированы входные параметры для моделирования рабочего цикла очистного комбайна KGS-445.

Установленные с помощью предложенной модели закономерности электропотребления отдельных звеньев, подсистем и предприятия в целом могут применяться для решения задачи повышения эффективности использования электроэнергии как на стадии проектирования, так и для условий нормальной эксплуатации предприятия путем оптимизации выбора ГШО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Стадник, Д. А. Прогнозирование и управление электропотреблением угольных шахт // Сб. науч. тр. Моск. гос. горн. ун-та. - 2004. - № 4. - С. 221-225.
- Пивняк, Г. Г. Горное предприятие как объект энергопотребления // Горный журнал - спецвыпуски. - 2004. - № 7. - С. 3-5.
- Захарова, А.Г. Закономерности электропотребления на угольных шахтах Кузбасса: монография / А.Г. Захарова. – Гос. учреждение Кузбасс. гос. техн. ун-т. - Кемерово, 2002. – 198 с.
- Лобур И.А. Исследование и моделирование электропотребления на угольных шахтах Кузбасса: дис. ... канд. техн. наук. КузГТУ, Кемерово, 2005.
- Богданофф, Дж. Вероятностные модели накопления повреждений / Дж. Богданофф, Ф. Козин. – М.: Мир, 1985. – 354 с.
- Ермаков, С.М. Метод Монте–Карло и смежные вопросы. – М.: Наука, 1971. – 319 с.
- Гулд Х. Компьютерное моделирование в физике. - Ч. 2 / Х. Гулд , Я. Тобочник .– М.: Мир, 1990. -398 с.

Автор статьи:

Захарова
Алла Геннадьевна,
докт. техн.наук, проф. каф. электро-
привода и автоматизации КузГТУ/
Email: zaharova8@gmail.com