УДК 519.87:621.31

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

В. П. Розен, канд. техн. наук (НТУУ «КПИ»), Г. В. Курбака, С. М. Мыльниченко, инженеры (Черкасский государственный технологический университет)

Розглянуто модель споживання електричного навантаження та модель управління електричним навантаженням з урахуванням вибору керуючих впливів при заданому рівні достовірності (технологічні обмеження).

Ключові слова: управління, управляючі дії, споживачі електричної енергії, електричне навантаження, технологічні обмеження, імовірність.

Рассмотрена модель потребления электрической нагрузки, а также модель управления электрической нагрузкой с учетом выбора управляющих воздействий при заданном уровне достоверности (технологические ограничения).

Ключевые слова: управление, управляющие воздействия, потребители электрической энергии, электрическая нагрузка, технологические ограничения, вероятность.

Electric load consumption model and model of electric load control system with consideration for selecting control actions at a given confidence level (technological constraints) is presented.

Key words: control, control actions, electric consumers, electric load, technological constraints, probability.

Введение. При решении задачи управления электрической нагрузкой комплекса энергосистема–промышленное предприятие обычно рассматривают управление заранее выделенных потребителей-регуляторов на уровне предприятия. Таким образом, управление электрической нагрузкой осуществляется с использованием центрального органа управления, без учета административной и технологической структуры промышленного предприятия.

Цель. Построение математической модели оптимального управления электрической нагрузкой с учетом центрального органа управления производственной системой.

Изложение основного материала. Модель потребления электрической нагрузки в функции времени согласно [1] имеет вид

$$P(t) = P^{\text{баз}}(t) + P^{\text{ПТ}}(t),$$

где $P^{\text{баз}}(t)$ – базисная электрическая нагрузка потребителей производственной системы, включающая в себя k цехов без учета потребителей-регуляторов; $P^{\text{ПТ}}(t)$ – электрическая нагрузка потребителей-регуляторов мощности.

Модель управления электрической нагрузкой с учетом описания состояния объекта управления, режима его работы и производственных ограничений имеет вид

$$P(t) = P^{\text{баз}}(t) + \sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{M} u_{kij}(t)P_{kij}^{\text{ПТ}}, \quad (1)$$

где $u_{kij}(t)$ – управляющее воздействие, принимается равным единице, если *i*-тый потребитель электроэнергии *k*-го цеха в момент времени *t* находится в *j*-ом режиме работы и имеет значение, равное единице и нулю во всех остальных случаях; $P_{kij}^{\text{ПТ}}$ – электрическая нагрузка потребителя-регулятора.

Существующие в странах Европы, СНГ и в Украине одноставочный тариф по зонам суток и двухставочный тариф за максимальную мощность стимулируют выравнивание графика нагрузки энергосистемы. Целевая функция в первом случае имеет вид

$$\Pi = a_1W_1 + a_2W_2 + a_3W_3 \to \min,$$

где a_1, a_2, a_3 – ставки соответственно в часы максимума, полупика и пика нагрузки; W_1, W_2, W_3 – потребление электроэнергии соответственно в часы максимума, полупика и пика нагрузки. Во втором случае

$$\Pi = aP_{\text{заявл}} + bW \to \min,$$

где *a* – основная ставка тарифа за заявленную мощность; $P_{\text{заявл}}$ – заявленная мощность; *b* – дополнительная ставка за потребленную электроэнергию; *W* – потребленная электроэнергия.

Задачу управления электрической нагрузкой можно в первом и во втором случаях свести к задаче минимизации функции цели:

$$F = P^{\text{зад}}(\text{t}) - \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} P(t)dt \to \min, \quad (2)$$

где $P^{\text{зад}}(\text{t})$ – заданное потребление электрической нагрузки за контролируемый период; *T* – контрольный период электрической нагрузки, который в Украине принимается равным 30 минутам.

Задача управления в период максимума нагрузки состоит в нахождении управляющих воздействий $u_{kij}(t)$ при заданном уровне достоверности:

$$P_{\Gamma}(\min(\text{P}^{\text{зад}}(\text{t}) - \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} P(t)dt)) \geq \sigma, \quad (3)$$

где P_{Γ} – вероятность выполнения задания по электрической нагрузке; σ – заранее заданный уровень.

При выборе управляющих воздействий необходимо учитывать состояние потребителей электрической энергии (ПЭЭ) и следующие технологические ограничения:

• ПЭЭ находится только в одном режиме работы

$$\sum_{j=1}^{M} u_{kij}(t) = 1; \qquad (4)$$

• при включении основных ПЭЭ должны быть включены вспомогательные потребители

$$\sum_{j=1}^{M} u_{kij}(t) \geq \sum_{kl_0 j}^{M} u_{ki_0 j}(t). \qquad (5)$$

Режим отключения задается как один из режимов работы, который обозначается $j_0(kl)$;

• при выполнении технологически непрерывных процессов ПЭЭ не могут быть отключены, тогда

$$1 - u_{kl_0 j}(kl) \geq x_{kij}(t_c), \qquad (6)$$

где t_c – момент времени текущего состояния ПЭЭ; $x_{kij}(t)$ – переменная, равная 1, если в *t*-й момент времени ПЭЭ k_i выполняет технологически непрерывную операцию, и равна нулю в остальных случаях;

• ПЭЭ, находящийся в аварийном состоянии, должен быть отключен, поэтому

$$u_{kl_0 j}(kl) \geq x_{ki_1}(t), \qquad (7)$$

где $x_{ki_1}(t)$ – переменная, равная 1, если ПЭЭ в *t*-й момент времени находится в рабочем состоянии, и равная нулю в противном случае.

Построим функцию цели управления электрической нагрузкой промышленного предприятия с использованием функции эффективности ПЭЭ $C_{k,i}(t)$, которая учитывает как производственные ограничения на выполнение заданного плана работ, так и экономические показатели по использованию производственных фондов.

В общем случае положим $C_{k,i}(t) = C_{k,i}$ где $C_{k,i}$ – эффективность ПЭЭ. Если для некоторых ПЭЭ в период времени $[t_1', t_2'] \subset [t_0, t_k]$ необходимо его использование для производственных целей, то положим $C_{k_0 i_0}(t) = C_{k_{,0} i_0} + C^0$, где C^0 – достаточно большое число. Если в этот период ограничение ПЭЭ не ведет к ущербу, то $C_{k_0 i_0}(t) = C_{k_{,0} i_0} / D$, где $D \geq \max_{ki} C_{ki}$ – достаточно большое число.

Для некоторых ПЭЭ можно задать общее время их работы за данный период времени. Тогда ограничение имеет вид:

$$\int_{t_0}^{t_k} (1 - u_{kij_0(k,i)}(t))dt \geq x(k,l), \qquad (8)$$

где t_0, t_k – соответственно начало и окончание контрольного периода; *x(k, l)* – рабочее время для ПЭЭ. Функционал управления электрической нагрузкой имеет вид

$$F = \int_{t_0}^{t_k} \left[\sum_{k=1}^{K} \sum_{l=1}^{L_k} \frac{(1 - u_{kij_0(k,i)}(t))\, C_{ki}(t)}{\sum_{j=1}^{q(k,i)} u_{kij}(t)\, P_{kij}} \right] dx \rightarrow \max \quad . \qquad (9)$$

Если технологическое ограничение имеет вероятностный характер, то решение всей задачи можно разделить на два уровня: верхний и нижний.

При решении задачи верхнего уровня время максимума нагрузки энергосистемы разобьем на равномерные интервалы моментами времени $t_0, ..., t_k$, в которые осуществим идентификацию текущего состояния потребителей-регуляторов.

Задача верхнего уровня управления является плановой задачей и включает в себя определение суммарного потребления электрической нагрузки промышленного предприятия.

В качестве закона распределения максимальной электрической нагрузки принимается нормальный закон, согласно исследованиям, проведенным многими авторами на производственных объектах и согласно [1, 2].

Плановая величина $P_i^{\text{зад}}$ устанавливается такими производственными методами, как регрессионные методы, метод экспоненциального сглаживания, байесовский метод.

Задача нижнего уровня управления состоит в поиске управляющего воздействия $u_{kij}(t)$, определенного на интервале $[t_i, t_{i+1}]$, обеспечивающего выполнение технологических ограничений вместе с ограничением на объем потребляемой энергии и максимизирующего заданный функционал.

Все ПЭЭ в каждом цехе для каждого текущего момента времени можно разделить на четыре группы:

1) потребители, которые в данный момент времени выполняют производственную программу;

2) потребители, не изменившие режим работы;

3) ПЭЭ, которые можно отключить без существенного ущерба;

4) ПЭЭ, которые выключены, но могут начать работать в течение контрольного периода.

Учет состояния ПЭЭ в задаче управления производится, если:

• за период времени, прошедший от предыдущего момента принятия решения, ПЭЭ находятся в аварийном состоянии – в этом случае их следует перевести в четвертую группу;

• за прошедший период ПЭЭ, бывшие в аварийном состоянии, вступают в работу – в этом случае их в начальный момент включения переводят в третью группу, а в последующий – во вторую группу;

• ПЭЭ, относительно которых на данный момент задано соответствующее изменение, переводят в первую группу (выводят из первой группы);

• проводят изменение третьей группы ПЭЭ аналогично предыдущему пункту.

После ранжирования ПЭЭ [3] по выделенным группам осуществляется определение режимов электропотребления.

Величина электрической нагрузки, которая необходима для включения на минимальный уровень потребления ПЭЭ, выключенного на рассматриваемый момент времени и входящего в l-ю группу, определяется по формуле

$$\min P_{kl} = \sum_{l=1}^{k} P_m(t).$$

Величина электрической нагрузки, необходимая для перевода ПЭЭ в нормальный технологический режим, при котором в цехе не будет производиться отключение уже работающих ПЭЭ, а ввод в работу дополнительных ПЭЭ будет выполняться за счет получения дополнительной электрической нагрузки, равна:

$$P_k^{\text{ТП}}(t) = P_k^{\text{ф}}(t) + \sum \left(P_{\text{ki}}^{\min}(t) + P_{kl}^{\text{норм}}(t) \right),$$

где $P_{kl}^{\text{норм}}(t)$ – величина нагрузки *l*-й группы *k*-го цеха в момент времени *t*; $P_k^{\text{ф}}(t)$ – величина фактически потребляемой электрической нагрузки *k*-го цеха.

«Нормальное функционирование» – это работа оборудования, когда работающее оборудование не отключается.

Величина электрической нагрузки при управлении определяется по формуле

$$P_{kl}^{\text{ф}}(t) = P_{kl}^{\min}(t) + P_{kl}^{\text{выкл}}(t), \quad l = \overline{1, n}$$

где $P_{kl}^{\min}(t)$ – величина электрической нагрузки, которую можно снизить, если в *k*-м цехе все ПЭЭ 1-й группы, уже включенные на начало момента, перевести на минимальный уровень потребления; $P_{kl}^{\text{выкл}}$ – величина электрической нагрузки, при выключенных всех действующих ПЭЭ l-й группы после их перевода на минимальный уровень потребления.

Выводы

При управлении электрической нагрузкой промышленных предприятий должен учитываться вероятностный характер режима работы оборудования. Управление нагрузкой промышленных предприятий должно рассматриваться как двухуровневая иерархическая структура. Верхний уровень управления

устанавливает плановые значения мощности, а нижний уровень, в зависимости от состояния оборудования, производит отработку управляющих воздействий.

1. *Праховник А. В.* Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А. В. Праховник, В. П. Розен, В. В. Дегтярев. – М.: Недра, 1985. – 232 с.

2. *Фокин С. Н.* Сравнительный анализ принципов распределения времени функционирования ЭВМ / С. Н. Фокин, Т. П. Черноиванова. – Вопросы радиоэлектроники, 1984. – № 5. – 286 с.

3. *Курбака Г. В.* Ранжирование потребителей-регуляторов мощности с использованием метода анализа иерархий / Г. В. Курбака, П. В. Розен // Сб. науч. тр. Международного форума-конкурса молодых ученых “Проблемы недропользования”, 20–22 апреля 2011 г. Ч. I. Санкт-Петербургский горный институт имени Г. В. Плеханова – 2011. – С. 45–48.

Надійшла до редакції 16.10.2012 р.
Рекомендовано до друку докт. техн. наук В. М. Чермалихом