

УДК 62-83.004.15

Циганаш В. Е., Пищулина Е. В., Максимов М. А., Белоиваненко Ю. С.

РАЗРАБОТКА НОВОГО КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МОЩНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБИТЕЛЯ

Актуальность проблемы экономии энергетических ресурсов определяет возрастающее внимание к критериям эффективности процессов управления, передачи и преобразования электрической энергии в другие виды, и в первую очередь, в тепловую, поскольку здесь расходуется значительная часть всей электроэнергии. Критерий эффективности (целевая функция) – это форма установления цели управления, математическое выражение результата действия процесса [1]. Её также называют критериальной функцией или показателем качества. Выбор целевой функции и нахождение её максимального или минимального значения являются сутью проблемы оптимизации. В отличие от моделей физических процессов целевые функции обычно выражают нефизические величины, такие, например, как прибыль, стоимость, качество или же величины, которые тесно с ними связаны. Применительно к поставленной задаче такой величиной может быть мощность, потребляемая установкой [2].

Целью настоящей работы является разработка нового критерия оптимального управления для печи электрошлакового переплава на основе мощности, потребляемой этим объектом. Мощность содержит ряд составляющих (частных критериев), которые быстро определяются, имеют связь с экономическими категориями процесса, с одной стороны, и параметрами технологического процесса, с другой. Эта взаимосвязь открывает перспективу разработки единой модели, которая сможет не только математически характеризовать результат действия процесса, но и непосредственно использоваться в цепи разрабатываемой системы оптимального управления. Из других принципов, выведенных на основании опыта, которыми можно пользоваться при выборе целевой функции отметим следующее.

Принцип однозначности состоит в том, что должна максимизироваться либо минимизироваться одна и только одна целевая функция. Следует это из того, что все известные методы векторной оптимизации непосредственно или косвенно сводят решаемые задачи к задачам скалярной оптимизации. Иначе говоря, частные критерии тем или иным способом объединяются в составной критерий, который затем максимизируется (или минимизируется). Если составной критерий получается в результате проникновения в физическую суть функционирования системы и вскрытия объективно существующей взаимозависимости между частными критериями и составным критерием (как в данном случае с мощностью), то оптимальное решение является объективным. Однако отыскание подобной взаимозависимости чрезвычайно сложно, а может быть, и не всегда возможно. Поэтому на практике составной критерий обычно образуют путем формального объединения частных критериев, что неизбежно ведет к субъективности получаемого «оптимального» решения. Составной критерий иногда называют обобщенным или интегральным критерием.

В зависимости от того, каким образом частные критерии объединяются в обобщенный критерий, различают критерии аддитивные, мультипликативные и минимаксные (максиминные).

Принцип соответствия заключается в том, что характер целевой функции и масштабные (весовые) коэффициенты должны определяться таким образом, чтобы оптимизация целевой функции обеспечивала наиболее успешное управление процессом.

Принцип управляемости состоит в том, что целевая функция должна быть выражена через переменные управления, которые контролируются операторами или системой вычислительных устройств. Целевые функции, которые выражены через переменные, не являющиеся переменными управления процессов, бесполезны.

Принцип ориентации на прибыль. Если из двух возможных целевых функций необходимо выбрать одну, следует выбирать ту, которая оказывает большее влияние на прибыль.

Принцип подходящей формы состоит в том, что желательно пользоваться целевой функцией, имеющей экстремум. Целевым функциям, не имеющим экстремума, требуются ограничения для обеспечения решения, которое имело бы смысл. К нежелательным формам целевой функции относятся функции, имеющие разрыв, функции, у которых есть локальные экстремумы и неоднозначные функции. Одной из наиболее желательных форм целевой функции является квадратичная форма.

Принимая во внимание изложенные принципы, выберем критерий оптимальности для конкретной электрической установки. Рассмотрим задачу управления электрическим режимом электрошлаковой печи (ЭШП) как вариационную задачу [3]. В качестве основного параметра выбираем мощность $P_n(t)$, поступающую в электропечь и представляющую собой скалярное произведение тока I на напряжение U . В ЭШП управление источником питания реализуется в виде ступенчатых изменений напряжения U по программе, определяемой из условий протекания технологического процесса. Обычно напряжение задаётся и поддерживается неизменным на отдельных отрезках времени t . Задавая напряжение, задают тем самым определённое значение мощности источника питания $P_n(t)$. Выбранное с учётом потерь и технологических требований это значение может быть представлено двумя слагаемыми: максимальной полезной мощностью $P_n(t)_{\max}$, поступающей в электропечь, и мощностью потерь $P_{ном}(I)$. В этом смысле $P_n(t)$ можно рассматривать как максимальную мощность, которую может развить источник питания в данный момент времени при данных условиях.

Если при таком подходе в качестве критерия оптимального управления выбирается величина, характеризующая $P_n(t)$, то решение задачи можно искать в виде функции $U(I)$. Однако, искать решение в таком виде неудобно, так как по самому смыслу задачи функция $U(I)$ неоднозначна, поэтому решение целесообразно искать в параметрической форме $I = I(t)$, $U = U(t)$. Если учесть, что мощность это площадь $S[I(t), U(t)]$, то при этом требуется определить экстремум функционала:

$$S[I(t), U(t)] = \frac{1}{2} \int_0^T (U \frac{dI}{dt} + I \frac{dU}{dt}) dt \quad (1)$$

при наличии своеобразного условия:

$$L = \int_0^T \sqrt{\left(\frac{dI}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dU}{dt}\right)^2} dt, \quad (2)$$

где L – постоянная;

T – время протекания процесса.

Другими словами при заданном параметре требуется найти максимальную площадь.

Поскольку ЭШП в подавляющем большинстве случаев работает на переменном токе промышленной частоты Ω , то для мгновенных значений тока и напряжения силовой электрической цепи можно записать

$$i = I_m \sin \Omega t, \quad u = r I_m \sin \Omega t + (X_L - X_C) I_m \cos \Omega t$$

где I_m – амплитудное значение тока;

r, X_L, X_C – активное, индуктивное и ёмкостное сопротивление силовой цепи электропечи.

Определив из этих соотношений $\frac{di}{dt}$ и $\frac{du}{dt}$, казалось бы, нетрудно получить уравнение связи, однако это некорректно, так как получаемые функции не являются близкими в смысле близости первого порядка по отношению к ранее рассматривавшимся функциям [4].

Поэтому уравнения связи представим в таком виде:

$$\begin{aligned}\frac{dI}{dt} &= \frac{dI[\Omega, \varphi(t), t]}{dt}, \\ \frac{dU}{dt} &= \frac{dU[\Omega, \varphi(t), t]}{dt},\end{aligned}\quad (3)$$

где $\varphi(t)$ – фазовый сдвиг между током и напряжением силовой цепи.

С учётом граничных условий, условий протекания технологического процесса и уравнений (1 и 3) получаем вариационную задачу на условный экстремум. Её главная особенность в том, что требуется найти экстремум одного функционала при условии, что другой функционал сохраняет постоянное значение l .

Для решения этой задачи можно составить вспомогательный функционал [1]:

$$J(U, I) = \int_0^T \left[\frac{1}{2} \left(U \frac{dI}{dt} - I \frac{dU}{dt} \right) + \lambda_1 \left(\frac{dI}{dt} - \frac{dI[\Omega, \varphi(t), t]}{dt} \right) + \lambda_2 \left(\frac{dU}{dt} - \frac{dU[\Omega, \varphi(t), t]}{dt} \right) \right] dt \quad (4)$$

и получить уравнения Эйлера-Лагранжа для этого функционала.

Если выбрать произвольные постоянные равными нулю за счет параллельного переноса осей координат, то можно найти $\lambda_1 = -U$, $\lambda_2 = I$ и можно получить экстремали функционала.

Из этого уравнения следует, что для достижения и поддержания оптимального электрического режима, т. е. режима, при котором в печь поступает максимально полезная мощность $P_n(t)_{\max}$, одного воздействия на $P_n(t)$ недостаточно. Для этого необходимо воздействовать и на полное сопротивление печи или на коэффициент мощности установки, который можно регулировать посредством изменения положения электродов в ванне. При изменении коэффициента мощности изображающая точка, характеризующая мощность, поступающую в шлаковую ванну, перемещается в фазовой области, т. е. в координатах «мощность-фаза». При перемещении она проходит и через точку оптимального режима, характеризуемого заданными значениями отношения активного сопротивления цепи к полному сопротивлению силовой цепи. Очевидно, вблизи оптимального режима будет наблюдаться: $U\Delta I + I\Delta U = \Delta P_p(t)$, где $\Delta P_p(t)$ можно рассматривать как недоиспользованную мощность источника питания, возникающую в результате отклонения от оптимального электрического режима.

Тогда для мощности, поступающей в установку можно записать:

$$P_n(t) = P_H(t) - P_{nom}(I) - \Delta P_p(t),$$

где $P_n(t)$ – активная полезная мощность;

$P_H(t)$ – текущее значение мощности, установленной для источника питания, исходя из условий протекания технологического процесса;

$P_{ном}(I)$ – мощность потерь в силовой цепи электропечи.

Очевидно, при правильном выборе $P_H(t)$ и $\Delta P_p(t) = 0$ в электропечи поддерживается оптимальный режим:

$$P_n(t) = P_n(t)_{\max}.$$

При этом траектория, образованная значениями $P_n(t)_{\max}$ дрейфует в фазовой области. В настоящее время оперативное измерение смещений максимума мощности в фазовой области не производится из-за трудности реализации такого измерения. Вторым затруднением является неоднозначность величины $P_n(t)$ в процессе работы. Связано это с тем, что в соответствии с требованиями технологического процесса необходимо на различных временных отрезках задавать различные значения мощности $P_H(t)$. Это приводит к тому, что на каждом участке должна быть своя величина оптимального значения критерия. Избавиться от этой неоднозначности можно, если использовать в качестве целевой функции не $P_n(t)$, а нормированное её значение, т. е.:

$$K_n(t) = \frac{P_n(t)}{P_H(t)}.$$

Такое доопределение целевой функции не вносит элементов субъективизма и позволяет вести процесс по коэффициенту использования мощности источника питания, который при определённых условиях сводится к общеизвестному КПД и однозначно характеризует процесс на всех временных отрезках.

При этом, как отмечалось ранее, актуальность проблемы связана с отсутствием общепринятого универсального критерия оценки энергетической эффективности отдельных элементов силового канала ЭТУ и оценки его эффективности как потребителя электроэнергии, функционирующего в режиме реального времени.

Затруднения при использовании широко распространённого критерия КПД в этих ситуациях связаны, во-первых, с неопределённостью в силу неоднонаправленности потока энергии понятия полезной мощности или энергии, во-вторых, с многоэлементностью силового канала и неодинаковостью энергетических свойств отдельных элементов и, в-третьих, с объективной сложностью временной характеристики процесса передачи и преобразования энергии в конкретных условиях [5]. Указанные причины порождают неопределённость оценок эффективности энергетических процессов и, следовательно, несопоставимость полученных на их основе результатов.

Несовершенство критерия оценки эффективности передачи и преобразования энергии приводит в настоящее время к существенному снижению результативности технических мероприятий, направленных на экономию электроэнергии, затрудняет получение объективных сравнительных оценок качества различных технических решений.

Неоднозначность общепринятого критерия приводит к несовершенству алгоритмов определения расчётных затрат и цены электроэнергии, расходуемой на различные технологические операции; в них, как правило, не учитывается степень эффективности потребления и преобразования энергии, т. е. не стимулируется энергосбережение.

Ставить и решать эту проблему в полном объёме только с применением существующих разработок, по-видимому, преждевременно. Поэтому на первом этапе сформулируем задачу выбора с применением критерия оптимального управления коэффициента использования мощности источника питания $K_n(t)$. Применительно к ЭШП она может быть записана следующим образом:

$$K_n(t) = \frac{P_H(t) - P_{nom}(I) - (U\Delta I + I\Delta U)}{P_H(t)} \rightarrow \max \quad (5)$$

при ограничениях $U \leq U_{доп}$; $I \leq I_{доп}$ $d \leq \cos\varphi \leq b$,

где $U_{доп}$, $I_{доп}$ максимально допустимые значения для электрошлаковой печи по напряжению и току на данном этапе технологического процесса;

d, b – диапазон, внутри которого дрейфует оптимальное значение коэффициента мощности.

ВЫВОДЫ

Таким образом, с учётом отмеченных ограничений алгоритм оптимального управления можно записать в виде следующего предписания:

1) пользуясь доступными для измерения величинами U и I , оперативно определять положение максимума полезной мощности в фазовой области;

2) измеряя величины U, I и их приращения, вычислять в фазовой области отклонения от оптимального электрического режима $\Delta P_p(t)$;

3) оказывая воздействие на переменные управления, поддерживать $\Delta P_p(t) \rightarrow 0$, при этом $K_n(t) \rightarrow \max$;

4) определяя с помощью имеющейся в существующей системе микро-ЭВМ текущее значение мощности, потребляемой ЭШП и сопоставляя его с заданным значением мощности, регулировать переменные управления до устранения рассогласования.

Такой подход перспективен, поскольку снижает размерность поставленной задачи. Это упрощает решение и в плане физической реализации представляет ряд возможностей, ранее не использовавшихся при управлении электропечью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В. А. Теория оптимальных систем автоматического управления / В. А. Иванов, Н. В. Фалдин. – М. : Наука, 1981. – 336 с.
2. Цыганаиш В. Е. Частотный метод управления мощными энергопотребителями / В. Е. Цыганаиш // *Металлургическая горнорудная промышленность*. – 2009. – № 2. – С. 120–123.
3. Пищулина Е. В. Критериальная оценка качества управления электрическим режимом печи электрошлакового переплава / Е. В. Пищулина, В. Е. Цыганаиш // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения : Междунар. сб. науч. тр.* – Донецк : ДонГТУ, 2000. – Вып. 13. – С. 85–89.
4. Цыганаиш В. Е. О стабильности и устойчивости системы управления мощным энерго-потребителем / В. Е. Цыганаиш // *Металлургическая горнорудная промышленность*. – 2013. – № 3. – С. 137–140.
5. Васильев Б. Ю. *Электропривод. Энергетика электропривода* / Б. Ю. Васильев. – М. : СОЛОН-Пресс, 2015. – 270 с.

Статья поступила в редакцию 25.02.2019 г.