

УДК 62-83.004.15

**Цыганаш В. Е.**

## **РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МОЩНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБИТЕЛЯ**

При управлении сложной технологической системой (ТС) неизменно наличие единства и взаимосвязи трех элементов: модели, критерия и алгоритма. Функционально это проявляется в том, что при реализации алгоритма добавляются ограничения по его функционированию (модель) и цель функционирования (критерий).

Особая роль в этой взаимосвязи принадлежит критерию оптимальности. Его выбор является сложной методологической проблемой, и, как правило, может производиться неоднозначно. Источником сложности этой проблемы, прежде всего, служит противоречивость целей, преследуемых при разработке системы управления. Стоимость и надежность функционирования, энергоемкость и производительность, микроминиатюризация и массогабаритные параметры всегда находились, и будут находиться в противоречии друг с другом.

В литературе нет единых требований к критериям. Так в работе [1] указывается, что критерий должен:

- отражать интересы «потребителя»;
- достаточно полно характеризовать исследуемую систему;
- давать возможность выбора оптимального (или приемлемого) варианта построения системы;

– быть обозримым и удобным для вычислений.

Если следовать монографии [2], то критерий должен быть:

- количественным и однозначным;
- статистически эффективным;
- простым, иметь ясный физический смысл;
- единственным.

Рассуждения о требованиях к критериям находим также и в других работах [3, 4] применительно к различным ситуациям. Отличаясь между собой, они в то же время имеют общие характеристики, которые можно сформулировать следующим образом: критерий должен носить количественный характер; вычисляться достаточно просто и однозначно.

При оптимальном управлении производственными процессами с использованием вычислительных средств одним из главных должно быть требование экономической эффективности системы автоматизации. Однако осуществлять управление, реализуя непосредственно только экономический критерий (вычисляя его как разность стоимости готового продукта и стоимости сырья, энергии, рабочей силы и прочих затрат и максимизируя эту разность), возможно далеко не всегда. Объясняется это тем, что для многих инерционных производств (машиностроительных, тепловых, нефтеперерабатывающих, металлургических и др.) общие экономические категории можно с приемлемой точностью определить в течение длительного периода времени (обычно несколько дней), тогда как управляющие воздействия необходимо формировать и реализовывать как компенсацию различных возмущений и помех со значительно большей частотой, чаще всего в темпе хода технологического процесса. В таких случаях экономические критерии становятся бессильными. Выход из положения заключается в формировании некоторых частных критериев оптимальности, которые быстро и точно определяются, имеют связь с экономическими категориями процесса, с одной стороны, и параметрами технологического процесса, с другой.

Целью настоящей работы является выбор и обоснование такого критерия оптимального управления энергопотребителем, который бы не только удовлетворял всем требованиям,

но и обеспечивал бы возможность решения оптимизационной задачи «в большом», то есть позволял бы использовать на каждом этапе или режиме функционирования системы все располагаемые ресурсы (энергетические, информационные, вычислительные и др.) при соблюдении множества ограничений.

Как показывает практика [5], одним из наиболее эффективных критериев оптимального управления энергопотреблением может быть коэффициент использования мощности источника питания  $Kп(t)$ . Его связь с ключевыми параметрами технологического процесса открывает перспективу особо тесного взаимодействия с моделью. Это важно в технических задачах регулирования, в особенности, в задачах оптимального управления мощными энергопотребителями, так как при этом возникает необходимость в процедурах измерения (оценки) и фильтрации. Алгоритмы управления, полученные в результате применения вариационного исчисления, динамического программирования или принципа максимума, требуют обычно для своего применения знания всего вектора состояния регулируемого объекта. Классического регулирования по принципу обратной связи, основанного лишь на знании выходных величин, более уже недостаточно. Напротив, возникает проблема – по результатам измерений выходных величин определить вектор состояния системы. Чтобы упростить решение этой проблемы можно пойти по пути разработки модели динамического процесса. Экспериментальные методы разработки таких моделей, используемые в классическом анализе следящих систем, состоят в применении синусоидальных колебаний различной частоты или ступенчатых функций для оказания возбуждающего воздействия на процесс. Для определения коэффициентов дифференциальных уравнений анализируется реакция процесса на эти возмущения. Тип дифференциального уравнения, предназначенного для использования в качестве модели физического процесса, выбирается априори до проведения опытов.

К сожалению, эксперименты, связанные с получением спектральных характеристик или с исследованием реакции процесса на ступенчатые функции трудно проводить на типичных гидравлических, энергетических и тепловых процессах, так как соображения стоимости и безопасности могут воспрепятствовать проведению любых экспериментов, нарушающих процесс или выводящих его из обычного режима. Кроме того, для установки и демонтажа контрольно-измерительной аппаратуры, необходимой для проведения экспериментов, могут потребоваться дорогостоящие простои оборудования.

В данном случае лучше воспользоваться обобщенным экспериментальным методом построения динамической модели, предложенным Калманом [6]. Он имеет следующие преимущества:

- процесс не нарушается;
- не требуется специального приборного оборудования;
- необходимы только экспериментальные данные, получаемые через равные промежутки времени (регистрация данных и вычисления легко выполняются системой машинного управления процессом или с помощью самой динамической модели).

Не менее важным является и то обстоятельство, что измерение и фильтрация, с одной стороны, и управление и регулирование, с другой стороны, находятся друг с другом в некоторой замечательной взаимосвязи, которая впервые была выяснена Калманом и сформулирована им как принцип двойственности [7].

В общем случае метод разработки моделей динамических физических процессов предусматривает пять этапов:

1. Выбор определенного типа разностного уравнения для построения динамической модели физического процесса.
2. Проведение экспериментов для регистрации данных, получаемых через равные интервалы времени.

3. Группировка экспериментальных данных таким образом, чтобы все предыдущие данные, необходимые для вычисления переменной состояния при помощи разностного уравнения, были собраны вместе.

4. Отыскание таких значений коэффициентов разностного уравнения, при которых сумма квадратов ошибок (т. е. квадратов разностей между вычислениями в модели и измеренными в ходе экспериментов значениями переменной состояния) являлась минимальной.

5. Опробование других типов разностных уравнений и повторение этапов 1–4 для выбора конкретного разностного уравнения, дающего меньшую сумму квадратов ошибок.

Обобщая рассмотренное, подчеркнем, что конечной целью разработки является синтез адаптивной системы управления, реализующей заданный технологический алгоритм. При этом системная адаптация должна рассматриваться в первую очередь как стратегия, обеспечивающая достижение глобальной целевой функции (т. е. оптимизацию критерия, характеризующего эффективность управления при заданных ограничениях, прежде всего на качество выходного продукта) в условиях неполной априорной информации о характеристиках объекта управления и внешнего окружения, влияющего на процесс. Из этого следует, что формулировка целевой функции для системы управления сложными технологическими процессами представляет собой достаточно серьезную технико-экономическую задачу, выходящую за рамки теории оптимизации. Поэтому, несмотря на необходимость поддержания достаточно высоких абсолютных значений критерия, часто приходится удовлетворяться достижением не абсолютной, а относительной оптимальности управления, что отражает естественное желание совершенствовать систему, делая ее технические показатели лучше, стоимость сырья и энергоемкость меньше и т. д. Несмотря на то, что теория и особенно практика разработки оптимальных адаптивных систем еще не получили достаточного развития в системах технологического управления, проблема оптимизации имеет для них настолько принципиальное значение, а ее решение обещает такие технико-экономические результаты, что этот аспект разработки должен рассматриваться уже на первых стадиях синтеза систем управления.

Рассмотрим, какие возможности в этом плане могут быть представлены  $K_n(t)$ , например, при преобразовании энергии в электромеханической системе [5]. Приняв во внимание, что для таких систем, как и для большинства энергопотребителей, характерно наличие максимума КПД в области допустимых значений переменных, запишем:

$$K_n(t) = \frac{P_n(t) - P_{\text{пот}}(I) - \Delta P_p(t)}{P_n(t)} = \frac{P_n(t) - P_{\text{пот}}(I) - (U\Delta I + I\Delta U)}{P_n(t)}, \quad (1)$$

где  $P_n(t) = UI$  – фактическая мощность, отдаваемая источником питания в нагрузку;  $P_{\text{пот}}(I)$  – мощность потерь, зависящая от тока  $I$  силовой цепи;  $\Delta P_p(t)$  – недоиспользованная мощность источника питания, возникающая в результате отклонения от оптимального режима по току на  $\Delta I$  и по напряжению на  $\Delta U$ ;  $U$  – напряжение на нагрузке;  $t$  – время.

Если через  $P_n(t)$  обозначить полезную мощность, которая полностью преобразуется в механическую работу, то для оптимального режима в системе при правильном выборе  $P_n(t)$  и  $\Delta P_p(t) = 0$  будет выполняться  $P_n(t) = P_n(t)_{\text{max}}$ . Для выхода на этот режим и его поддержания в процессе работы энергопотребителя необходимо выполнение, по крайней мере, двух условий:

1) чтобы фактическая мощность, отдаваемая источником питания в нагрузку, была близкой к максимальной;

2) чтобы относительные отклонения мощности определялись именно от этого значения, т. е. относительно  $P_n(t)_{\text{max}}$ .

Более детальное рассмотрение показывает, что безразмерная форма частных критериев  $P_n(t)$ ,  $P_{nom}(I)$  и  $\Delta P_p(t)$  в формуле (1) базируется на уравнении баланса мощностей и поэтому носит объективный характер. Это подкрепляется и существенной ролью вектора параметров  $U$  и  $I$ . Эта роль обусловлена абсолютными значениями  $P_n(t)$ ,  $P_{nom}(I)$  и аддитивным характером связи между ними. Недостатком такого представления является возможность взаимной компенсации этих частных критериев и необходимость их выбора на основе волевых решений оператора, принимающего решения исходя из технологических, электрических и эксплуатационных требований к процессу. Чтобы оператору успешно (без запаздываний) решать задачу выбора на основе использования принципа справедливой компенсации абсолютных значений нормированных частных критериев  $P_n(t)$  и  $P_{nom}(I)$  необходим медленный характер их изменения (медленное движение) и возможность точной фиксации изображающей точки при достижении максимума [8]. Если первое условие достигается в рамках аддитивного критерия, то второе условие может быть достигнуто только при применении мультипликативности в  $K_n(t)$ . Это реализуется в третьем частном критерии  $\Delta P_p(t)$ . При достижении экстремали и поддержании условий  $\Delta I \ll I$ ,  $\Delta U \ll U$  выполняется:

$$\frac{\Delta P_p(t)}{UI} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} = \sum_{i=1}^2 d(\ln F(U, I)) = d(\ln \prod_{i=1}^2 F(U, I)) = 0. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что принцип справедливой относительной компенсации приводит к мультипликативному частному критерию оптимальности:

$$F(U, I) = UI. \quad (3)$$

Выражение (3) подтверждает, что отклонения от экстремали определяются именно относительно значения фактической мощности, отдаваемой источником питания в нагрузку. Интересно отметить, что поддержание  $F(U, I)$  вблизи максимума устраняет отрицательную тенденцию сглаживания уровня составляющих за счет их неравнозначных первоначальных значений.

Кроме подтверждения существенной роли изменения абсолютных и относительных значений частных критериев при вариации вектора переменных  $U$  и  $I$ , ключевая роль этого частного критерия проявляется и в том, что с его помощью может быть установлено соответствие частотного метода анализа с требованием к системе во временной области, а именно, с требованием нахождения взаимосвязи между пространством сигналов, представленных в фазо-частотной области, и переменными системы управления [9]. Для широкого класса экстремальных задач за основу можно взять фундаментальное равенство мощности  $P$  сигнала как функции времени  $t$  и мощности как суммы отдельных спектральных составляющих  $W_\kappa$ ,  $\kappa = 0, 1, 2, \dots, n$ , т. е.:

$$P(t) = \sum_{\kappa=0}^n P(\Omega_\kappa).$$

Это равенство имеет ряд удобных свойств. Принципиальным его преимуществом является возможность достаточно полного математического исследования, в частности, при установлении условий экстремума, а также легкость, с которой это равенство можно выразить через линейное отображение сигналов [10]. Получаемые при этом решения характеризуются, как правило, завершенностью. Они в наибольшей степени доступны для реализации. Другое преимущество состоит в том, что квадратичный функционал, созданный на основе этого равенства, выражает величины, которым легко придать физическое содержание, и которые широко применяются в теории систем автоматического управления. Особенно удобным

такой подход является для решения экстремальных задач, у которых энергетические преобразования в ТС играют определяющую роль для исследуемых процессов. Как уже отмечалось, в таких системах проще решается и проблема измерения составляющих, формирующих значение функционала. Благодаря этому в процессе управления ТС открывается возможность определения и поддержания рабочей точки на экстремали поверхности отклика, опираясь на информацию о спектральных составах входных сигналов. Это хорошо подтверждается в промышленных условиях на плавильных печах. Так его внедрение на индукционной плавильной печи ИСТ – 1М и дуговой сталеплавильной печи ДСП – 12 позволяет сократить расход электроэнергии и время плавки на 3–8 %.

## ВЫВОДЫ

В плане технической реализации критерий интересен тем, что предоставляет ряд возможностей, ранее не использовавшихся при управлении мощными энергопотребителями. Его опробование в лабораторных и промышленных условиях подтверждает это.

1. За основу при определении критерия взят принцип взаимности. Его сущность заключается в том, что при оптимальном энергетическом режиме цепи для преобразования электрической энергии в механическую работу поступает максимальная мощность  $P_n(t)_{max}$  при  $P_n(t) = const$ , равно как и при  $P_n(t)_{max} = const$  потребитель отбирает из сети минимальную мощность.

2. При определении критерия с помощью модели, последняя может выполнять функции аналогового вычислителя, который определяет отклонение от оптимального режима в темпе хода технологического процесса, т. е. без запаздывания.

3. Критерий имеет ясную структуру, полно и однозначно характеризует фактическую эффективность энергетического процесса, т. е. позволяет оценивать в любой конкретной ситуации, какова удельная мера потерь энергии, сопровождающих реализуемый процесс. Его нормированное значение открывает возможность оптимального управления энергетическим режимом системы на всех этапах ее работы по единому критерию. Комбинированный характер критерия позволяет использовать для управления процессом как абсолютные составляющие, характеризующие медленные движения, так и относительную составляющую.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В. В. *Принципы математического моделирования химико-технологических систем* / В. В. Кафаров, В. Л. Перов, В. П. Мешалкин. – М. : Химия, 1974. – 322 с.
2. Ицкович Э. Л. *Алгоритмы централизованного контроля управления производством* / Э. Л. Ицкович, Э. А. Трахтенгерц. – М. : Радио, 1977. – 372 с.
3. Ильинский Н. Ф. *Критерий эффективности процесса электромеханического преобразования энергии* / Н. Ф. Ильинский, А. О. Горнов // *Электричество*. – 1987. – № 10. – С. 24–29.
4. Каблуковский А. Ф. *Производство стали и ферросплавов* / А. Ф. Каблуковский. – М. : ИКЦ Академкнига, 2003. – 511 с.
5. Цыганаш В. Е. *Системный анализ энергетических преобразований в технологической системе* / В. Е. Цыганаш // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць* : Краматорськ. – 2000. – Вип. 10. – С. 49–53.
6. Калман Р. Е. *Об общей теории систем управления* / Р. Е. Калман // *Труды I конгресса ИФАК*. – Т. 2. – М. : АН СССР, 1961. – С. 521–547.
7. Браммер К. *Фильтр Калмана – Бьюси* / К. Браммер, Г. Зиффлинг ; пер. с нем. В. Б. Колмановского. – М. : Наука, 1982. – 200 с.
8. Цыганаш В. Е. *Особенности двухэтапного решения оптимизационной задачи для сложной технологической системы* / В. Е. Цыганаш // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 6. – С. 105–109.
9. Цыганаш В. Е. *Частотный метод оптимального управления мощными энергопотребителями* / В. Е. Цыганаш // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 2. – С. 120–123.
10. Френк Л. *Теория сигналов* / Л. Френк ; пер. с англ. М. Р. Краевской, Р. М. Седлецкого. – М. : Сов. Радио, 1974. – 344 с.