

УДК 622.276.6:661.96:532.528

*Показано, що на основі кореляції можна забезпечити оптимізацію в цілому складних процесів енергоперетворення. Оскільки цілісне представлення процесів енергоперетворення надзвичайно складне, то, переходячи до представлення процесів у вигляді узагальненого ряду Фур'є, можна значною мірою спростити процедуру оптимізації, зводячи її до поелементної*

*Ключові слова: складні процеси енергоперетворення, узагальнений ряд Фур'є, кореляція, оптимізація, базисні компоненти*

*Показано, что на основе корреляции можно обеспечить оптимизацию в целом сложных процессов энергопреобразования. Поскольку целостное представление процессов энергопреобразования чрезвычайно сложно, то, переходя к представлению в виде обобщенного ряда Фурье, можно в значительной мере упростить процедуру оптимизации, сводя ее к поэлементной*

*Ключевые слова: сложные процессы энергопреобразования, обобщенный ряд Фурье, корреляция, оптимизация, базисные компоненты*

*It is set by the authors, that on the basis of correlation it is possible to provide optimization of complex energy-transducing processes on the whole. As integral presentation of energy-transducing processes is extraordinarily difficult, so turning to presentation of processes as the generalized Fourier series, it is possible to simplify procedure of optimization to a great extent, investigating its separate elements*

*Keywords: complex energy-transducing processes, generalized Fourier series, correlation, optimization, basic components*

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ И ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ ЭНЕРГО- ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

**О. В. Кравченко**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
заместитель директора по научной работе, заведующий  
отделом\*

**И. Г. Суворова**

Доктор технических наук, профессор, ведущий научный  
сотрудник\*

**Н. П. Суворов**

Кандидат технических наук, профессор, ведущий научный  
сотрудник\*

\*Отдел нетрадиционных энерготехнологий  
Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН  
Украины  
ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046  
Контактный тел.: (0572) 95-96-07  
E-mail: sig@ipmach.kharkov.ua

## 1. Введение

В условиях постоянного роста потребления нефти и газа актуальным является разработка новых нетрадиционных эффективных и экологически безопасных технологий добычи, переработки и потребления углеводородных энергоносителей. Упомянутые выше технологии можно рассматривать в виде большой системы процессов энергопреобразования [1 – 8], к которой относится любая совокупность элементов, функционирование которых взаимосвязано и направлено на достижение определенной единой цели.

Современные требования к показателям эффективности и экологической безопасности диктуют необходимость повышения качества функционирования систем энергопреобразования, что, в свою очередь, достигается за счет мероприятий по оптимизации применяемых процессов и технологий. Работу в этом направлении необходимо начать с построения систем энергопреобразования.

## 2. Теоретические основы построения систем энергопреобразования

Система энергопреобразования – это большая система, состоящая из совокупности элементарных. Математически большая система может быть представлена совокупностью подсистем в виде ряда [9]

$$S = \sum_{k=1}^n S_k, \quad (1)$$

где  $n$  – размерность, или число подсистем большой системы,

$S_k$  – независимые подсистемы энергопреобразования, в частности:

- интенсификация добычи углеводородного сырья в скважине;
- гидрокавитационная обработка углеводородных энергоносителей;
- подготовка топлив и аппараты, их реализующие;
- сжигание композитных суспензионных горючих.

Каждую подсистему  $S_k$  большой системы энергопреобразования  $S$  можно представить в виде обобщенного ряда Фурье – составной структуры, состоящей из  $m$  процессов:

$$S_k = \sum_{j=1}^m c_{jk} \eta_j, \quad k=1,2,3,\dots,n, \quad (2)$$

а система (1) с учетом (2) запишется в виде:

$$S = \sum_{k=1}^n S_k = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m c_{kj} \eta_j. \quad (3)$$

Коэффициенты разложения  $c_{kj}$  имеют энергетическую природу,  $\eta_j$  – ортонормированные базисные компоненты.

Приведенное представление необходимо при рассмотрении оптимизации процессов и технологий в системах энергопреобразования.

Определение: Множество  $A$  называется эквивалентным множеству  $B$ , если существует биекция  $f:A \rightarrow B$ . В этом случае говорят также, что множество  $A$  имеет одинаковую мощность с множеством  $B$ . Обозначение:  $A \sim B$  или  $A = B$ .

В дальнейшем будем полагать, что между системой энергопреобразования  $S$  и процессом энергопреобразования  $S(t)$ , исследуемых на временном множестве  $\{t\}$  – интервале наблюдения, установлено взаимно однозначное отображение (взаимно однозначное соответствие) – биекция [10, 11]. Множества, для которых существует биекция, называются равномоными.

### 3. Оптимизация процессов и технологий в системах энергопреобразования

Пусть  $S(t)$  – любой процесс энергопреобразования;

$S_s(t)$  – эталонный процесс;

В основе научной парадигмы оптимизации процессов и технологий систем энергопреобразования лежит способ сравнения эталонных  $S_s(t)$  и реальных  $S(t)$  процессов. Операция сравнения, с математической точки зрения, реализуется на основе использования функции корреляции.

Критерием оптимальности системы энергопреобразования является модуль разности эталонного и реального процессов, по линейному отклонению  $|S_s(t) - S(t)|$  либо среднеквадратичному  $|S_s(t) - S(t)|^2$ . Отмеченные линейные и квадратичные величины могут быть детерминированными или стохастическими (вероятностными) [12].

Рассмотрим среднеквадратичную величину на временном множестве  $\{t\}$ :  $|S_s(t) - S(t)|^2$ .

Общая постановка задачи нахождения наилучшего приближения к функции  $f(x)$ , в соответствии с критерием минимума среднего квадратичного отклонения, формулируется следующим образом [13].

Из всех линейных комбинаций первых  $n+1$  функций  $\phi$  разложения в ряд некоторой функции  $\sigma_n(x)$ ,

$$\sigma_n(x) = \gamma_0 \phi_0(x) + \gamma_1 \phi_1(x) + \dots + \gamma_n \phi_n(x) \quad (4)$$

при произвольном наборе коэффициентов  $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_n$  найти ту, которая осуществляет наилучшее

– в смысле среднего квадратичного отклонения – приближение к функции  $f(x)$ . Иными словами, требуется добиться наименьшего значения для величины

$$\Delta_n = \int_a^b [f(x) - \sigma_n(x)]^2 dx. \quad (5)$$

Если это достигается, то говорят, что сумма  $\sigma_n(x)$  сходится к функции  $f(x)$  «в среднем» (что вовсе не предполагает «точечной» сходимости  $\sigma_n(x)$  к  $f(x)$  в обычном смысле слова).

В нашем случае задача нахождения минимума среднеквадратичного отклонения сводится к минимизации следующего функционала

$$I = \int_{\{t\}} (S_s(t) - S(t))^2 dt = \int_{\{t\}} S_s^2(t) dt - 2 \int_{\{t\}} S_s(t) S(t) dt + \int_{\{t\}} S^2(t) dt = 2E_0 - 2 \int_{\{t\}} S_s(t) S(t) dt. \quad (6)$$

$\int_{\{t\}} S_s^2(t) dt$  – энергия эталонного процесса, и энергия  $\int_{\{t\}} S^2(t) dt$  исследуемого процесса принимаются на интервале наблюдения  $\{t\}$  постоянными и равными, обозначим их  $E_0$ . Таким образом, минимизация (6) сводится к нахождению экстремума следующего функционала

$$I = \int_{\{t\}} S_s(t) S(t) dt. \quad (7)$$

Положим, для простоты анализа, что  $S_s(t) = S(t+x(t))$ . Здесь  $x(t)$  – параметр рассогласования эталонного и реального процессов.

Как следует из выражения (7), корреляция, или операция свертки позволяет провести оптимизацию в целом сложных процессов энергопреобразования.

Поскольку целостное представление процессов энергопреобразования чрезвычайно сложно, то, переходя к представлению процессов в виде обобщенного ряда Фурье, можно в значительной мере упростить процедуру оптимизации, сводя ее к элементарной.

Представим функционал (7) в виде

$$I = \sum_{k=1}^n I_k, \quad (8)$$

где  $n$  – число исследуемых процессов,  $I_k$  – представление  $k$ -ого процесса энергопреобразования. Таким образом, минимизация функционала  $I$  сведется к минимизации на множестве  $\{t\}$  суммы интегралов

$$I = \int_{\{t\}} \sum_{k=1}^n S_k(t) S_k(t+x(t)) dt = \sum_{k=1}^n \int_{\{t\}} S_k(t) S_k(t+x(t)) dt, \quad (9)$$

$S_k(t)$  и  $S_k(t+x(t))$  определены ранее, как сложные составные структуры (2), зависящие от энергетических параметров и могут быть представлены с помощью обобщенного ряда Фурье в следующем виде:

$$S_k(t) = \sum_{i=1}^m c_{ki} \eta_i(t), \quad (10)$$

$$S_k(t+x) = \sum_{j=1}^m c_{kj} \eta_j(t+x(t)). \quad (11)$$

Для простоты изложения размерность в (10) и (11) принята одинаковой.

Подставив (10) и (11) в (9) получим следующее выражение

$$I = \sum_{k=1}^n \int_{\{t\}} \sum_{i=1}^m c_{ki} \eta_i(t) \sum_{j=1}^m c_{kj} \eta_j(t+x(t)) dt. \quad (12)$$

С учетом ортогональности членов обобщенного ряда Фурье имеем:

$$\int_{\{t\}} \sum_{i=1}^m c_{ki} \eta_i(t) \sum_{j=1}^m c_{kj} \eta_j(t+x(t)) = \begin{cases} i \neq j, & 0 \\ i = j, & \int_{\{t\}} \sum_{i=1}^m c_{ki}^2 \eta_i(t) \eta_i(t+x(t)). \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, функционал (12) можно представить в виде:

$$I = \sum_{k=1}^n \int_{\{t\}} \sum_{i=1}^m c_{ki}^2 \eta_i(t) \eta_i(t+x(t)) dt = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m c_{ki}^2 \int_{\{t\}} \eta_i(t) \eta_i(t+x(t)) dt = \sum_{k=1}^n E_k \rho_k(x(t)). \quad (14)$$

Здесь  $\rho_k(x(t))$  – коэффициент автокорреляции текущего компонента процесса с эталонным компонентом процесса. Когда параметр рассогласования  $x(t)$  стремится к 0, величина  $\rho_k(x(t)) \rightarrow 1$ . В этом случае достигается оптимальный режим энергопреобразования.

Поскольку процессы и технологии энергопреобразования являются независимыми, для каждого из них будет справедливо выражение

$$I_k = E_k \rho_k(x(t)), \quad k=1,2,\dots,n, \quad (15)$$

при этом оптимизация в целом трансформируется в совокупность поэлементных оптимизаций.

Для каждого процесса энергопреобразования функция  $\rho(x(t))$  может быть представлена в виде суммы, зависящей от текущих параметров – физических, химических, геометрических и др.

#### 4. Выводы

Теоретически разработан способ оптимизации процессов и технологий для построения экономически эффективных и экологически безопасных систем энергопреобразования. Использование обобщенного ряда Фурье для математического описания процессов и технологий позволило решить проблему оптимизации системы энергопреобразования в целом на основе поэлементной оптимизации базисных компонент.

#### Литература

1. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития [Текст]/ Л.А. Мелентьев. – М.: Наука, 1983. – 456с. – Библиогр.: С. 450 – 453. – 9000 экз.
2. Честнат Г. Техника больших систем (средства системотехники) [Текст]/ Г. Честнат; пер. с англ. М.Н. Васильева, Е.Н. Дубровского, А.С. Манделя, В.Ю. Невраева; под ред. О.И. Авена. – М.: Энергия, 1969. – 656с. – Библиогр.: С. 643 – 653. – 9000 экз.
3. Блауберг И.В. Системный подход: предпосылки, проблемы, трудности [Текст]/ И.В. Блауберг. – М.: Наука, 1969, – 274с. – Библиогр.: С. 272 – 273. – 9000 экз.
4. Месарович М.Д. Теория многоуровневых иерархических систем [Текст]/ М.Д. Месарович. – М.: Наука, 1971, – 483 с. – Библиогр.: С. 479 – 482. – 10000 экз.
5. Квейд Э. Анализ сложных систем [Текст]/ Э. Квейд. – М.: Сов. Радио, 1969, – 518с. – Библиогр.: С. 508 – 517. – 10000 экз.
6. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок [Текст]/ Л.С. Попырин. – М.: Энергия, 1978. – 416с. – Библиогр.: С. 406 – 415. – 9000 экз.
7. Шубенко-Шубин Л.А. Цели и основные принципы автоматизации турбин [Текст]: препринт/ Л.А. Шубенко-Шубин, А.А. Палагин; Ин-т проблем машиностроения АН УССР, –Х., 1975. – 40 с. – Библиогр.: С. 38 – 39. – 100 экз.
8. Шубенко-Шубин Л.А. Системный анализ и автоматизация проектирования энергетических турбоустановок [Текст] / Л.А. Шубенко-Шубин, А.А. Палагин// Электронное моделирование. – Киев, 1979. – В I. – С.90-95.
9. Кравченко О.В. Обобщенная модель системы формирования процессов и технологий повышения эффективности добычи, переработки и использования углеводородных энергоносителей [Текст] / О.В. Кравченко// Интегровані технології та енергозбереження. – Харьков; НТУ "ХПИ", 2008. – № 1. – С. 63 – 700. – 300 экз.
10. Верещагин Н.К. Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Часть 1. Начала теории множеств [Текст]: монография/ Н.К. Верещагин, А. Шень. – 2-е изд.; исправленное. – М.: МЦНМО, 2008. – 128с. – Библиогр.: С. 120 – 122. – 2000 экз. – ISBN 5-900916-36-7.
11. Ершов Ю.Л. Математическая логика [Текст]: учеб. пособ./Ю.Л. Ершов, Е.А. Палютин. – 4-е изд.; стереотип. – СПб.: Лань, 2005. – 336 с. – 2000 экз. – ISBN 5-8114-0533-2.
12. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники [Текст]: монография/ Б.Р. Левин. – М.: Советское радио, 1966. – 728 с. – Библиогр.: С. 39-40; 100; 167-168; 265-266; 332; 356; 416-417; 475; 519-520; 590-591; 660; 690. – 13000 экз.
13. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления [Текст]: учебник/ Г.М. Фихтенгольц. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – Т.III. – 728с. – 75000 экз. – ISBN 5-9221-0466-7.