## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 62-52

DOI:10.17587/mau.17.847-853

И. Ф. Нугаев, д-р техн. наук, проф., inugaev@yandex.ru,
 В. И. Васильев, д-р техн. наук, зав. каф., vasilyev@ugatu.ac.ru,
 Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

# Повышение энергоэффективности параллельных технологических систем на основе оптимального координированного управления процессами

Рассматривается подход к повышению энергоэффективности параллельных технологических систем, основанный на оптимальном координированном управлении процессами. Предложен принцип минимизации энергоемкости, основанный на оптимальном распределении производительностей процессов с учетом локальных возмущающих воздействий. Рассматривается способ реализации данного принципа на основе двухуровневой системы управления с координатором. Приведены аналитический и итерационный алгоритмы оптимального координирования. Рассматривается применение предложенного подхода для снижения энергоемкости нефтедобычи с использованием группы нефтедобывающих скважин.

**Ключевые слова:** энергоемкость производства, параллельная технологическая система, многоуровневая система управления, координированное управление, многопараметрическая оптимизация, группа нефтедобывающих скважин

#### Введение

Одним из основных показателей эффективности производства является его энергоемкость [1]. Актуальность снижения данного показателя связана как с вопросами снижения технологической себестоимости продукции, так и с общими вопросами энергосбережения. Снижение энергоемкости производства достигается, как правило, путем совершенствования технологических систем, включая разработку новых технологий, оборудования, материалов, инструментов и т.д. Наряду с указанным технологическим подходом, по мнению авторов, для снижения энергоемкости производства может быть успешно применен подход, основанный на оптимальном управлении элементами уже существующих технологических систем. При этом существенный эффект может быть достигнут при сравнительно низких материальных и временных затратах.

В статье рассматривается подход к снижению энергоемкости параллельных автоматизированных технологических систем на основе оптимального координированного управления локальными процессами. Согласно ГОСТ параллельная технологическая система — это технологическая система, подсистемы которой параллельно выполняют заданный технологический процесс или заданную технологическую операцию [2, 3, 9]. К подобным системам относятся такие системы, как группы производственных участков, цехов, энергетических и силовых установок, нефтедобывающих скважин и др. Производительность параллельной системы (объем

выпуска продукции в единицу времени) складывается из суммы производительностей всех ее процессов. Энергоемкость технологической системы определяется как отношение суммарной потребляемой энергии к суммарному объему ее продукции. Под автоматизированной параллельной системой понимается система, каждая подсистема которой имеет локальную систему автоматического управления (ЛСАУ) (рис. 1).

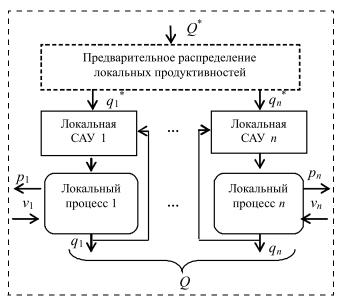


Рис. 1. Структура автоматизированной параллельной технологической системы

Задачами, регулируемыми с помощью ЛСАУ, являются обеспечение соответствия значений локальных производительностей процессов  $q_i$  их требуемым значениям  $q_i^*$ , i=1,...,n, в условиях локальных возмущающих воздействий  $v_1,...,v_n^*$ , таких как внешняя среда, засорение каналов потоков рабочих веществ, износ оборудования, качество сырья и др. Требуемые локальные производительности  $q_1^*$ , ...,  $q_n^*$  распределяются предварительно, как правило, равномерно, обеспечивая в сумме требуемую производительность  $Q^*$  всей технологиче-

ской системы: 
$$Q^* = \sum_{i=1}^{n} q_i^*$$
.

Энергоемкость продукции E технологической системы определяется как отношение суммарной потребляемой мощности P к суммарной производительности Q локальных подсистем:

$$E = \frac{P}{Q} = \sum_{i=1}^{n} p_i / \sum_{i=1}^{n} q_i.$$
 (1)

Потребляемая мощность *i*-го локального процесса  $p_i$  зависит от уровня локальной производительности  $q_i$  и от уровня случайных локальных возмущающих воздействий  $v_i$  и, следовательно, является случайной величиной:  $p_i = p_i(q_i, v_i)$ . В связи с этим энергоемкость продукции технологической системы также носит случайный характер:

$$E(q_i, ..., q_i, v_i, ..., v_i) = \sum_{i=1}^n p_i(q_i, v_i) / \sum_{i=1}^n q_i.$$

Таким образом, общая постановка задачи оптимальной работы параллельной технологической системы сводится к минимизации энергоемкости E путем выбора оптимального распределения производительностей  $q_i$  (i=1,2,...,n) локальных процессов в условиях возможных возмущающих воздействий  $v_i$  (i=1,2,...,n).

## 1. Принцип оптимального распределения производительностей

В основе предлагаемого принципа оптимального распределения производительностей локальных процессов лежит следующее утверждение: для уменьшения энергоемкости параллельной технологической системы E необходимо, в первую очередь, снизить производительности процессов с высоким уровнем возмущающих воздействий, обеспечивая при этом сохранение требуемой суммарной производительности  $Q^*$  за счет повышения производительности процессов с низким уровнем возмущающих воздействий. Данное утверждение основано на том, что процессы с высоким уровнем возмущающих воздействий, как правило, имеют повышенную локальную энергоемкость  $E_i = p_i/q_i$  по

сравнению с локальной энергоемкостью процессов с низким уровнем возмущающих воздействий.

Формально данный принцип можно представить как решение задачи многопараметрической оптимизации:

$$q_1^*, ..., q_n^* = \underset{q_1, ..., q_n}{\arg \min} \{ E(q_1, ..., q_n, v_1, ..., v_n) \}$$
 (2)

при выполнении ограничения:

$$\sum_{i=1}^n q_i^* = Q^*.$$

### 2. Структура системы координированного управления

Для минимизации энергоемкости параллельных технологических систем на основе указанного принципа предлагается построение их систем управления в классе двухуровневых систем управления с координатором (рис. 2) [4, 5, 10, 11].

Задача координатора в данном случае заключается в вычислении значений оптимальных локальных производительностей  $q_1^*$ , ...,  $q_n^*$ , обеспечивающих минимум суммарной энергоемкости E технологической системы, с учетом располагаемой информации о текущих значениях локальных возмущающих воздействий  $v_i$  (i=1,2,...,n). Результаты вычислений задающих воздействий (уставок)  $q_1^*$ , ...,  $q_n^*$  поступают в локальные САУ, которые реализуют их путем формирования соответствующих управляющих воздействий на локальные процессы.

### 3. Алгоритмы оптимального координирования

Формально координатор должен в реальном времени решать задачу многопараметрической оптимизации (2). Рассмотрим ниже аналитический и итерационный способы построения алгоритмов решения указанной задачи.

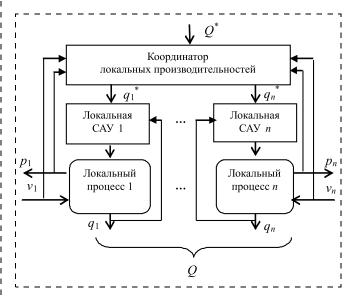


Рис. 2. Структура системы координированного управления параллельной технологической системой

 Аналитический алгоритм координирования проиессов

Аналитически представленная выше задача многопараметрической оптимизации с ограничением (2) решается на основе метода неопределенных множителей Лагранжа. Применение данного метода сводится к решению следующей системы уравнений Лагранжа:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(q_1, \dots, q_n, v_1, \dots, v_n, \lambda)}{\partial p_1} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial L(q_1, \dots, q_n, v_1, \dots, v_n, \lambda)}{\partial p_n} = 0; \\ \frac{\partial L(q_1, \dots, q_n, v_1, \dots, v_n, \lambda)}{\partial \lambda} = 0, \end{cases}$$

$$(3)$$

где  $L(q_1, \, ..., \, q_n; \, v_1, \, ..., \, v_n; \, \lambda)$  — функция Лагранжа:  $L(q_1, \, ..., \, q_n, \, v_1, \, ..., \, v_n, \, \lambda) =$ 

$$= E(q_1, ..., q_n, v_1, ..., v_n) + \lambda \left( \sum_{i=1}^n q_i - Q^* \right); \quad (4)$$

λ — неопределенный множитель Лагранжа.

В результате решения полученной системы из (n+1) нелинейных уравнений (4) определяются оптимальные значения локальных производительностей  $(q_1^*,...,q_n^*)$ .

Практическая реализация аналитического алгоритма может вызвать затруднения, связанные с выполнением следующих условий:

- а) в процессе работы системы требуется непрерывное измерение локальных возмущений  $v_1, ..., v_n$ ;
- б) требуется знание аналитической зависимости (математической модели) энергоемкости от локальных возмущений и производительностей:  $E(q_1, ..., q_n; \nu_1, ..., \nu_n)$ .

В связи с вышесказанным вместо аналитического алгоритма может быть использован итерационный алгоритм координирования процессов, реализация которого не требует выполнения указанных условий.

 Итерационный алгоритм координирования процессов

Данный алгоритм реализуется на основе активного поиска минимума энергоемкости E с использованием пробных приращений локальных производительностей  $q_i$  ( $i=1,\,2,\,...,\,n$ ) и состоит из следующих этапов:

1) задание множества текущих значений локальных производительностей  $\{q_1^{(k)},...,q_n^{(k)}\}$  в качестве начальных приближений (k=0) и определение начальной энергоемкости  $E^{(k)}$  путем измерения начальных потребляемых мощностей  $p_1,...,p_n$ :

$$E^{(k)} = (p_1^{(k)} + \dots + p_n^{(k)})/Q^*;$$

2) определение множества вариантов комбинаций локальных производительностей  $\{h_1, ..., h_m\}$  с использованием малых приращений:

$$\{h_1, ..., h_m\}; h_j = \{q_1^{(k)} \pm \Delta q_1, ..., q_n^{(k)} \pm \Delta q_n\}_j$$
  
 $(j = 1, ..., m),$ 

для которых выполняются условия

$$h_i = Q^* \ (i = 1, ..., m);$$

- 3) последовательная активная реализация каждого варианта комбинаций локальных производительностей  $\{h_1, ..., h_m\}$  с определением соответствующих энергоемкостей продукции  $E(h_i)$ , (j = 1, ..., m);
  - 4) выбор варианта комбинации

$$h_{\mathrm{opt}} = \{q_1^{(k)} \pm \Delta q_{1, \mathrm{opt}}, ..., q_n^{(k)} \pm \Delta q_{n, \mathrm{opt}}\}_j \in \{h_1, ..., h_m\},$$
 обеспечивающего минимальную энергоемкость:

$$E^{(k+1)} = \min(E(h_1), ..., E(h_m));$$

- 5) если суммарное энергопотребление снизилось  $(E^{(k+1)} < E^{(k)})$ , то выполнение следующей итерации поиска:
  - назначение следующего приближения значений локальных продуктивностей:  $\{q_1^{(k+1)},...,$

$$q_n^{(k+1)}$$
}, где  $q_i^{(k+1)} = q_i^{(k)} \pm \Delta q_{i, \text{ opt}}, i = 1, ...;$ 

переход к п. 2

Если указанное условие не выполняется, то переход к п. 6;

6) остановка поиска:

$$\{q_1^* \ q_n^*\} = \{q_1^{(k)}, ..., \ q_{1n}^{(k)}\}.$$

Для ускорения поиска при высокой размерности задачи могут быть применены генетические алгоритмы оптимизации [6].

## 4. Пример расчета

В качестве примера построения оптимального управления параллельной технологической системой на основе вышеописанного принципа рассмотрим добычу нефти с применением группы нефтедобывающих скважин [7]. Здесь в качестве локальных технологических процессов выступают отдельные нефтедобывающие скважины (рис. 3).

Целью управления технологической системы является обеспечение требуемого суммарного дебита (потока)  $Q^*$  (м<sup>3</sup>/сутки) группы скважин:

$$Q = \sum\limits_{i=1}^{n} q_i o Q^*$$
, где  $q_i$  — дебит (поток жидкости)

i-й скважины (м $^3$ /сутки); n — число скважин в группе.

Каждая i-я скважина снабжена насосной установкой, потребляющей мощность  $p_i$ . Энергоемкость группы скважин определяется отношением суммарной потребляемой мощности к суммарному де-

биту скважин группы: 
$$E = \sum_{i=1}^{n} p_i / \sum_{i=1}^{n} q_i$$
.

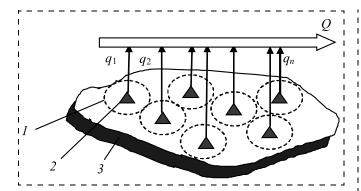


Рис. 3. Нефтедобыча с помощью группы скважин: 1— зона дренирования скважины; 2— нефтедобывающая скважина; 3— нефтеносный пласт

Традиционно поставленная цель достигается путем предварительного распределения требуемых локальных дебитов  $q_i^*$  скважин, которые далее обеспечиваются с помощью локальных систем автоматического управления [8]. Локальные САУ обеспечивают требуемые дебиты  $q_i^*$  путем регулирования режимов работы насосных установок скважин, в условиях случайных локальных возмущающих воздействий (рис. 4).

Мощность  $p_i$  насосной установки, расходуемая на подъем потока добываемой жидкости из скважины на поверхность, определяется выражением

$$p_i = q_i h_i \rho g \frac{1}{\eta_i}, \tag{5}$$

где  $h_i$  — необходимая высота подъема добываемой жидкости (напор) (м);  $\rho$ , g,  $\eta$  — соответственно плотность (кг/м<sup>3</sup>), ускорение свободного падения (м/с<sup>2</sup>), КПД насосной установки.

Рассмотрим влияние возмущающих воздействий на мощность, потребляемую скважинами. В качестве основных возмущающих воздействий здесь выступают потоки частиц горных пород, вызываемые движением добываемых жидкостей. Данные частицы засоряют проводящие каналы пористых пород зон дренирования скважин, повышая их гидравлические сопротивления  $R_i$  (обратная величина общепринятого коэффициента продуктивности скважины):  $R_i = (P_\Pi - P_{3,\ i})/q_i$ , где  $P_\Pi$  — давление жидкости в продуктивном пласте (на границе зоны дренирования);  $P_{3,\ i}$  — давление жидкости в забое i-й скважины.

Повышение гидравлического сопротивления  $R_i$  приводит к снижению давления в забое скважин  $P_{3,\ i}=P_\Pi-R_iq_i$ , что приводит к снижению динамического уровня жидкости в скважине  $H_i=P_{3,\ i}/\rho g$  и повышению высоты ее подъема на поверхность  $h_i=L_i-H_i$ . На основе приведенных выше зависимостей можно выразить зависимость высоты подъема  $h_i$  от возмущающего воздействия  $R_i$ :

$$h_i = L_i - (P_{\Pi} - q_i R_i) \frac{1}{\rho g}.$$
 (6)

Очевидно, что увеличение высоты подъема жидкости  $h_i$ , вызванное увеличением гидравлического сопротивления  $R_i$ , приводит к увеличению потребляемой мощности  $p_i$  насоса скважины (5). Зависимость  $p_i$  от возмущающего воздействия  $R_i$  может быть представлена путем замены  $h_i$  в выражении (5) соотношением (6):

$$p_i = (q_i(L_i \rho g - P_{\Pi}) + q_i^2 R_i) \frac{1}{\eta_i}.$$
 (7)

Покажем возможность минимизации энергоемкости E процесса нефтедобычи с помощью группы скважин в условиях действия возмущений путем оптимального распределения их дебитов  $q_i$ . Для наглядности рассмотрим группу из двух скважин.

Допустим, что требуемый суммарный дебит двух скважин равен  $Q^* = q_1 + q_2 = 100 \, [\text{м}^3/\text{сутки}]$ . Пусть на вторую скважину действует возмущение, приводящее к удвоению гидравлического сопротивления  $R_2$  в ее зоне дренирования по сравнению с первой скважиной:  $R_1 = 0.2 \cdot 10^{10} \, (\Pi \text{a/m}^3/\text{c})$ ;  $R_2 = 2R_1 = 0.4 \cdot 10^{10} \, (\Pi \text{a/m}^3/\text{c})$ .

Рассмотрим зависимость энергоемкости  $E\left(q_{1},\,q_{2}\right)$  от распределения требуемого суммарного дебита  $Q^{*}$  между дебитами  $q_{1},\,q_{2}$  скважин в условиях указанного возмущающего воздействия. Данная зависимость согласно выражению (7) определяется соотношениями

$$E = (p_1 + p_2)/(q_1 + q_2) =$$

$$= \left[ \frac{1}{\eta_1} (q_1 (L_1 \rho g - P_{\Pi}) + q_1^2 R_1) + \frac{1}{\eta_2} (q_2 (L_2 \rho g - P_{\Pi}) + q_2^2 R_2) \right] / (q_1 + q_2); \qquad (8)$$

$$q_1 + q_2 = Q^*.$$

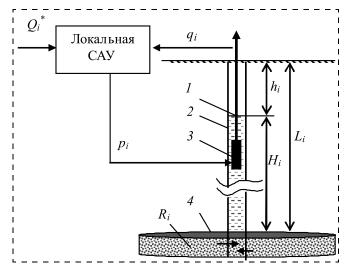
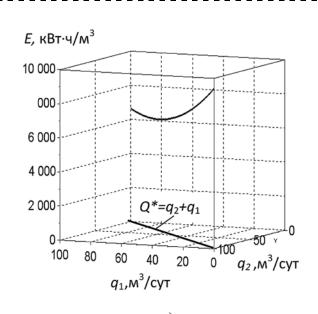
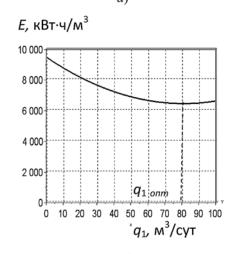


Рис. 4. Схема управления нефтедобывающей скважиной: 1 — насосно-компрессорные трубы; 2 — обсадная колонна; 3 — установка электроцентробежного насоса; 4 — зона дренирования скважины продуктивного пласта;  $H_i$  — динамический уровень жидкости в скважине;  $h_i$  — высота подъема жикости на поверхность;  $L_i$  — длина скважины





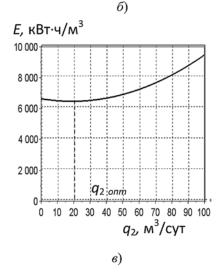


Рис. 5. Зависимость энергоемкости  $E(q_1, q_2)$  группы из двух скважин от распределения их дебитов  $q_1, q_2$ : a - 3D-график;  $\delta$  — проекция зависимости на плоскость  $(E, q_1)$ ;

e — проекция зависимости на плоскость (E,  $q_2$ )

Графики искомой зависимости энергоемкости E от значений  $q_1, q_2$  представлены на рис. 5.

Приведенные графики показывают существование единственного — глобального — минимума функции  $E(q_1,q_2)$ . Оптимальное распределение дебитов, обеспечивающее минимальную энергоемкость, следующее:  $q_{1,\,\,\rm ont}^*=80\,\,{\rm m}^3/{\rm cyr};\;q_{2,\,\,\rm ont}^*=20\,\,{\rm m}^3/{\rm cyr}.$  Минимальная энергоемкость:  $E_{\rm min}=6.4\,\,{\rm kBr}\cdot{\rm v}/{\rm m}^3.$  Снижение энергопотребления по сравнению с энергопотреблением при равномерном распределении дебитов ( $E=6.8\,\,{\rm kBr}\cdot{\rm v}/{\rm m}^3,\,q_1=q_2=50\,\,{\rm m}^3/{\rm cyr}$ ) составляет:  $E-E_{\rm min}=6.8-6.4=0.4\,\,{\rm kBr}\cdot{\rm v}/{\rm m}^3,\,$  или  $5.8\,\%.$ 

Поиск и реализация оптимального распределения дебитов в общем случае обеспечиваются с помощью двухуровневой системы управления группой из *n* скважин (рис. 6).

Координатор системы может применять описанные выше аналитический или итерационный алгоритмы оптимизации.

Для реализации аналитического алгоритма применительно к группе нефтедобывающих скважин необходима информация о текущих возмущениях  $R_i$ . Уравнения Лагранжа здесь принимают вид

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial q_1} = \frac{1}{Q^* \eta_1} (L_1 \rho g - P_{\Pi} + 2q_1 R_1) + \lambda = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial L}{\partial q_n} = \frac{1}{Q^* \eta_n} (L_n \rho g \frac{1}{\eta_n} - P_{\Pi} + 2q_n R_n) + \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = Q^* - \sum_{i=1}^{n} q_i = 0, \end{cases}$$

где

$$L = \frac{1}{Q^*} \sum_{1}^{n} \left[ (q_i (L_i pg - P_{\Pi}) + q_i^2 R_i) \frac{1}{\eta_i} \right] + \lambda \left( \sum_{i=1}^{n} q_i - Q^* \right).$$

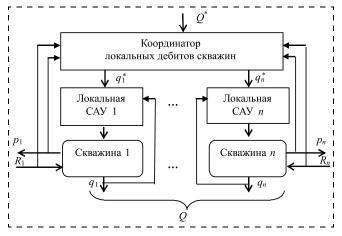


Рис. 6. Система координированного управления группой нефтедобывающих скважин

В случае если информация о текущих возмущениях  $R_i$  недоступна, реализуется итерационный алгоритм активного поиска с использованием текущей информации о суммарном энергопотреблении скважин.

Таким образом, управление группой нефтедобывающих скважин обеспечивает возможность снижения энергоемкости параллельных технологических систем на основе координированного управления процессами с использованием оптимального распределения производительностей.

#### Заключение

В работе рассмотрен подход к повышению энергоэффективности параллельных технологических систем, находящихся под действием внешних распределенных возмущений, на основе оптимального координированного управления локальными процессами. Предложен принцип минимизации энергоемкости на основе оптимального распределения производительностей процессов, входящих в технологическую систему. Рассмотрен способ построения двухуровневой системы управления с координатором, реализующий данный принцип в реальном времени. Представлены аналитический и итерационный алгоритмы работы координатора, обеспечивающего поиск оптимального распределения локальных производительностей. На примере управления группой из двух нефтедобывающих скважин показана эффективность применения предложенного подхода, обеспечивающего значительное снижение энергоемкости параллельной технологической системы по сравнению с традиционным способом управления.

#### Список литературы

- 1. **ГОСТ** Р 51750—2001 Энергосбережение. Методика определения энергоемкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах. Общие положения.
- 2. ГОСТ 27.004—85. Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения.
- 3. Садовский В. В., Самойлов М. В., Кохно Н. П. и др. Производственные технологии. Минск: БГЭУ, 2008. 431 с.
- 4. **Месарович М., Мако Д., Такахара И.** Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
- 5. **Васильев В. И., Гусев Ю. М., Ефанов В. Н.** и др. Многоуровневое управление динамическими объектами. М.: Наука, 1987. 309 с.
- 6. Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика М.: Радиотехника, 2009. 392 с.
- 7. **Владимиров И. В., Хисамутдинов Н. И., Тазиев М. М.** Проблемы разработки водонефтяных и частично заводненных зон нефтяных месторождений. М.: ВНИИОЭНГ, 2007. 360 с.
- 8. **Нугаев И. Ф., Васильев В. И.** Управление процессами скважинной добычи нефти на основе каскадных алгоритмов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 5. С. 321—326.
- 9. **Merlet J.-P., Gosselin C.** Parallel Mechanisms and Robots // Springer Handbook of Robotics. Ref. Work. 2008. P. 269—285.
- 10. **Baeten J., Bert van Beek, Markovski J., Somers L.** Coordination Control of Complex Machines. In: Coordination Control of Distributed Systems // Lecture Notes in Control and Information Sciences. 2015. Vol. 456. P. 61—68.
- 11. Anderson D., Howard T., Apfelbaum D., Herman H., Kelly A. Coordinated Control and Range Imaging for Mobile Manipulation. In: Lecture Notes in Control and Information Sciences // Proc. of the Eleventh International Symposium of Experimental Robotics (ISER), Athens, Greece. 2006. P. 547—556.

## Increase of the Energy Efficiency of the Parallel Technological Systems on the Basis of the Optimal Coordinated Control of the Processes

I. F. Nugaev, Professor, Department of Electronics and Biomedical Technology, inugaev@yandex.ru⊠,
 V. I. Vasilyev, Head of Department of Computer Engineering and Information Security, vasilyev@ugatu.ac.ru,
 Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450000, Russian Federation

Corresponding author: Nugaev Ildar F., D. Sc., Professor, Ufa State Aviation Technical University Ufa, 450000, Russian Federation, e-mail: inugaev@yandex.ru

> Received on June 15, 2016 Accepted on June 24, 2016

The article presents an approach to increasing of the energy efficiency of the parallel technological systems based on optimal coordinated processes control and the principle of minimization of the energy consumption based on the optimal distribution of the capacities of the parallel processes with account of the local disturbances. The principle is based on the assumption that in order to reduce the energy consumption of a parallel system it is necessary to decrease its processes' capacities with a high level of local disturbances, preserving the required total system productivity by increasing the capacities of the processes with the low levels of the local disturbances. The assumption is based on the fact that, as a rule, the processes with a high level of the local disturbances have higher local energy consumption than the processes with a low level of disturbances. It is shown that the problem of the optimal capacities distribution is a task of a multi-parameter optimization with constraints. The paper discusses implementation of this principle on the basis of a two-level control system with a coordinator. The coordinator's task is to compute the values of the optimal local capacities in real time based on information concerning the current values of the local disturbances. The values of the optimal local capacities are fed into the local automatic control systems, which implement the appropriate control actions concerning the local processes. The analytical and iterative algorithms for the optimal coordination of the local capacities values is considered. The analytical algorithm is based on Lagrange's method, while the iterative algorithm

is based on the search for an active gradient solution. The paper considers application of the proposed approach for saving the energy consumption of an oil-production wells group. Here, the parallel technological system includes the oil-production wells as the local processes. The results of the numerical experiments show feasibility of saving energy by more than 5 % in comparison with a technological system without the optimal distribution of the productive capacities. Thus, the proposed approach can reduce significantly the energy consumption of a parallel technological system without an expensive modernization of its technology.

**Keywords:** energy consumption, parallel technological system, multi-level control system, coordinated control, multiparameter optimization, oil-production wells group

For citation:

**Nugaev I. F., Vasilyev V. I.** Increase of the Energy Efficiency of the Parallel Technological Systems on the Basis of the Optimal Coordinated Control of the Processes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2016, vol. 17, no. 12, pp. 847—853.

DOI: 10.17587/mau.17.847-853

#### References

- 1. **GOST** P 51750—2001 (state standard) Energy conservation. Methods for determination of energy capacity on production of output and rendering of services in technological energy systems. General principles (in Russian)
- 2. **GOST** 27.004—85 (state standard) Industrial product dependability. Technological systems. Terms and definitions (in Russian)
- 3. Sadovskii V. V., Samoilov M. V., Kohno N. P., Kovalev A. N., Perminov E. V., Panevchik V. V., Mironovich I. M., Tarasevich V. L. Production technology: textbook, Minsk, BSEU, 2008. 431 p. (in Russian)
- 4. **Mesarovic M., Mako D., Takahara Y.** Theory of hierarchical multi-level systems, Moscow, Mir Pub., 1973. 334 p. (in Russian).

- 5. **Vasilyev V. I., Gusev Yu. M., Efanov V. N., Krymsky V. G.** Multi-level control of dynamic objects, Moscow, Nauka Pub., 1987, 309 p. (in Russian).
- 6. Vasilyev V. I., Ilyasov B. G. Intelligent control systems. Theory and practice, Moscow, Radiotekhnika, 2009, 392 p. (in Russian).
- 7. Vladimirov I. V., Khisamutdinov N. I., Taziev M. M. Problems of development of water-oil and partially flooded areas of oil fields, Moscow, VNIIOENG Pub., 2007, 360 p. (in Russian).
- 8. **Nugaev I. F. Vasilyev V. I.** Control of oil-well production on the basis of cascade algorithms, *Mekhatronika, Avtomatizatsia, Upravlenie*, 2015, no. 5, pp. 321–326 (in Russian).
- 9. **Merlet J.-P., Gosselin C.** Parallel Mechanisms and Robots, *Springer Handbook of Robotics, Ref. Work*, 2008, pp. 269—285.
- 10. **Baeten J., Bert van Beek, Markovski J., Somers L.** Coordination Control of Complex Machines. In: Coordination Control of Distributed Systems, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 2015, vol. 456, pp. 61—68.
- 11. Anderson D., Howard T., Apfelbaum D., Herman H., Kelly A. Coordinated Control and Range Imaging for Mobile Manipulation, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Proceedings of the Eleventh International Symposium of Experimental Robotics (ISER), Athens, Greece, 2006, pp. 547—556.

УДК 004.942

DOI:10.17587/mau.17.853-859

**Ю. И. Буряк,** канд. техн. наук, нач. подразделения, buryak@gosniias.ru, **А. А. Скрынников,** канд. техн. наук, вед. инженер, a1260@mail.ru, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва

# Алгоритмы оптимального распределения ресурсов в задаче планирования изготовления протяжного инструмента для производства авиационных двигателей<sup>1</sup>

Предложен подход к решению задачи планирования воспроизводства протяжного инструмента с учетом использования остаточного ресурса его существующего состава. Разработан алгоритм расчета необходимого числа заказываемых новых протяжек, проведена оценка вероятности выполнения такого заказа с использованием математического аппарата статистического анализа. Приведены результаты формирования вариантов использования существующих протяжек с известным остаточным ресурсом, проведены расчеты надежности каждого варианта, а также сформированы рекомендации по выбору оптимального варианта, доказывающие применимость предложенного подхода.

Ключевые слова: планирование изготовления, протяжной инструмент, ресурс, цикл воспроизводства

### Введение

Получение пазов сложно-фасонного профиля в дисках турбин сегодня является одним из самых трудоемких производственных процессов при изготовлении авиационных двигателей. Наиболее эффективным методом получения элементов такого типа является протягивание, выполняемое на специализированных станках с применением протяжного инструмента (протяжек). Протяжки раз-

личных конструкций являются одними из наиболее дорогих инструментов для выполнения металлообработки. Подчас каждая протяжка при своем изготовлении требует наивысшей точности и правильного расчета. Это обусловлено тем, что инструмент при протягивании работает в наиболее тяжелых и суровых условиях огромных нагрузок (растяжение, сжатие, изгиб, абразивное и адгезионное выкрашивание лезвий протяжки) [1].

Организация эффективного использования и своевременного воспроизводства сложно-профильного режущего инструмента (долбяки, протяжки,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-08-04342a.