

# Автоматизация и Современные Технологии

---

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

---

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Главный редактор  
В.Л. Белоусов

РЕДАКЦИОННАЯ  
КОЛЛЕГИЯ:  
Бучаченко А.Л.  
Гусев А.А.  
Дегтярев Ю.И.  
Елисеев В.А.  
Иванов А.П.  
Мальцева С.В.  
Нефедов Е.И.  
Шебалин И.Ю.  
(заместитель главного редактора)

5  
—  
2012

УЧРЕДИТЕЛИ:  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЕСПУБЛИКАНСКИЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
НАУЧНО-КОНСУЛЬТАЦИОННЫЙ  
ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗЫ

---

Журнал зарегистрирован 9 апреля  
1999 г. за № 018684 в Комитете  
Российской Федерации по печати

---

Журнал входит в перечень  
утверждённых ВАК РФ изданий  
для публикации трудов соискателей  
учёных степеней

---

ООО «Издательство Машиностроение»

**РЕДАКЦИЯ:**

Шебалин И.Ю. — зам. главного редактора  
Гончарова Л.К. — научный редактор  
Осипова В.Г. — научный редактор  
Богус С.В. — секретарь

Адрес редакции:  
107076, Москва,  
Стромынский пер., 4  
Тел.: (499) 748 0290,  
E-mail: ast@mashin.ru; http://www.mashin.ru

Адрес издательства:  
107076, Москва,  
Стромынский пер., 4  
Тел.: (499) 268 3858,  
факс: (499) 269 4897

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

<b>Бобырь М.В., Титов В.С., Червяков Л.М.</b> Адаптация сложных систем управления с учётом прогнозирования возможных состояний .....	3
<b>Тутаев Г.М., Гуляев И.В., Юшков И.С., Биленкис Ю.К.</b> Реализация энергоэффективного управления асинхронизированным вентильным двигателем .....	10
<b>Мурзинов Ю.В.</b> Автоматизированная система построения плана расположения деревьев в лесонасаждении .....	15
<b>Даршт Я.А., Холкин И.Н.</b> Исследование гидростатической опоры аксиально-поршневого насоса .....	20

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<b>Крампит А.Г., Крампит Н.Ю.</b> Использование программы «Компас» для решения научных задач .....	26
<b>Ширялкин А.Ф.</b> О проблемах качества автоматизации машиностроительных производственных сред .....	30
<b>Чебкасов М.С., Уразбахтин Ф.А., Курганов Д.А.</b> Адаптация по технологичности элементов ракеты на этапе проектирования .....	36
<b>Вставская Е.В.</b> Использование широтной модуляции для передачи информации по проводам питающей сети в системах освещения .....	43

## CONTENTS

### AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

<b>Bobyr M.V., Titov V.S., Chervyakov L.M.</b> Complex control systems adaptation by taking into account the possible conditions prediction .....	3
<b>Tutaev G.M., Gulyaev I.V., Yushkov I.S., Bilenkis Yu.K.</b> Power efficient control version of asynchronous gate motor .....	10
<b>Murzinov Yu.V.</b> The automatic system of the plan construction for the trees arrangement in the afforestation .....	15
<b>Darsht Ya.A., Kholkin I.N.</b> Hydrostatic support research of the axial-piston pump .....	20

### MODERN TECHNOLOGIES

<b>Krampit A.G., Krampit N.Yu.</b> Use of the program «Compass» for the of scientific problems decision .....	26
<b>Shiryalkin A.F.</b> About quality problems of machine-building industrial environments automation .....	30
<b>Chebkasov M.S., Urazbakhthin F.A., Kurganov D.A.</b> Rocket elements manufacturability adaptation at a design stage ...	36
<b>Vstavskaya E.V.</b> Width modulation usage for information transfer by means of lighting system power line wires .....	43

**Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Роспечать» — 70537, по каталогу «Пресса России» — 27838, по «Каталогу российской прессы «Почта России» — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу (499) 269 4897, по e-mail [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru), на сайте [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru) (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок (499) 269 6600, 269 5298**

Художественный редактор *Галицина Т.Н.*  
Компьютерный набор *Путилов В.Н.*  
Компьютерная верстка *Тугаринов А.А., Веремеев С.В.*

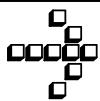
Набрано в ФГБНУ “Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы”  
Москва, ул. Антонова-Овсеенко, 13. Тел.: (499) 795 1789

Сдано в набор 28.02.12. Подписано в печать 27.04.12.  
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 5,88. Уч. изд. л. 7,0. Заказ 229. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Подольская Периодика»  
142110, Московская обл., г. Подольск,  
ул. Кирова, 15

**Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация и современные технологии» обязательна.  
За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель**

ООО «Издательство Машиностроение»,  
«Автоматизация и современные технологии», 2012 г.



УДК 621:658.011.56

**М.В. Бобырь**, канд. техн. наук, доц., **В.С. Титов**, д-р техн. наук, проф.,  
**Л.М. Червяков**, д-р техн. наук, проф. (Юго-Западный государственный университет, г. Курск)  
fregat\_mn@rambler.ru

## АДАПТАЦИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С УЧЁТОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЗМОЖНЫХ СОСТОЯНИЙ

*Рассмотрена адаптация сложных систем управления с учётом прогнозирования возможных состояний системы. Приведены алгоритм модифицированного нечётко-логического вывода и методика построения уравнений регрессии для оценки текущего состояния системы, поясняющие суть адаптации сложных систем.*

**Ключевые слова:** адаптация, интеллектуальная система управления, автоматизированная система управления, оборудование с ЧПУ, нечёткая логика, нечётко-логический вывод, прогнозирование точности, корреляционно-регрессионный анализ, уравнение регрессии.

*Complex control systems adaptation by taking into account the prediction of the possible system state is considered. The modified indistinct-logic conclusion algorithm and a method of regress equations creature for a current system state estimation explaining an essence of difficult systems adaptation are adduced.*

**Key words:** adaptation, intellectual control system, automatic control system, CNC equipment, fuzzy logic, fuzzy-logic conclusion, accuracy prediction, correlation-regression analysis, regression equation.

**Введение.** Методы адаптации сложных технических систем управления начали активно внедряться в промышленность в середине 70-х гг. прошлого столетия при автоматизации технологических процессов: в машино- и приборостроении, медицине и других отраслях науки и техники. При этом на сегодняшний день, несмотря на значительные успехи в области информатизации, наблюдаются низкое быстродействие и оперативность информационно-технических систем за счёт разрыва между программными и аппаратными средствами, а также неиспользования методов прогнозирования возможных состояний системы, что существенно снижает практическое внедрение их в промышленность.

**Анализ традиционных методов адаптации сложных технических систем.** В промышленности широкое внедрение получили методы адаптации автоматизированных систем, основанные на программном и/или программно-адаптивном управлении. К недостаткам систем с программным управлением относятся: отсутствие методов учёта влияния внешней среды на объект управления; невозможность учёта результатов поведения объекта управления; отсутствие обратной связи и прогноза будущего состояния системы.

В моделях с программно-адаптивным управлением эти недостатки устранены, однако отсутст-

вие прогнозирования возможного состояния объекта управления снижает устойчивость системы в целом.

Например, при управлении реальными объектами с помощью таких систем не учитывается инерция, которой обладают все механизмы и устройства. Так, достигнув заданной траектории (положение резца вдоль обрабатываемой поверхности), за счёт инерции реальный объект не сможет остановиться в заданной точке, а сместится несколько дальше, и произойдет перерегулировка. Система моментально на это отреагирует и начнёт коррекцию, т. е. возвращение на заданную траекторию, но в противоположную сторону, вследствие инерции вновь будет перерегулировка. Таким образом, резец будет перемещаться вдоль обрабатываемой детали не по прямой, а по изогнутой траектории, что снижает точность обрабатываемой детали и может привести к появлению брака.

При данной схеме управления увеличивается время переходных процессов, и сложная система ведёт себя как колебательная [1].

Для устранения подобных недостатков в настоящее время широко применяется нечёткая логика [2]. На основе механизмов нечётко-логического вывода она позволяет подстраивать управляющие воздействия, тем самым компенсируя влияние внешних факторов.

К недостаткам традиционных механизмов нечётко-логического вывода относится низкое быстродействие за счёт наличия «пустых решений», появляющихся в процессе вывода. Причём с ростом входных параметров сложных систем управления число «пустых решений» увеличивается в несколько раз, что снижает быстродействие и оперативность. Для устранения этих недостатков разработан модифицированный алгоритм нечётко-логического вывода.

**Модифицированный алгоритм нечётко-логического вывода.** Рассмотрим работу модифицированного алгоритма нечётко-логического вывода для интеллектуальной системы управления температурными деформациями, возникающими при резании [3]. Для её реализации необходимо выполнить следующую последовательность действий.

*Шаг 1.* Сформировать функции принадлежности термов для входной переменной – температуры  $T$  – в зоне резания, а также выходной переменной – подачи  $S$  при резании:

$$T = \{< t, \mu(t) >\}, \quad S = \{< s, \mu(s) >\}, \quad (1)$$

где  $t$  – численные значения температуры в зоне резания;  $\mu(t) \rightarrow [0, 1]$  – степень истинности функции принадлежности температуры;  $s$  – численные значения подачи при резании;  $\mu(s) \rightarrow [0, 1]$  – степень истинности функции принадлежности подачи.

*Шаг 2.* Сформировать базу знаний, отражающую взаимосвязь между входным и выходным параметрами, которая задаётся нечеткими правилами вида

$$\text{НП}_{1,...,n}: \text{Если } «x_1 = \alpha_{1j} \wedge x_2 = \alpha_{2j} \wedge \dots \wedge x_m = \alpha_{nj}» \text{ То } «y_2 = \beta_j, \quad i=1,...,m, j=1,...,n,$$

где  $\alpha_{ij}$  – нечёткий терм для оценивания нечёткой переменной  $x_i$  в  $j$ -м правиле;  $\beta_j$  – заключение в  $j$ -м правиле;  $m$  – число термов;  $n$  – число правил;  $\wedge$  – нечёткая логическая операция (И, ИЛИ) [4];

по формуле

$$\bigcup_{j=1}^n \left( \bigcap_{i=1}^m x_i = \alpha_{ij} \text{ с весом } f_j \right) \Rightarrow y = \beta_j, \\ i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n. \quad (2)$$

При этом  $f_j$  – весовой коэффициент, если не задан, то по умолчанию равен единице.

*Шаг 3.* Построчно в указанном порядке заполнить матрицу нечётких отношений и определить максимальные значения коэффициентов. С помощью операции нечёткой композиции рассчитать значения выходной величины подачи при резании в виде новых термов функций принадлежности (табл. 1).

Таблица 1  
Матрица нечётких отношений

Номер терма	Нечёткая композиция	
$s_1$	$b'_1 = (\max(t'_5, \mu(s)_5) f_1$	$\mu'(s)_1 = \min\{b'_1; \mu(s)_1\}$
$s_2$	$b'_2 = (\max(t'_4, \mu(s)_4) f_2$	$\mu'(s)_2 = \min\{b'_2; \mu(s)_2\}$
$s_3$	$b'_3 = (\max(t'_3, \mu(s)_3) f_3$	$\mu'(s)_3 = \min\{b'_3; \mu(s)_3\}$
$s_4$	$b'_4 = (\max(t'_2, \mu(s)_2) f_4$	$\mu'(s)_4 = \min\{b'_4; \mu(s)_4\}$
$s_5$	$b'_5 = (\max(t'_1, \mu(s)_1) f_5$	$\mu'(s)_5 = \min\{b'_5; \mu(s)_5\}$

Примечание. Количество строк матрицы равно количеству термов выходной переменной  $S$  – подачи при резании,  $t' = (t'_1, t'_2, t'_3, t'_4, t'_5)$  – фазифицированный вектор входных переменных, получен после обработки информации, поступающей от датчиков активного контроля оборудования с ЧПУ в режиме реального времени с учётом того, что текущее значение температуры в зоне резания является аргументом  $\mu(t)$ . Это позволяет найти значение степени истинности из интервала  $[0, 1]$  для  $t' = \mu(t)$ .

*Шаг 4.* Произвести логическое объединение новых термов функции принадлежностей и сформировать нечёткий вектор функций принадлежностей  $S'$ , имеющий функцию принадлежности  $\mu_S(s')$ :

$$S' = \bigcup_{i=1}^m \{< s_i, \mu'(s)_i >\} = \{< s_1, \mu'(s)_1 >\} \cup \{< s_2, \mu'(s)_2 >\} \cup \{< s_3, \mu'(s)_3 >\} \cup \{< s_4, \mu'(s)_4 >\} \cup \{< s_5, \mu'(s)_5 >\}; \\ \mu_S(s') = \bigcup_{i=1}^m \begin{cases} \int_{s \in \text{supp}(S_1)} \{\mu'(s)_1 \cdot f_1\} \wedge \sum_{s \in \text{supp}(S_1)} \mu(s)_1; \\ \int_{s \in \text{supp}(S_2)} \{\mu'(s)_2 \cdot f_2\} \wedge \sum_{s \in \text{supp}(S_2)} \mu(s)_2; \\ \int_{s \in \text{supp}(S_3)} \{\mu'(s)_3 \cdot f_3\} \wedge \sum_{s \in \text{supp}(S_3)} \mu(s)_3; \\ \dots \\ \int_{s \in \text{supp}(S_5)} \{\mu'(s)_5 \cdot f_5\} \wedge \sum_{s \in \text{supp}(S_5)} \mu(s)_5. \end{cases}$$

*Шаг 5.* Нечёткий вектор функций принадлежностей  $S'$  преобразовать в единственное чёткое значение по методу центра тяжести:

$$s'' = \frac{\sum_{i=1}^m s_i \cdot \mu'(s)_i}{\sum_{i=1}^m \mu'(s)_i}. \quad (3)$$

Модифицированный нечётко-логический алгоритм с поясняющими примерами более подробно рассмотрен в работе [5].

Преимущества предложенного алгоритма становятся более заметны при большом количестве входных переменных. Например, на входе механизма нечётко-логического вывода две входные переменные имеют по пять термов. На выходе одна переменная имеет девять термов. Тогда при реализации традиционных механизмов нечётко-логического вывода на выходе будет анализироваться  $m^k = 5^2 = 25$  ( $k$  – число входных переменных) правил, в то время как в предложенном алгоритме всего девять, что повышает оперативность всей системы в 2,7 раза. С ростом входных переменных этот показатель увеличивается.

Несмотря на существенное увеличение быстродействия результатов моделирования с помощью предложенного алгоритма, представленный алгоритм, так же как и традиционные, имеет недостаток, который заключается в формировании ограниченного количества решений, причём если на данную систему воздействуют внешние факторы, то она их не учитывает. Так, например, для интеллектуальной системы управления температурными деформациями при резании, рассмотренной в работе [6], варианты всех возможных значений выходных параметров нечётко-логической системы приведены на рис. 1.

Из рис. 1, *a* видно, что если на подобные системы будут оказывать влияние возмущающие воздействия, то она не сможет адекватно реагировать на них, так как набор управляющих параметров ограничен.

Для адаптации сложных технических систем к реальным данным необходим корреляционно-регрессионный анализ (КРА), который позволяет определить, насколько каждый из параметров влияет друг на друга с помощью уравнения регрессии.

**Методика корреляционно-регрессионного анализа и прогнозирование возможных состояний системы.** В машиностроении при токарной обработке на металлорежущем оборудовании зависимость подачи режущего инструмента от температуры предпочтительнее описывать аппроксимирующей функцией вида [7]

$$S = AT^b, \quad (4)$$

где  $A, b$  – неизвестные коэффициенты регрессии;  $T$  – температура в зоне резания.

Таким образом, корреляционно-регрессионный анализ заключается в определении коэффициентов регрессии и постройке уравнения регрессии (4).

Рассмотрим методику нахождения коэффициентов регрессии. Сначала формулу (4) необходимо прологарифмировать

$$\lg S = \lg A + b \lg T.$$

Приняв  $S = \lg S$ ,  $A = \lg A$ ,  $T = \lg T$ , получаем линейное уравнение вида

$$S = bT, \quad (5)$$

Параметры  $A, b$  уравнения регрессии наиболее часто оцениваются с помощью метода наименьших квадратов. Его суть состоит в том, что, зная положение точек на плоскости, нужно так провести линию регрессии, чтобы сумма квадратов отклонений этих точек от проведённой прямой вдоль оси ординат была минимальной. Математически критерий оценки эмпирических коэффициентов регрессии записывается в виде

$$S_{\min} = \sum_{i=1}^n (s_i - (A + bT))^2 \rightarrow \min.$$

При этом условие существования экстремума функции (6) – равенство его производной нулю. С учётом этого эмпирические коэффициенты регрессии определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} nA + b \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n s_i; \\ A \sum_{i=1}^n t_i + b \sum_{i=1}^n (t_i)^2 = \sum_{i=1}^n s_i t_i. \end{cases}$$

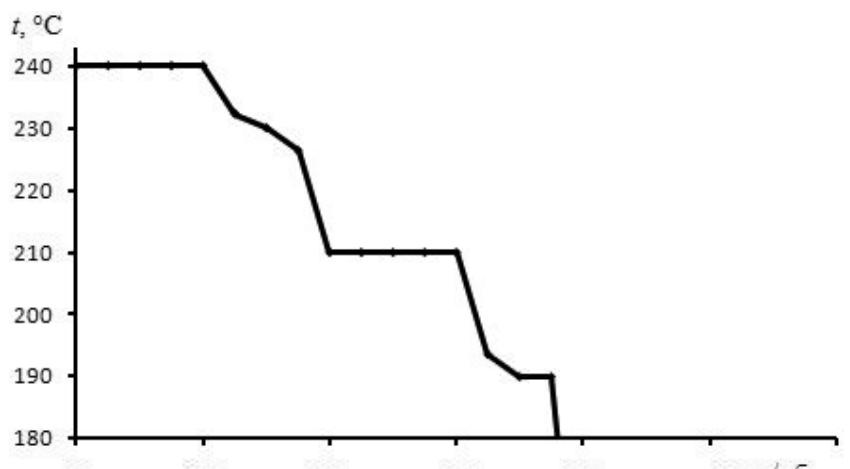
По формулам

$$b = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i t_i - \left( \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n s_i \sum_{i=1}^n t_i \right)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i)^2 - \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \right)^2},$$

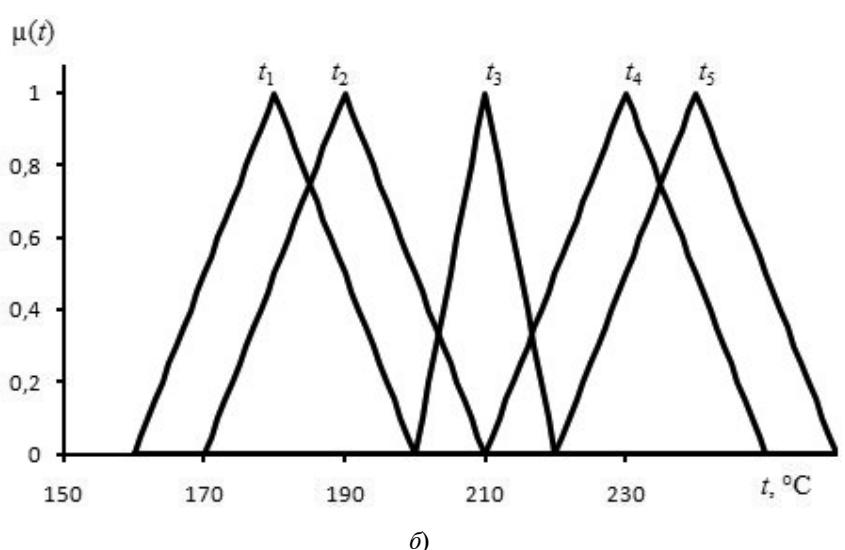
$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i - \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n t_i. \quad (8)$$

Для определения силы влияния каждого параметра на изменение варьируемого параметра используется коэффициент эластичности

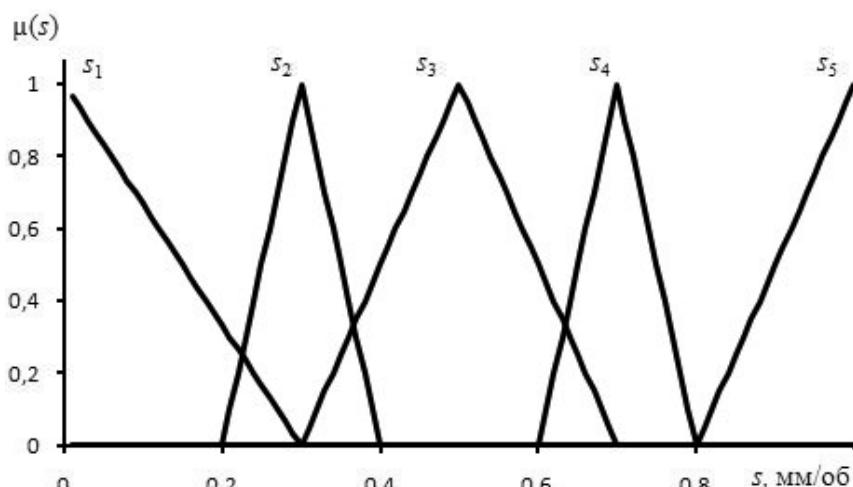
$$\Theta = A \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i}. \quad (9)$$



a)



б)



в)

**Рис. 1. Моделирование нечётко-логического вывода системы:**

*a* — перебор всех возможных состояний системы; *б* — входная переменная температура;  
*в* — выходная переменная подача

Таблица 2

## Данные для расчёта уравнения регрессии

Номер опыта	<i>s</i> , мм/об	<i>t</i> , °C	Номер опыта	<i>s</i> , мм/об	<i>t</i> , °C
1	0,35	242	6	0,6	179
2	0,25	242	7	0,65	211
3	0,75	254	8	0,2	253
4	0,7	243	9	0,5	195
5	0,65	253	10	0,3	205

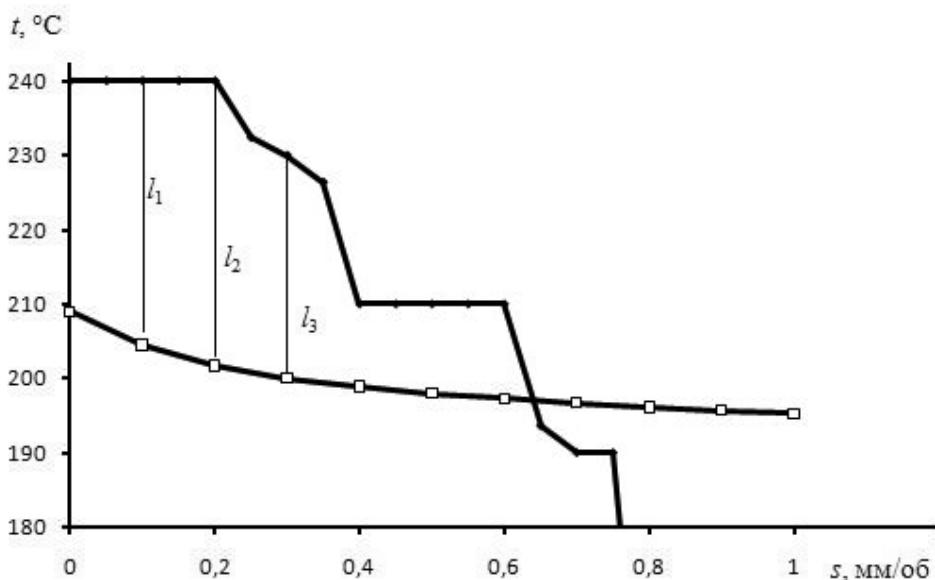


Рис. 2. Зависимость подачи при резании от температуры:

— данные, полученные при моделировании МАНЛВ; —□— данные, полученные при КРА

Коэффициент эластичности показывает, на сколько процентов изменяется выходная переменная при трансформировании входного параметра на один процент.

Затем находится коэффициент детерминации, который определяется как квадрат коэффициента корреляции  $D = \beta_{xy}^2 \cdot 100\%$ , где  $\beta_{xy}$  – коэффициент корреляции. Он показывает, на сколько процентов выходной параметр зависит от входного, а также от остальных (внешних) факторов.

Приведём пример расчёта эмпирических коэффициентов регрессии (табл. 2).

Для определения коэффициентов *A* и *b* необходимо решить систему уравнений (7):

$$\begin{cases} 20A - 17,19b = 107,53; \\ -17,19A + 17,49b = -92,47. \end{cases}$$

Воспользуемся формулой (8) для определения искомых коэффициентов

$$b = -0,02, A = 5,36.$$

Таким образом, с учётом формулы (5) уравнение регрессии примет вид

$$S = 5,36 - 0,02T.$$

Выполнив потенцирование, получим уравнение регрессии

$$s = e^{5,36} t^{-0,02} = 212,7 t^{-0,02}.$$

При этом график зависимости подачи при резании от температуры, описываемый уравнением регрессии, изображён на рис. 2.

Там же приведён график, соответствующий результатам моделирования, полученный с помощью модифицированного алгоритма нечётко-логического вывода (МАНЛВ).

Рис. 2 показывает, что данные, полученные с помощью МАНЛВ и уравнения регрессии, отли-

чаются. Это свидетельствует о наличии возмущающих воздействий, действующих в реальном времени на сложную техническую систему. Количество оценить внешние факторы позволяет коэффициент детерминации  $D = 0,06^2 \cdot 100\% = 0,39$ . Следовательно, подача при резании на 0,36 % зависит от температуры и на 99,64 % от внешних возмущающих воздействий.

Прогнозирование возможных состояний сложной технической системы осуществляется с помощью коэффициента эластичности, который определяется уравнением (9):

$$\mathcal{E} = -0,86.$$

Он показывает, что при изменении температуры на 1 % подача при резании изменится на минус 0,86 мм/об. Данная информация вносится в управляющую программу оборудования с ЧПУ для устранения внешних воздействий в зоне резания. Подобный способ характерен для большинства существующих сложных технических систем с программно-адаптивным управлением. Однако он имеет недостатки, связанные с тем, что в реальном времени погрешности, возникающие при резании, носят случайный характер, и, как следствие, уравнение регрессии может изменить значение коэффициентов регрессии. Таким образом, возникают задачи связанные, во-первых, с совмещением (адаптацией) графиков (см. рис. 2) друг с другом, а во-вторых, с подстройкой сложной технической системы к воздействию случайных внешних факторов.

**Адаптация сложных технических систем.** Необходимо учитывать, что, несмотря на достигнутые успехи в области теории управления, закономерности появления возмущающих воздействий, носящих случайный характер, остаются до сих пор малоизученными, большинство информационно-технических систем не учитывают их влияние, поэтому разработка систем с адаптацией и прогнозированием её возможных состояний является ключом к интеллектуализации систем управления в целом.

При этом нужно отличать адаптацию и оптимизацию сложных систем. То есть на стадии оптимального проектирования, имея математическую модель системы управления и модель статистических свойств, например регрессионное уравнение, можно решить задачу оптимизации.

Однако в реальных условиях при функционировании сложных объектов отсутствует информация о математических моделях среды и объекта, что объясняется возмущающими воздействиями, поэтому методы оптимизации становятся менее эффективными. Так как методы адаптации и оптимизации отличаются только базой оценки ми-

нимизируемого функционала объекта управления, то снижение эффективности адаптации компенсируется её оперативностью. При этом отличие адаптации от компенсации состоит в том, что в системах с компенсацией не учитывается информация о состоянии объекта управления. Это позволяет достаточно просто синтезировать модели адаптации сложных технических систем [8].

Таким образом, задача адаптации МАНЛВ к реальным условиям процесса обработки деталей на оборудовании с ЧПУ, описываемым уравнением регрессии (10), сводится к подстройке параметров, описывающих термы входной переменной, в данном случае температуры в зоне резания.

Поясним описанное выше на примере. Каждый из термов входной переменной температуры имеет вид треугольника и описывается тремя параметрами  $T_i = \{a_i, b_i, c_i\}$  [4]:  $t_1 = \{160, 180, 200\}$ ,  $t_2 = \{170, 190, 210\}$ ,  $t_3 = \{200, 210, 220\}$ ,  $t_4 = \{210, 230, 250\}$ ,  $t_5 = \{220, 240, 260\}$  (см. рис. 1, б). Если изменить входные данные:  $t'_1 = \{160, 195, 215\}$ ,  $t'_2 = \{180, 205, 215\}$ ,  $t'_4 = \{190, 215, 245\}$ ,  $t'_5 = \{200, 220, 260\}$ , а третий терм  $t'_3$  оставить без изменения (см. рис. 3, а), то график, моделирующий результат работы МАНЛВ, смешается к уравнению линии регрессии (10) (см. рис. 3, б).

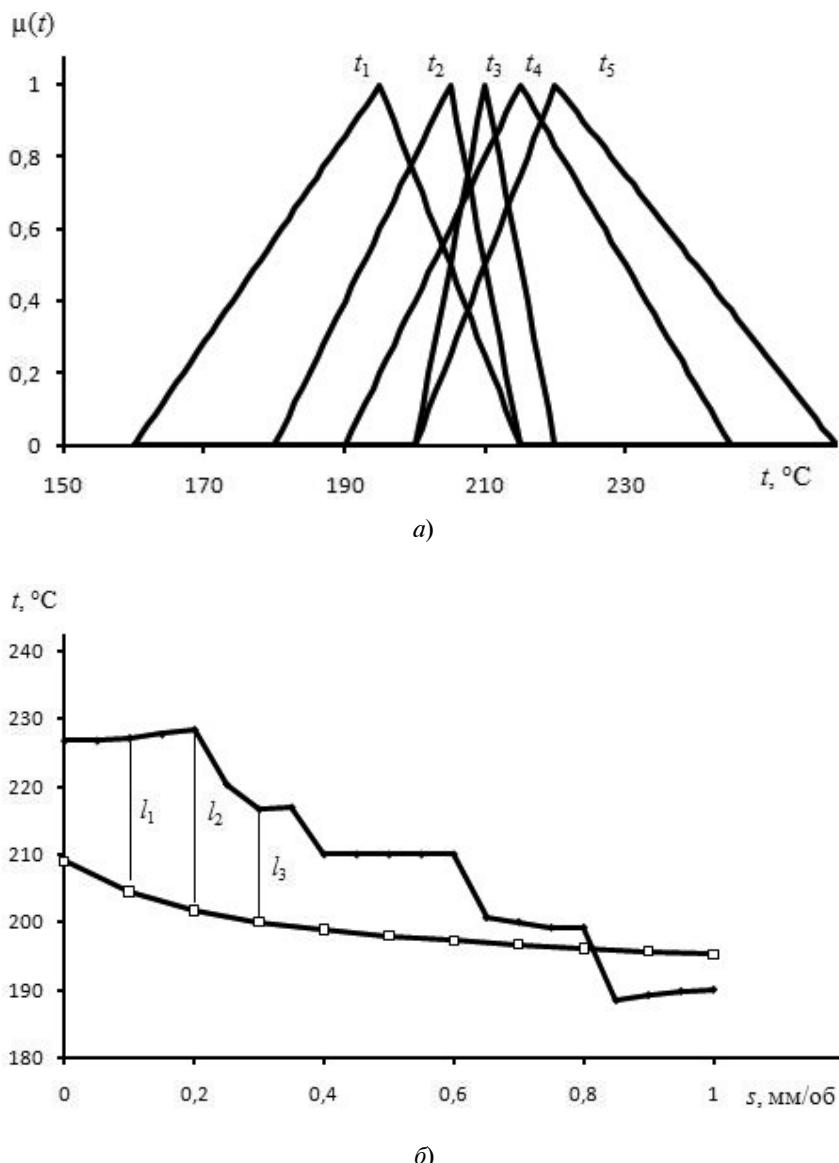
Для полного сопоставления графиков, приведённых на рис. 3, б, потребуется перебор всех возможных  $15^{15} = 4,3 \cdot 10^{17}$  комбинаций, что недопустимо для систем управления оборудованием с ЧПУ, работающих в режиме реального времени. С целью увеличения быстродействия предлагается использовать методы случайного поиска, позволяющие существенно сократить время адаптации сложных технических систем. Тогда условие адаптации запишется:

$$\sum_{i=1}^n l_n = \sqrt{\frac{(s_1 - s_1')^2 + (s_2 - s_2')^2 + \dots + (s_n - s_n')^2}{n}} = \\ = \sqrt{\frac{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + \dots + l_n^2}{n}} \rightarrow \min, \quad (11)$$

где  $l_1, \dots, l_n$  – расстояния между графиками, полученными с помощью МАНЛВ и уравнения регрессии, рассчитанного с помощью корреляционно-регрессионного анализа (см. рис. 2 и 3, б).

То есть необходимо найти такие значения параметров термов входной переменной  $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \{b_1, b_2, \dots, b_n\}, \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ , при которых значения суммы квадратов расстояний между графиками, полученными с помощью МАНЛВ (3) и уравнения регрессии (10), были бы минимальными.

Расчёт условия адаптации (11) для первого случая (см. рис. 2) даст результат  $l_k = 68,2$ , для второ-



**Рис. 3. Адаптация входной переменной:**

— данные, полученные при моделировании МАНЛВ; —□— — данные, полученные при КРА

рого —  $l_k = 15,2$  (см. рис. 3, а). Видно, что во втором случае сходимость алгоритмов лучше, так как условие адаптации минимально.

Таким образом, разработка сложных систем управления, сочетающих в себе механизмы преобразования информации (нечётко-логические выводы) и механизмы перебора информации (адаптация к реальным данным, приближение результатов моделирования, полученных при работе МАНЛВ, к данным, рассчитанным с помощью уравнения регрессии), позволит не только увеличить устойчивость системы, но и повысить её запас, что в итоге увеличит производительность системы.

**Заключение.** Адаптация сложных систем управления к реальным условиям обеспечивает опера-

тивность и создаёт основу для практической реализации данных систем в промышленных масштабах. Освоение промышленностью предложенных в статье принципов, алгоритмов и принципиально новой концепции построения информационно-технических систем открывает широкие возможности для разработки быстродействующих систем принятий решений с учётом прогнозирования её возможных состояний в области разработки систем с искусственным интеллектом, автоматизации технологических процессов и производств, обеспечивающих высокую устойчивость и надёжность. Такие системы позволяют гибко и с максимальным быстродействием реагировать на изменение внешних факторов среды и в соответствии с алгоритмами обучения и самонастрой-

ки компенсировать их, тем самым адаптировать информационно-техническую систему к реальным условиям.

**Работа выполнена в Юго-Западном государственном университете в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Госконтракт № 14.740.11.1003) и гранта Президента РФ МК-277.2012.8.**

#### **Библиографические ссылки**

1. Алиев Р.А., Абдикеев Н.М., Шахназаров М.М. Производственные системы с искусственным интеллектом. М: Радио и связь, 1990. 264 с.
2. Тэррано Т., Асай К., Сугэно М. Прикладные нечёткие системы: М.: Мир, 1993. 368 с.
3. Бобырь М.В., Титов В.С., Емельянов С.Г. Теоретические основы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами на ос-

нове нечёткой логики: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2009. 232 с.

4. Бобырь М.В. Методы построения функций принадлежностей для нечётких баз знаний // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 2. С. 27–33.

5. Бобырь М.В. Модифицированный алгоритм нечётко-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 4. С. 26–32.

6. Бобырь М.В., Титов В.С. Интеллектуальная система управления температурными деформациями при резании // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 5. С. 3–7.

7. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1972. 215 с.

8. Растрогин Л.А. Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. 375 с.

УДК 621.313.33

**Г.М. Тутаев,** канд. техн. наук, доц., **И.В. Гуляев,** д-р техн. наук, проф.,  
**И.С. Юшков,** канд. техн. наук (Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарёва, г. Саранск);  
**Ю.К. Биленкис** (ОАО «Ростелеком», филиал в Республике Мордовия)

tutaevgm@mail.ru

## **РЕАЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫМ ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

*Рассмотрен вариант энергоэффективного управления асинхронизированным вентильным двигателем.*

**Ключевые слова:** асинхронизированный вентильный двигатель, регулятор, минимум потерь.

*Power efficient control version of asynchronous gate motor is considered.*

**Key words:** asynchronous gate motor, regulator, minimum loss.

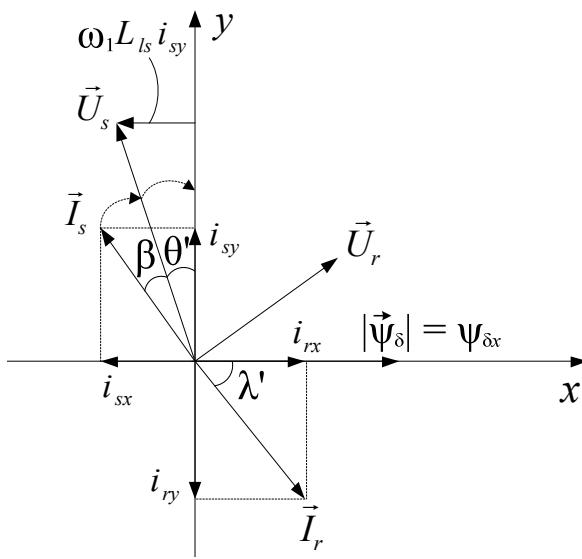
В настоящее время вопросы повышения энергоэффективности систем регулируемых электроприводов (ЭП) становятся всё более актуальными. Это объясняется возрастающей ролью электропривода как части технологических процессов многих производств. В регулируемых приводах доминирующее положение занимают асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. Однако в ряде областей применения хорошо зарекомендовали себя и приводы с асинхронным двигателем с фазным ротором (АДФР), включённым в режиме двойного питания. Вариантом такой управляемой электрической машины является асинхронизированный вентильный двигатель (АВД) с двумя преобразователями частоты в цепях статора и ротора [1].

Это позволяет изменять основной магнитный поток и частоту токов ротора с целью оптимиза-

ции энергетических характеристик привода и обеспечивает двухзонное регулирование скорости, что необходимо, в частности, для приводов металлургических производств.

Математическая модель установившихся режимов работы АВД без учёта потерь в стали в ориентированной по вектору главного магнитного потока ( $\Psi_{\delta y} = 0$ ) системе координат  $x, y$  рассмотрена в работах [2, 3]. Энергетические характеристики с учётом потерь в стали статора АВД исследованы в работе [4]. Векторная диаграмма АВД представлена на рис. 1.

Оптимизация режимов работы электропривода по энергетическим критериям – критерию минимума токов либо минимума суммарных потерь – связана с необходимостью изменения мгновенного состояния управляемых координат базового двигателя в зависимости от значения мо-



**Рис. 1. Векторная диаграмма асинхронизированного вентильного двигателя:**

$\vec{U}_s$ ,  $\vec{I}_s$ ,  $\vec{U}_r$ ,  $\vec{I}_r$  – векторы напряжений и токов статора и ротора соответственно;  $\beta = \phi_1$  – угол опережения коммутации силовых ключей инвертора тока, равный углу сдвига фаз первых гармоник напряжения и тока статора;  $\theta'$  – угол нагрузки АВД;  $\lambda'$  – угол тока возбуждения;  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$ ,  $i_{rx}$ ,  $i_{ry}$  – проекции токов статора и ротора на оси системы координат  $x$ ,  $y$ ;  $|\vec{\Psi}_\delta| = \Psi_{\delta x}$  – модуль вектора основного магнитного потока, по которому ориентирована система координат  $x$ ,  $y$

мента сопротивления нагрузки. Для формирования соответствующих законов управления математическая модель объекта должна учитывать нелинейность характеристики намагничивания. С этой целью реальную характеристику намагничивания необходимо представить аппроксимирующей функцией, которая приближённо изображает исходную характеристику. Среди множества существующих способов аппроксимации самым простым и распространённым является кусочно-линейный. В этом случае кривая намагничивания приближённо изображается двумя линейными участками, причём коэффициент наклона на первом участке равен величине взаимной индуктивности АД  $L_m$  в номинальном режиме, а на втором участке величина потока постоянна ( $\Psi_{\text{dh}} = \text{const}$ ).

С целью оптимизации установившихся режимов работы электропривода с АВД по принципу векторного управления в подсинхронной зоне регулирования скорости ротора, т. е. без учёта конечного ресурса преобразователей частоты по выходным напряжениям, критерий оптимальности сводится к формальным зависимостям координат двигателя от требуемого электромагнитного момента:

$$\begin{cases} \Psi_\delta = f(M_{\text{эм}}^*); \\ i_{rx} = f(M_{\text{эм}}^*); \\ -i_{ry} = i_{sy} = f(M_{\text{эм}}^*). \end{cases}$$

Упрощённая функциональная схема АВД при оптимизации по энергетическим критериям представлена на рис. 2.

В тригонометрическом анализаторе (ТА) определяются модуль основного магнитного потока  $|\vec{\Psi}_\delta|$ ,  $\sin\varphi$  и  $\cos\varphi$  угла поворота синхронной системы координат  $x$ ,  $y$  относительно системы координат  $\alpha$ ,  $\beta$  по соотношениям

$$\begin{cases} |\vec{\Psi}_\delta| = \sqrt{\Psi_{\delta\alpha}^2 + \Psi_{\delta\beta}^2}; \\ \cos\varphi = \frac{\Psi_{\delta\alpha}}{|\vec{\Psi}_\delta|}; \quad \sin\varphi = \frac{\Psi_{\delta\beta}}{|\vec{\Psi}_\delta|}. \end{cases}$$

Датчики токов в фазах статора ( $\Delta T_A$ ,  $\Delta T_B$ ,  $\Delta T_C$ ) определяют мгновенные значения статорных токов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , которые в преобразователе фаз (ПФ) переводятся в двухфазную систему координат  $\alpha$ ,  $\beta$  по соотношениям

$$\begin{cases} I_{s\alpha} = \frac{2I_A - I_B - I_C}{3} = I_A; \\ I_{s\beta} = \frac{I_B - I_C}{\sqrt{3}}. \end{cases}$$

В блоке ПКО осуществляется преобразование координат из  $\alpha$ ,  $\beta$  координатной системы в систему координат  $x$ ,  $y$  по соотношениям

$$\begin{cases} i_{sx} = i_{s\alpha} \cos\varphi + i_{s\beta} \sin\varphi; \\ i_{sy} = -i_{s\alpha} \sin\varphi + i_{s\beta} \cos\varphi. \end{cases}$$

Полученные сигналы поступают в блок вычисления угла (ВУ) в системе координат  $x$ ,  $y$ , где определяется положение вектора тока статора  $\vec{I}_s$  относительно основного магнитного потока  $\vec{\Psi}_\delta$ . Для поддержания их ортогональности в системе управления предусмотрен регулятор угла (РУ) опережения коммутации  $\beta$ , который фактически работает в режиме стабилизации размагничивающей составляющей тока статора  $i_{sx} = 0$ . Угол опережения коммутации  $\beta$  определяет угол сдвига фаз  $\phi_1$  между векторами тока и напряжения статора. Задание фиксированного угла  $\beta = \phi_1$  ( $\phi_1$  – сдвиг фаз между первыми гармониками тока и напряжения статора) приводит к появлению составляющей тока статора  $i_{sx}$  (см. рис. 1) и обусловленных ею составляющих

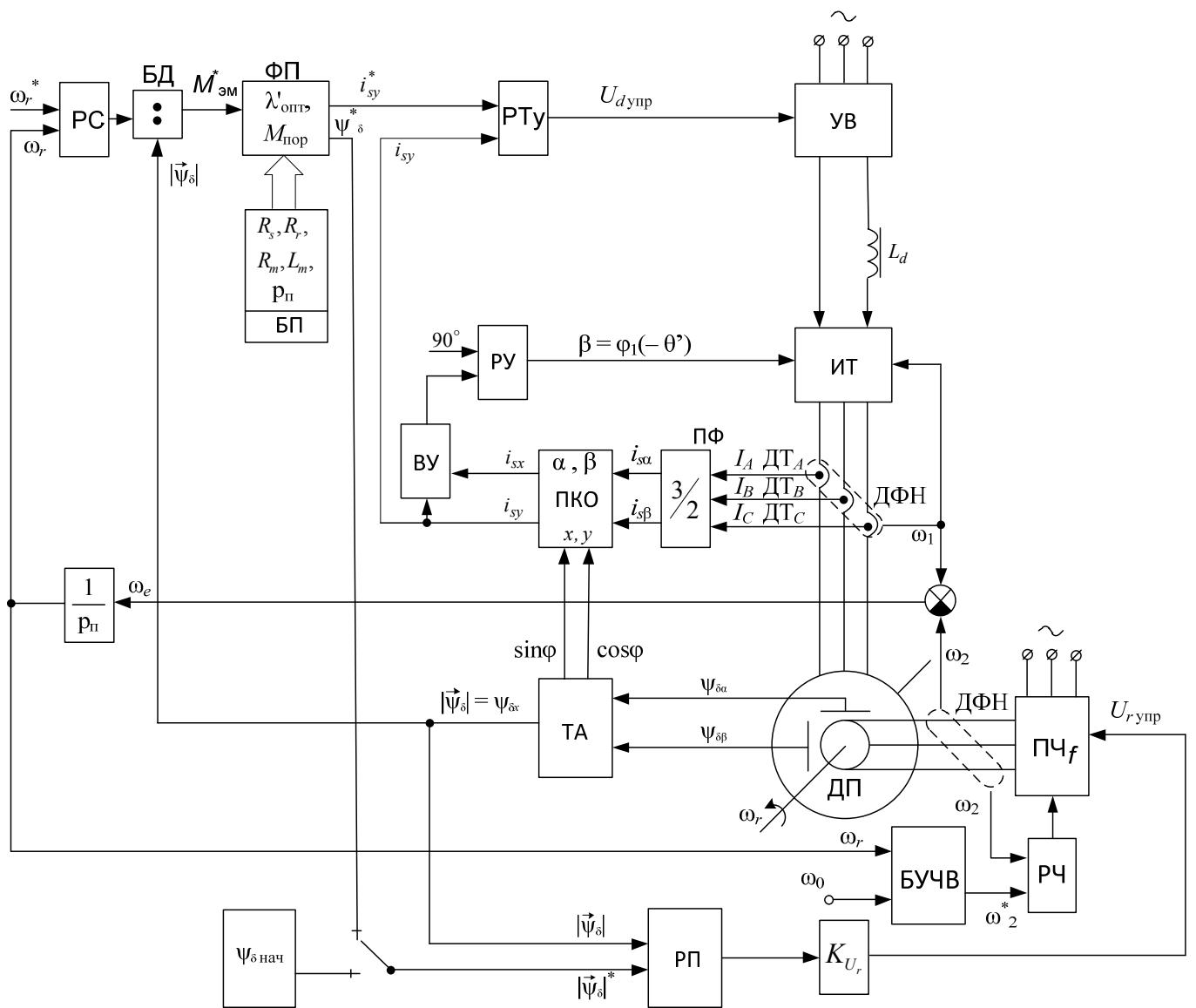


Рис. 2. Функциональная схема энергоэффективного управления асинхронизированным вентилем двигателем

внутренней ЭДС. Блоки компенсации внутренних ЭДС статора и ротора на функциональной схеме не показаны. Также не показаны блоки координатных преобразований, выполняющие операции перехода управляющих напряжений из системы координат  $x, y$  в систему координат статора и ротора.

Сигналом задания электромагнитного момента служит сигнал с выхода регулятора скорости (РС). Блок деления (БД) позволяет стабилизировать электромагнитный момент при возможных изменениях  $|\vec{\psi}_\delta|$ .

В функциональном преобразователе (ФП) реализуется один из алгоритмов энергоэффективного управления АВД – минимум токов или минимум суммарных потерь [5]. В первом случае на

выходе ФП необходимо формировать следующие задающие воздействия во всём диапазоне скоростей:

$$\Psi_{\delta x}^* = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{M_{\text{эм}}^* L_m}{p_n}} & \text{при } M_{\text{эм}}^* \leq M_{\text{пор}}; \\ \Psi_{\delta xH} = \text{const} & \text{при } M_{\text{эм}}^* > M_{\text{пор}}; \end{cases}$$

$$i_{rx}^* = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{M_{\text{эм}}^*}{p_n L_m}} & \text{при } M_{\text{эм}}^* \leq M_{\text{пор}}; \\ \frac{\Psi_{\delta xH}}{L_m} = \text{const} & \text{при } M_{\text{эм}}^* > M_{\text{пор}}; \end{cases}$$

$$i_{sy}^* = -i_{ry}^* = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{M_{\text{эм}}^*}{p_{\text{n}} L_m}} & \text{при } M_{\text{эм}}^* \leq M_{\text{пор}}; \\ \frac{2}{3} \frac{M_{\text{эм}}^*}{p_{\text{n}} \Psi_{\delta_{\text{хн}}}} & \text{при } M_{\text{эм}}^* > M_{\text{пор}}; \end{cases}$$

$$\lambda'_{\text{опт}} = \begin{cases} \frac{\pi}{4} & \text{при } M_{\text{эм}}^* \leq M_{\text{пор}}; \\ \arctg \frac{2}{3} \frac{M_{\text{эм}}^* L_{m\text{h}}}{p_{\text{n}} \Psi_{\delta_{\text{хн}}}^2} & \text{при } M_{\text{эм}}^* > M_{\text{пор}}. \end{cases}$$

Пороговое значение электромагнитного момента, по достижении которого осуществляется переход к ортогональному управлению, определяется по соотношению

$$M_{\text{пор}} = \frac{3}{2} p_{\text{n}} \frac{\Psi_{\delta_{\text{хн}}}^2}{L_{m\text{h}}}.$$

При реализации управления по минимуму суммарных потерь задающие воздействия определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \Psi_{\delta_x}^* &= \sqrt{\frac{2 M_{\text{эм}}^* L_m}{3 p_{\text{n}}} \operatorname{ctg} \lambda'_{\text{опт}}}; \\ i_{rx}^* &= \sqrt{\frac{2 M_{\text{эм}}^*}{3 p_{\text{n}} L_m} \operatorname{ctg} \lambda'_{\text{опт}}}; \\ i_{sy}^* = -i_{ry}^* &= \sqrt{\frac{2}{3} \frac{M_{\text{эм}}^*}{p_{\text{n}} L_m} \operatorname{tg} \lambda'_{\text{опт}}}; \\ \lambda'_{\text{опт}} &= \arctg \sqrt{\frac{R_r R_m + \omega_1^2 L_m^2}{R_m (R_s + R_r)}}, \end{aligned}$$

где  $\lambda'_{\text{опт}}$  – фаза вектора тока ротора относительно опорного вектора основного магнитного потока  $|\bar{\Psi}_{\delta}| = \Psi_{\delta_x}$ .

При превышении намагничающей составляющей тока ротора  $i_{rx}$  номинального значения  $i_{r_{\text{хн}}} = \frac{\Psi_{\delta_{\text{хн}}}}{L_{m\text{h}}}$  осуществляется переход к ортогональному управлению при  $\Psi_{\delta_{\text{хн}}} = \text{const}$ . Значение электромагнитного момента при этом превышает пороговое:

$$M_{\text{эм}}^* > M_{\text{пор}} = \frac{3}{2} p_{\text{n}} \frac{\Psi_{\delta_{\text{хн}}}^2}{L_{m\text{h}}} \operatorname{tg} \lambda'_{\text{опт}}.$$

В этом случае оптимальные задающие воздействия на выходе ФП необходимо формировать в соответствии с системой

$$\begin{cases} \Psi_{\delta_x}^* = \Psi_{\delta_{\text{хн}}}, i_{sy}^* = -i_{ry}^* = \frac{2}{3} \frac{M_{\text{эм}}^*}{p_{\text{n}} \Psi_{\delta_{\text{хн}}}^2}; \\ \lambda' = \arctg \frac{i_{ry}}{i_{rx}} = \arctg \frac{2}{3} \frac{M_{\text{эм}}^* L_{m\text{h}}}{p_{\text{n}} \Psi_{\delta_{\text{хн}}}^2}. \end{cases}$$

В блоке параметров (БП) устанавливаются необходимые для определения задающих воздействий параметры базовой машины, которые при ограничении перегрузочной способности преобразователя по току на уровне  $I_{\text{max}} \leq 2 I_{\text{sh}}$  можно принять постоянными. Так,  $R_m$  – это сопротивление, совокупно учитывающее потери в стали от вихревых токов и гистерезиса, включённое параллельно контуру намагничивания традиционной Т-образной схемы замещения АД. Оно определяется по конструктивным параметрам двигателя для конкретного диапазона угловых скоростей ротора [5].

Регулятор РТ<sub>y</sub> проекции тока статора  $i_{sy}$  задаёт величину напряжения  $U_{d\text{упр}}$  управляемого выпрямителя с целью получения необходимой скорости ротора  $\omega_r^*$ .

Регулятор потока (РП) формирует управляющее воздействие  $U_{r\text{упр}}$  для создания заданного значения потока. Блок формирования начального потока обеспечивает его ограничение по минимальному значению на уровне  $\Psi_{\delta_{\text{хн}}}^{\min} = 0,1\text{--}0,2 \Psi_{\delta_{\text{хн}}}$  во избежание полного размагничивания базовой машины при пуске привода и в режиме холостого хода.

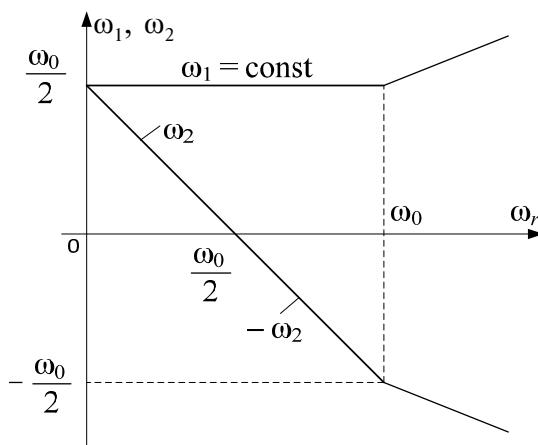
Критерий минимума потерь в стали  $\frac{\partial P_{st}}{\partial \omega_1} = 0$ ,  $\frac{\partial P_{st}}{\partial \omega_2} = 0$  будет обеспечен при выполнении условия

$$\omega_1 = -\omega_2 = \frac{\omega_e}{2}, \quad (1)$$

где  $\omega_1$  – угловая частота токов статора;  $\omega_2$  – угловая частота токов ротора;  $\omega_e = \omega_r p_{\text{n}}$  – электромагнитная угловая скорость вращения ротора;  $\omega_r$  – механическая угловая скорость вращения ротора;  $p_{\text{n}}$  – число пар полюсов АД.

Эту задачу в системе управления АВД решает блок управления частотой возбуждения (БУЧВ), на один из входов которого поступает значение начальной частоты  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f = 6\text{--}10$  Гц. На второй вход этого блока поступает сигнал  $\omega_e$ .

При пуске ЭП  $\omega_e = 0$  и на выходе БУЧВ устанавливается значение частоты возбуждения



**Рис. 3. Управление частотой возбуждения**

$\omega_2 = \frac{\omega_0}{2}$ . Алгоритм работы блока управления частотой возбуждения таков, что при разгоне возрастание электромагнитной угловой скорости ротора  $\omega_e$  приводит к уменьшению частоты возбуждения  $\omega_2$  на такую же величину. При этом частота токов статора, определяющая потери в стали  $\omega_1 = \omega_e + \omega_2 = \frac{\omega_0}{2}$ , останется неизменной. Когда угловая скорость ротора достигнет значения  $\omega_e = \frac{\omega_0}{2}$ , частота  $\omega_2 = 0$ , и по обмотке возбуждения протекает постоянный ток. В этот момент происходит переключение чередования фаз в обмотках ротора, что приводит к смене направления вращения поля. Теперь при увеличении угловой скорости ротора  $\omega_e$  частота возбуждения будет расти, но с отрицательным знаком (рис. 3), а частота  $\omega_1 = \text{const}$ .

При достижении  $\omega_e$  значения  $\omega_0$  на выходе БУЧВ устанавливается значение частоты возбуждения  $\omega_2 = -\frac{\omega_0}{2}$ . При дальнейшем увеличении скорости ротора БУЧВ обеспечивает выполнение условия (1).

Таким образом, предложенный вариант реализации системы управления электроприводом на базе АВД позволяет оптимизировать энергетические характеристики в широком диапазоне нагрузок и изменения угловой скорости ротора до двух синхронных. Это достигается соответствующим управлением основным магнитным потоком и частотой возбуждения  $\omega_2$  (угловой частотой токов ротора).

#### **Библиографические ссылки**

1. Сонин Ю.П., Гуляев И.В. Асинхронизированный вентильный двигатель. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1998. 68 с.
2. Тутаев Г.М. Варианты векторного управления электроприводом с асинхронизированным вентильным двигателем // Электротехнические комплексы и системы управления. 2009. № 3. С. 11–15.
3. Гуляев И.В., Тутаев Г.М., Маняев И.В. Влияние частоты возбуждения на энергетические характеристики асинхронизированного вентильного двигателя // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып 3: в 5 ч. Ч. 2. С. 81–88.
4. Тутаев Г.М., Гуляев И.В., Маняев И.В. Исследование энергетических характеристик асинхронизированного вентильного двигателя на статической модели // Электротехнические комплексы и системы управления. 2010. № 4. С. 2–7.
5. Тутаев Г.М. Энергоэффективное управление двигателем двойного питания в установленныхся режимах // Электротехнические комплексы и системы управления. 2011. № 2. С. 52–58.

#### **Уважаемые авторы и читатели журнала!**

В соответствии с решениями президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России журнал «Автоматизация и современные технологии» включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук.

УДК 520.33:519.688

**Ю.В. Мурзинов** (Воронежская государственная лесотехническая академия)

murzinov@box.vsi.ru

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНА РАСПОЛОЖЕНИЯ ДЕРЕВЬЕВ В ЛЕСОНАСАЖДЕНИИ

*Рассмотрен способ построения плана расположения деревьев в лесонасаждении по фотоизображению. Описана структурная схема получения плана расположения деревьев в лесонасаждении. Представлены уравнения для перевода координат фотоизображения в действительные координаты учётных деревьев. Показана работа программы «Построение плана деревьев в лесонасаждении по фотоизображению» в автоматическом режиме.*

**Ключевые слова:** автоматизированная система, план расположения деревьев, фотоизображение, измерение деревьев, таксационные характеристики.

*The construction method of the trees disposition plan in an afforestation according to photo is considered. The reception structural scheme of the trees disposition plan in the afforestation is described. The equations for photo coordinates transformation in the actual coordinates of the registered trees are adduced. Work of the program «The trees plan construction in an afforestation according to photo» in the automatic mode is shown.*

**Key words:** automatic system, trees arrangement plan, photo, tress measurement, forest valuation behaviors.

В настоящее время в лесничествах и лесных хозяйствах одной из важных проблем является определение местоположения и таксационных характеристик отдельных деревьев в лесонасаждениях. Это необходимо для планирования различных лесохозяйственных мероприятий (рубка ухода, промежуточное пользование, переформирование насаждений и проведение лесозаготовок).

В современных лесных хозяйствах вручную измеряют таксационные характеристики (диаметр, высоту) и местоположение каждого дерева. Эти процедуры очень трудоёмки и требуют больших затрат времени, что не даёт возможности получать полную информацию о лесонасаждении.

В Воронежской государственной лесотехнической академии на кафедре автоматизации производственных процессов разработан способ определения местоположения и таксационных характеристик каждого дерева в лесонасаждении и последующего автоматического построения плана лесонасаждения (патент 2412587 RU. Способ измерения местоположения и таксационных характеристик учётных деревьев. Опубл. 27.02.2011. Бюл. № 6). Этот способ измерения, основанный на получении и обработке фотоизображения, является более эффективным по сравнению с традиционными.

Структура способа включает несколько этапов (рис. 1). На первом этапе выбирается участок ле-

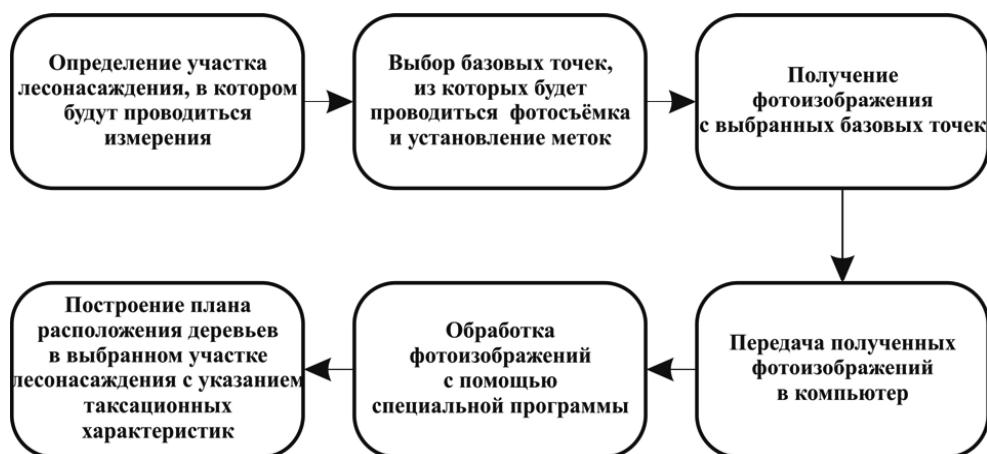
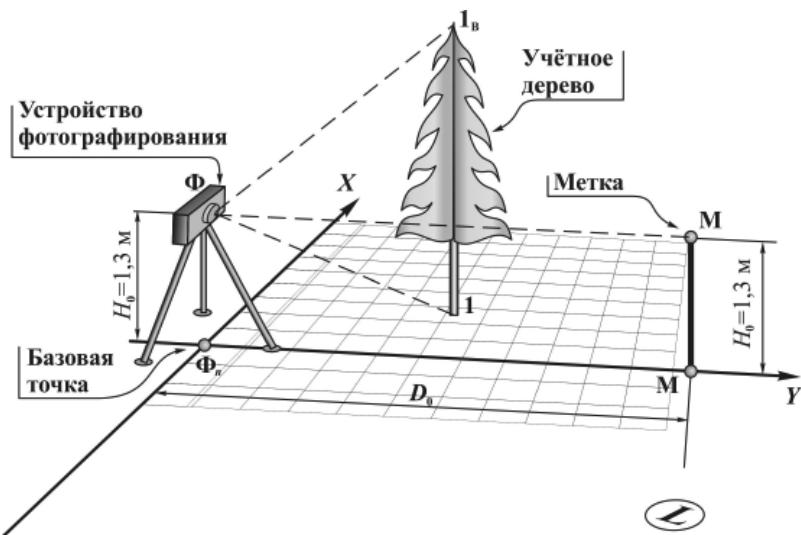
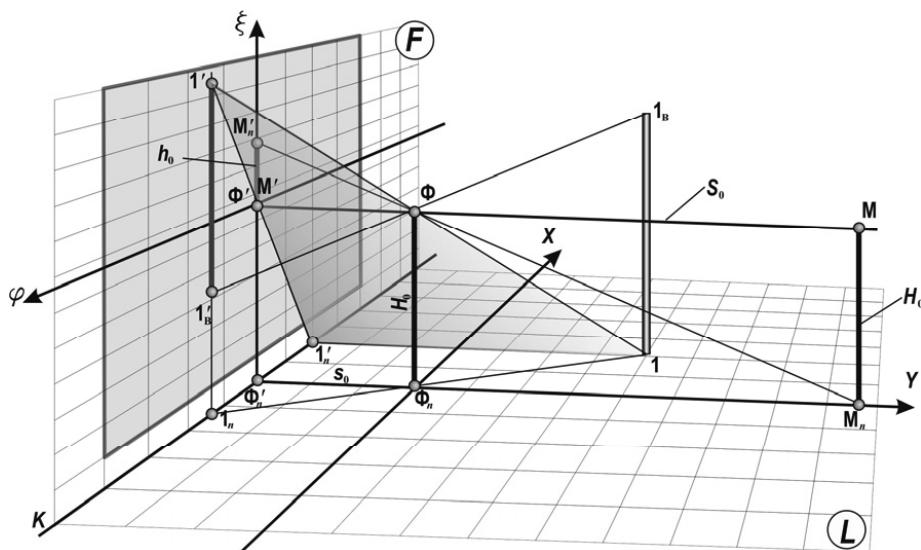


Рис. 1. Этапы построения плана расположения деревьев в лесонасаждении



**Рис. 2. Схема взаимного расположения на местности учётного дерева, метки и устройства фотографирования**



**Рис. 3. Определение координат по фотоизображению:**

$X$ ,  $Y$  – координатные оси участка лесонасаждения;  $\xi$ ,  $\varphi$  – координатные оси изображения;  $F$  – плоскость изображения;  $L$  – плоскость участка лесонасаждения;  $K$  – линия пересечения плоскостей  $F$  и  $L$ ;  $1$  – основание учётного дерева;  $1_B$  – вершина учётного дерева;  $1'_n$  – проекция точки  $1$  на плоскость  $F$ ;  $1_n$  – точка пересечения линии  $K$  и луча, проходящего через точку  $1$  и точку  $\Phi_n$ ;  $1'$  – точка пересечения плоскости  $F$  и луча, проходящего через точку  $1$  и точку  $\Phi$ ;  $1'_B$  – точка пересечения плоскости  $F$  и луча, проходящего через точку  $1_B$  и точку  $\Phi$ ;  $\Phi$  – фокус устройства получения изображения;  $\Phi_n$  – проекция фокуса  $\Phi$  на плоскость  $L$ , базовая точка;  $\Phi'$  – проекция фокуса  $\Phi$  на плоскость  $F$ ;  $\Phi'_n$  – проекция точки  $\Phi_n$  на плоскость  $F$ ;  $M$  – метка;  $M_n$  – проекция метки  $M$  на плоскость  $L$ ;  $M'$  – точка пересечения плоскости  $F$  и луча, проходящего через метку  $M$  и фокус  $\Phi$ ;  $M'_n$  – точка пересечения плоскости  $F$  и луча, проходящего через точку  $M_n$  и точку  $\Phi$

сонасаждения, для которого необходимо построить план расположения деревьев и измерить их таксационные характеристики. На этом участке выбираются базовые точки ( $\Phi_n$ ,  $M_n$ ,  $M$ ), над которыми устанавливается устройство фотографирования; его фокус располагается на высоте 1,3 м

над базовой точкой. Далее на высоте 1,3 м от поверхности грунта, на расстоянии  $S_0$  (рис. 2) от базовых точек устанавливаются метки. После этого осуществляется фотографирование участка лесонасаждения. Полученные фотоизображения переносятся в компьютер, где обрабатываются

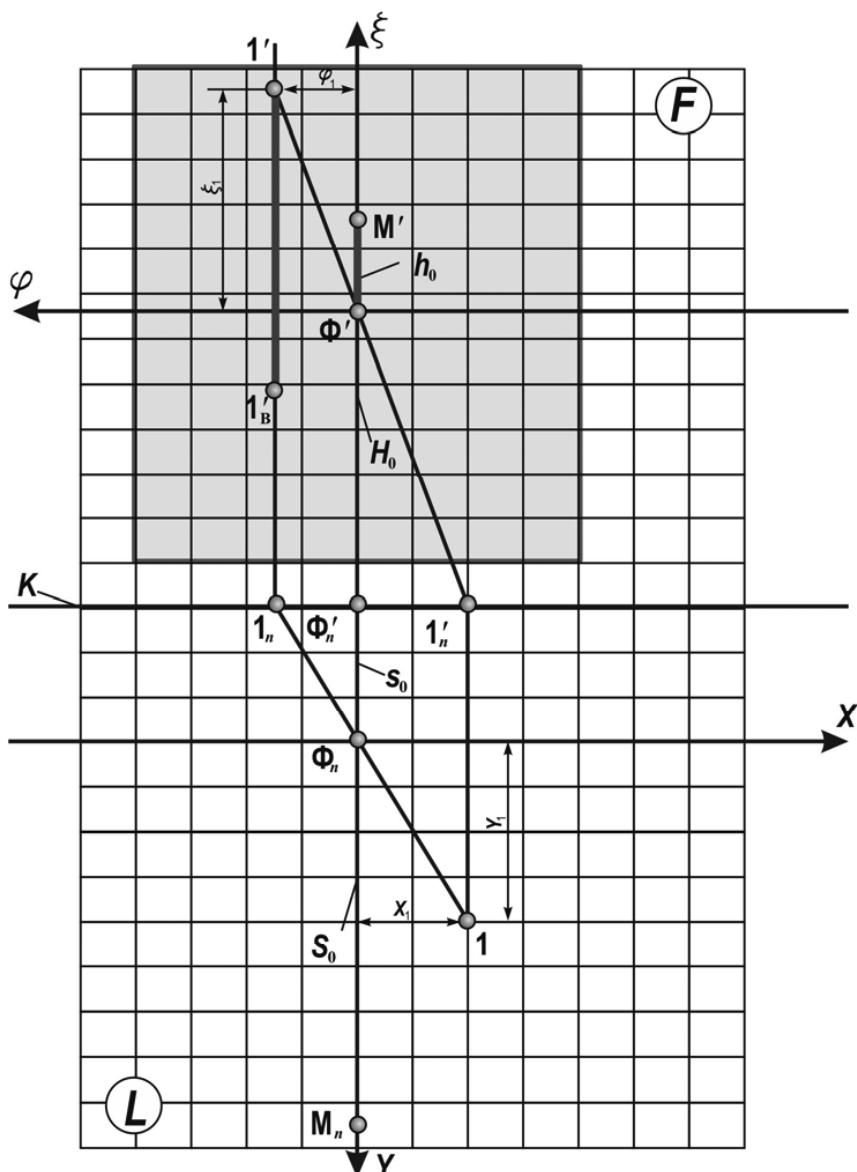


Рис. 4. Развёртка координатных плоскостей участка лесонасаждения и фотоизображения

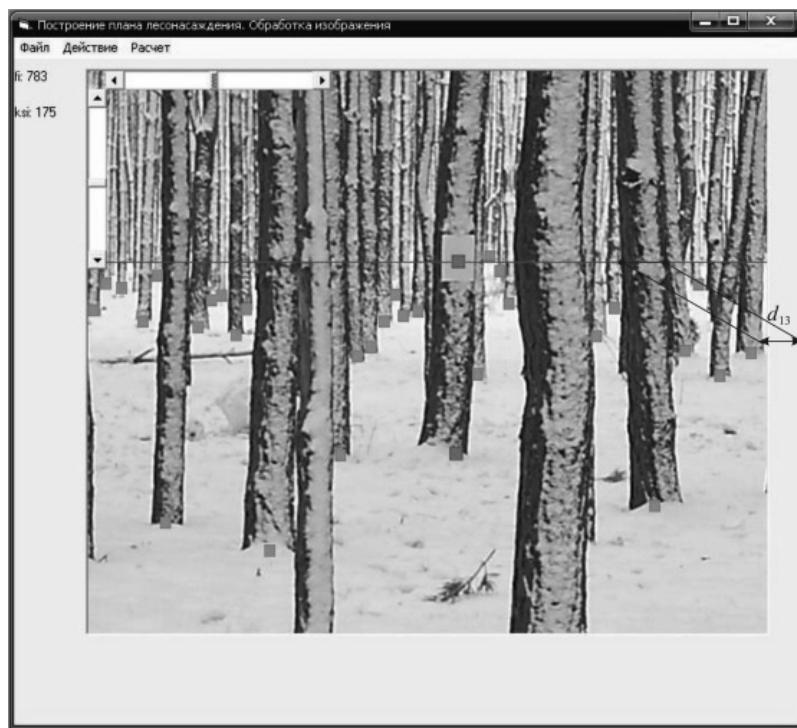
специальной программой «Построение плана деревьев в лесонасаждении по фотоизображению». Программа вычисляет координаты основания деревьев и таксационные характеристики: диаметр на высоте груди (1,3 м от поверхности грунта) и высоту.

Методика определения координат положения основания учётного дерева заключается в следующем. Устройство фотографирования располагают возле участка с учётными деревьями таким образом, чтобы его фокус  $\Phi$  располагался на высоте  $H_0 = 1,3$  м (рис. 3, плоскость  $L$ ) над базовой точкой. На этом участке, на предварительно измеренном расстоянии  $S_0$ , на высоте  $H_0 = 1,3$  м располагается метка  $M$ , производится построение изображения и его фиксирование в плоскости  $F$  (рис. 4). На плоскости изображения

$F$  строятся оси координат с началом отсчёта в точке  $\Phi'(M')$ . Горизонтальная ось  $\varphi$  располагается параллельно линии  $K$ , а вертикальная ось  $\xi$  — перпендикулярно линии  $K$ . На плоскости  $L$  участка учётных деревьев начало отсчёта для осей координат выбирается в точке  $\Phi_n$  (базовая точка).

При этом существует взаимно однозначное соответствие между точками плоскости  $L$  и точками плоскости изображения  $F$ . Формулы преобразования координат  $(\varphi, \xi)$  точек плоскости изображения  $F$  в координаты  $(x, y)$  точек плоскости  $L$  имеют следующий вид:

$$x_1 = H_0 \frac{\varphi_1}{\xi_1}; \quad y_1 = S_0 \frac{h_0}{\xi_1}. \quad (1)$$



a)

Построение плана лесонасаждения. Координаты и таксационные характеристики			
Назад	$(\bar{f}_i, \bar{k}_{si})$	[x,y]	Диаметр 1,3
Расчет	4 (-166, 276)	(-782, 14)	0,155
	5 (-64, 71)	(-1.172, 54.422)	0,219
	6 (177, 239)	(.962, 16.167)	0,19
	7 (236, 121)	(2.535, 31.933)	0,149
	8 (64, 227)	(.366, 17.022)	0,143
	9 (205, 65)	(4.1, 59.446)	0,339
	10 (-152, 76)	(-2.6, 50.842)	0,222
	11 (-138, 51)	(-3.518, 75.764)	0,254
	12 (-112, 80)	(-1.82, 48.3)	0,227
	13 (-84, 128)	(-.854, 30.187)	0,304
	14 (-28, 78)	(-.467, 49.538)	0,266
	15 (44, 64)	(.893, 60.375)	0,203
	16 (56, 35)	(2.08, 110.4)	0,259
	17 (91, 69)	(1.714, 56)	0,188
	18 (113, 249)	(.589, 15.518)	0,125

б)

**Рис. 5. Интерфейс программы «Построение плана деревьев в лесонасаждении по фотоизображению»:**

*a* – окно обработки изображения; *б* – окно вывода рассчитанных координат и таксационных характеристик

Для получения координат положения учётных деревьев необходимо измерить координаты точек основания учётных деревьев на изображении (плоскость  $F$ ) и, воспользовавшись формулами (1), вычислить координаты этих точек для плоскости  $L$ .

Диаметр учётного дерева  $D_{13}$  на высоте 1,3 м от поверхности грунта определяется следующим образом. На изображении участка на оси  $\phi$  измеряется диаметр  $d_{13}$  учётного дерева (рис. 5, *a*). С учётом формулы (1) вычисляют действительный диаметр учётного дерева  $D_{13}$ :

$$\begin{aligned}
 D_{13} = & 2y_1 d_{13} \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{\sqrt{s_0^2 + j_1^2}} / \\
 & \left[ \sqrt{y_1^2 + \left( x_1 - \frac{d_{13} \sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{2\sqrt{s_0^2 + j_1^2}} \right)^2} + \right. \\
 & \left. + \sqrt{y_1^2 + \left( x_1 + \frac{d_{13} \sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{2\sqrt{s_0^2 + j_1^2}} \right)^2} \right], \quad (2)
 \end{aligned}$$

где  $s_0$  – расстояние от фокуса  $\Phi$  до плоскости изображения  $F$ .

Программа «Построение плана деревьев в лесонасаждении по фотоизображению», интерфейс которой показан на рис. 5, автоматически определяет на фотоизображении метку, основание дерева, диаметр дерева на высоте 1,3 м. Далее координаты  $(\phi, \xi)$  отмеченных точек на снимке по формуле (1) переводят в действительные координаты  $(x, y)$ . Диаметр дерева на высоте 1,3 м и высоту дерева определяют по формуле (2). Итогом работы программы является план расположения учётных деревьев лесонасаждения на местности с указанием таксационных характеристик для каждого дерева.

Внедрение автоматизированной системы построения плана расположения деревьев в лесонасаждении значительно снизит затраты труда и времени при лесотаксационных работах, инвентаризации леса и других лесохозяйственных мероприятиях, что позволит сделать лесное хозяйство страны более эффективным и экономически выгодным.



# ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

Е.Н. Сосенушкин

## ПРОГРЕССИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ



2011 г. 480 с. ISBN 978-5-94275-596-6

**Цена 600 р.**

Освещены концепции проектирования технологических процессов холодной и полугорячей объемной штамповки, системы представления и обработки знаний о деталях, автоматизации решений системных задач проектирования технологии, системного проектирования штамповой оснастки для формоизменяющих операций.

Для разных термомеханических условий и прочих факторов проанализирован ряд физических моделей выхода из строя рабочих деталей штампов, и на основе их математических аналогов построена система прогнозирования стойкости и выбора штамповых материалов.

Для специалистов и инженерно-технических работников, занимающихся разработкой и промышленным внедрением прогрессивных технологий, систем их проектирования и экспертной оценки. Монография будет полезна для аспирантов и студентов машиностроительных вузов.

УДК 62-82

**Я.А. Даршт,** д-р техн. наук

(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, г. Ковров),

**И.Н. Холкин** (ООО «Системные технологии», г. Ковров)

darscht@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ОПОРЫ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВОГО НАСОСА

*Разработана имитационная модель гидростатической опоры поршней аксиально-поршневой гидромашины и приведены результаты новых исследований, выполненных с использованием разработанной модели.*

**Ключевые слова:** гидростатический привод, насос, гидростатическая опора поршня, математическая модель, имитационная модель, модельные исследования.

*The simulation model of a pistons hydrostatic support for the axial-piston hydraulic machine is developed and new research results, that carried out through the use of developed model are adduced.*

**Key words:** hydrostatic drive, pump, pistons hydrostatic support, mathematical model, simulation model, model research.

Сегодня востребованы аксиально-плунжерные гидромашины с рабочим давлением более 50 МПа. Для создания таких конструкций традиционных подходов проектирования уже недостаточно. В связи с этим расширяется применение различных видов моделирования гидромашин.

Основы системы моделей гидромашин и их гидростатических опор изложены в работах [1–3]. Ниже приведена новая разработка – подробная имитационная модель гидростатической

опоры (ГСО) аксиально-плунжерного насоса, позволяющая учесть большое количество факторов, влияющих на её функционирование при высоких давлениях. Актуальность разработки связана с тем, что с переходом на новый, более высокий уровень давления всё сложнее обеспечить высокие значения объёмного КПД гидромашин и прежде всего из-за утечек по рабочей паре «гидростатическая опора поршня – наклонный диск». С повышением давления усложняются и условия работы этой пары трения, что снижает ресурс машин. Наличие имитационной модели позволяет направленно конструировать опору, функционирующую в новом диапазоне давлений, и за счёт этого обеспечивать требуемые характеристики.

На рис. 1 приведена расчётная схема ГСО, на основе которой формируется аналитическая модель для исследования её статических характеристик и имитационная модель для динамических исследований.

Математическая модель для исследования статических характеристик состоит из уравнения неразрывности потока и уравнения сил на поршне с ГСО.

Уравнение неразрывности потока

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0, \quad (1)$$

или

$$Q_{dp} = Q_3; \quad Q_{dp} = G\sqrt{(p_0 - p)}; \quad Q_3 = (kp)h^3,$$

где  $Q_{dp}$  – расход жидкости через дроссель;  $Q_3$  – расход жидкости через зазор  $h$  между рабочей поверх-

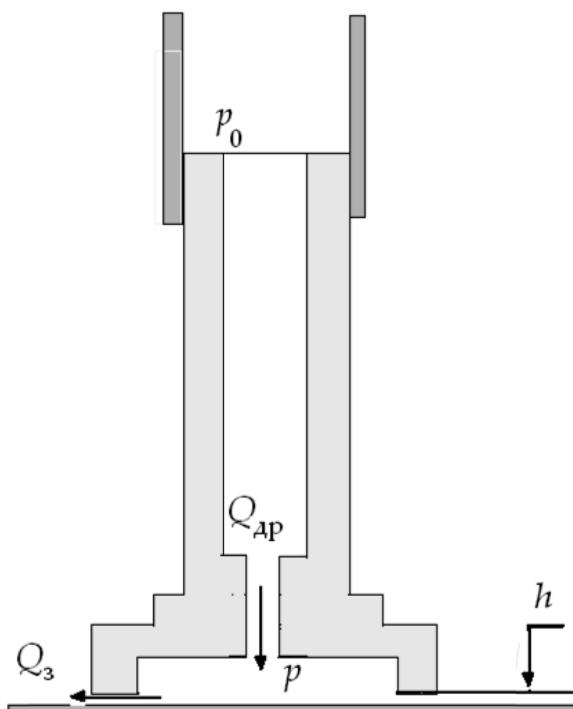


Рис. 1. Расчётная схема гидростатической опоры

ностью ГСО и наклонным диском;  $G$  и  $k$  – гидравлическая проводимость дросселя и константа в выражении проводимости зазора.

Уравнение сил, действующих на поршень с ГСО,

$$\sum_{j=1}^m F_j = 0 \quad (2)$$

или

$$F_0 = F; F_0 = p_0 f_0; F = p f,$$

где  $F_0, p_0, f_0, F, p, f$  – сила, давление и площадь со стороны поршня и ГСО.

Обозначим  $f_0/f = k_f$ . Тогда, объединив уравнения (1) и (2), получим

$$h = \frac{1}{\sqrt[6]{p_0}} \sqrt[3]{\frac{G}{k}} \sqrt[3]{\frac{\sqrt{1-k_f}}{k_f}}.$$

Полученное выражение используется для разработки методики предварительного расчёта ГСО.

Графики зависимости величины зазора от относительной величины давления  $p/p_0$  при разных соотношениях коэффициентов проводимости  $k_f$  приведены на рис. 2 (при  $k_f = 1,1$ ).

Горизонтальная координата – относительное давление, которое равно отношению квадратов диаметров поршня и ГСО:  $p/p_0 = (d/D)^2$ . Из графика по желаемому зазору и коэффициенту  $(d/D)^2$  можно определить величину соотношения  $G/k$ . Приведённые зависимости для заданного рабоче-

го давления позволяют предварительно выбрать основные конструктивные параметры ГСО: диаметр опоры и диаметр дросселя поршня, ширину уплотняющего пояска и др. Результаты контролируются расчётом утечек жидкости. По результатам расчёта прорабатывается 3D модель узла, затем на микромоделях определяется деформация под нагрузкой, а также эпюры давления на уплотняющем пояске. Постпроцессорной обработкой результатов микромоделирования рассчитываются поправочные коэффициенты отжимающей силы ГСО для её имитационной модели.

Основу имитационной модели, предназначенной для исследования функционирования ГСО, также составляет приведённая выше математическая модель. Но уравнение неразрывности потока расширяется за счёт учёта расходов деформационного и поршневого, возникающего из-за движения поршня относительно наклонного диска. Дополнительные члены вводятся и в уравнение сил: силы инерции, вязкого и сухого трения, гидродинамической силы взаимодействия ГСО и наклонного диска, контактного взаимодействия при металлическом контакте ГСО и наклонного диска. Данные об этих силах получаются анализом в микромоделях течения жидкости в зазоре.

Имитационная модель ГСО в целом состоит из трёх частей: блок  $N$  – блок динамических характеристик насоса;  $P$  – блок расчёта движения поршня с ГСО под действием давлений;  $D$  – блок расчёта давления, отжимающего ГСО от опоры.

Входные параметры блока  $N$ :  $w$  – угловая частота вращения ротора насоса;  $g$  – угол наклона диска насоса; выходные параметры:  $v$  и  $x$  – скорость и перемещение поршня вдоль оси ротора насоса;  $dv$  – разница реальной и идеальной ско-

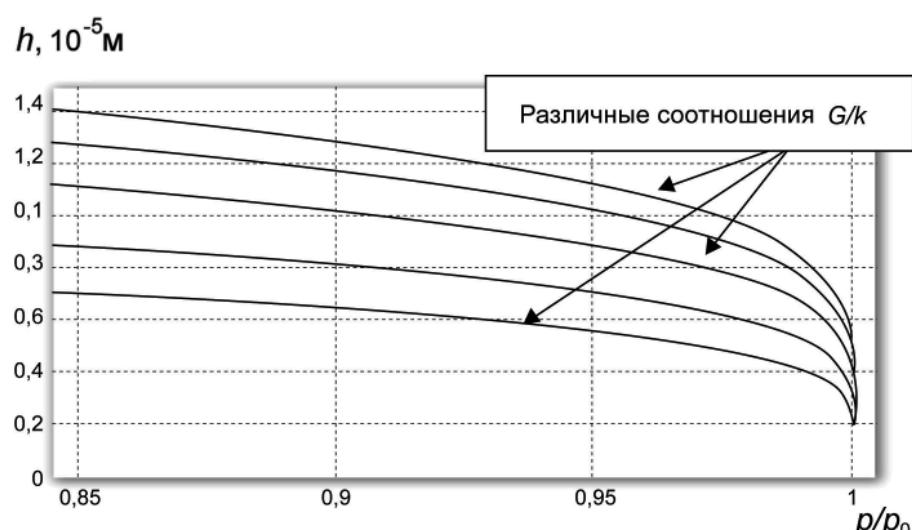


Рис. 2. Графики зазора  $h = f(p/p_0, G/k)$

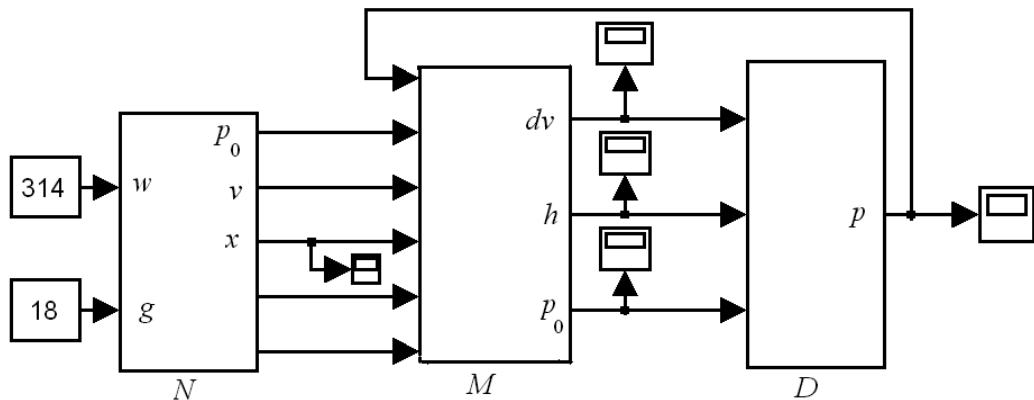


Рис. 3. Укрупнённая структурная схема модели гидростатической опоры

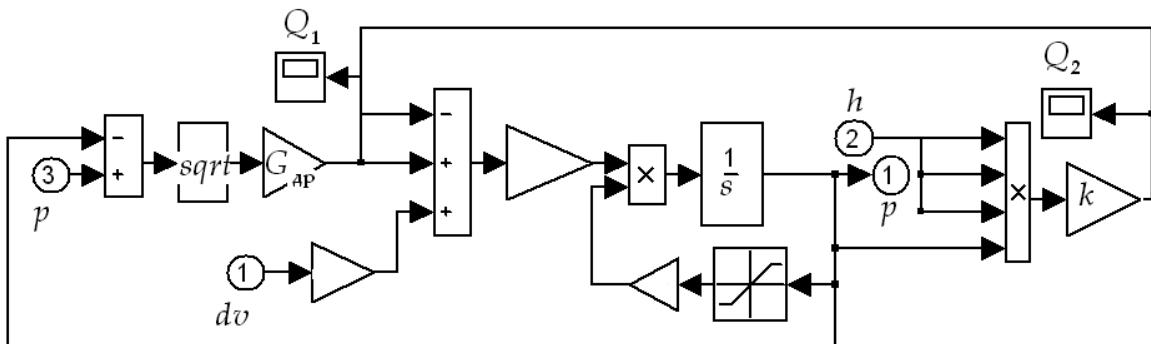


Рис. 4. Структурная схема блока D

рости поршня, идеальной при его контакте с наклонным диском. В блоке  $N$  формируются параметры внешних воздействий на ГСО. В частности, это давление в гидролиниях привода, угол наклона диска, координата и скорость точки наклонного диска, находящейся под опорой, другие параметры.

Укрупнённая структурная схема модели ГСО приведена на рис. 3.

Особый интерес представляет модельный блок  $D$ , внутренняя структура которого приведена на рис. 4. Сумматор на рис. 4 отображает уравнение неразрывности потока в междроссельном объёме, где формируется отжимающее опору давление  $p$ . На входе в междроссельный объём – модель квадратичного дросселя с проводимостью  $G_{dp}$  и расходом  $Q_1$ . На выходе – модель зазора между ГСО и наклонным диском с коэффициентом проводимости  $k$ , где расход через зазор  $Q_2$  описывается формулой Пуазеля. На рисунке  $sqr$  обозначает операцию извлечения квадратного корня;  $s$  – оператор Лапласа.

Имитационная модель позволяет в динамическом процессе исследовать влияние на величину зазора, величину утечек жидкости и силу контак-

та следующих факторов: диаметра дросселя, диаметра расположения уплотнительного пояска, гидродинамической силы, жёсткости опоры, соотношения площадей прижима и отжима, пластичности контакта, а также влияние поршневого эффекта, междроссельного объёма, инерционности поршня, вида индикаторной диаграммы насоса, частоты вращения вала насоса, угла наклона органа регулирования подачи насоса, уровня рабочего давления, уровня давления подпитки, моторного или насосного режимов и др.

С помощью модели проведены исследования характеристик ГСО конкретного насоса с рабочим объёмом  $45 \text{ см}^3/\text{об}$  (насос разработки предприятия СКБ ПА, г. Ковров). Некоторые результаты этих исследований приведены ниже.

Для изучения влияния параметров на величину зазора выбран базовый вариант расчёта со следующими данными: диаметр поршня  $1,64 \text{ см}$ , масса поршня  $100 \text{ г}$ , диаметр дросселя  $0,8 \text{ мм}$ , коэффициент  $k_f = 1,1$ . Режим работы машины – насосный, угловая скорость вращения ротора насоса  $314 \text{ с}^{-1}$ , угол наклона опорного диска  $18^\circ$ , давление подпитки  $2 \text{ МПа}$ , напора  $47 \text{ МПа}$ . Входные параметры для модели: скорость вращения

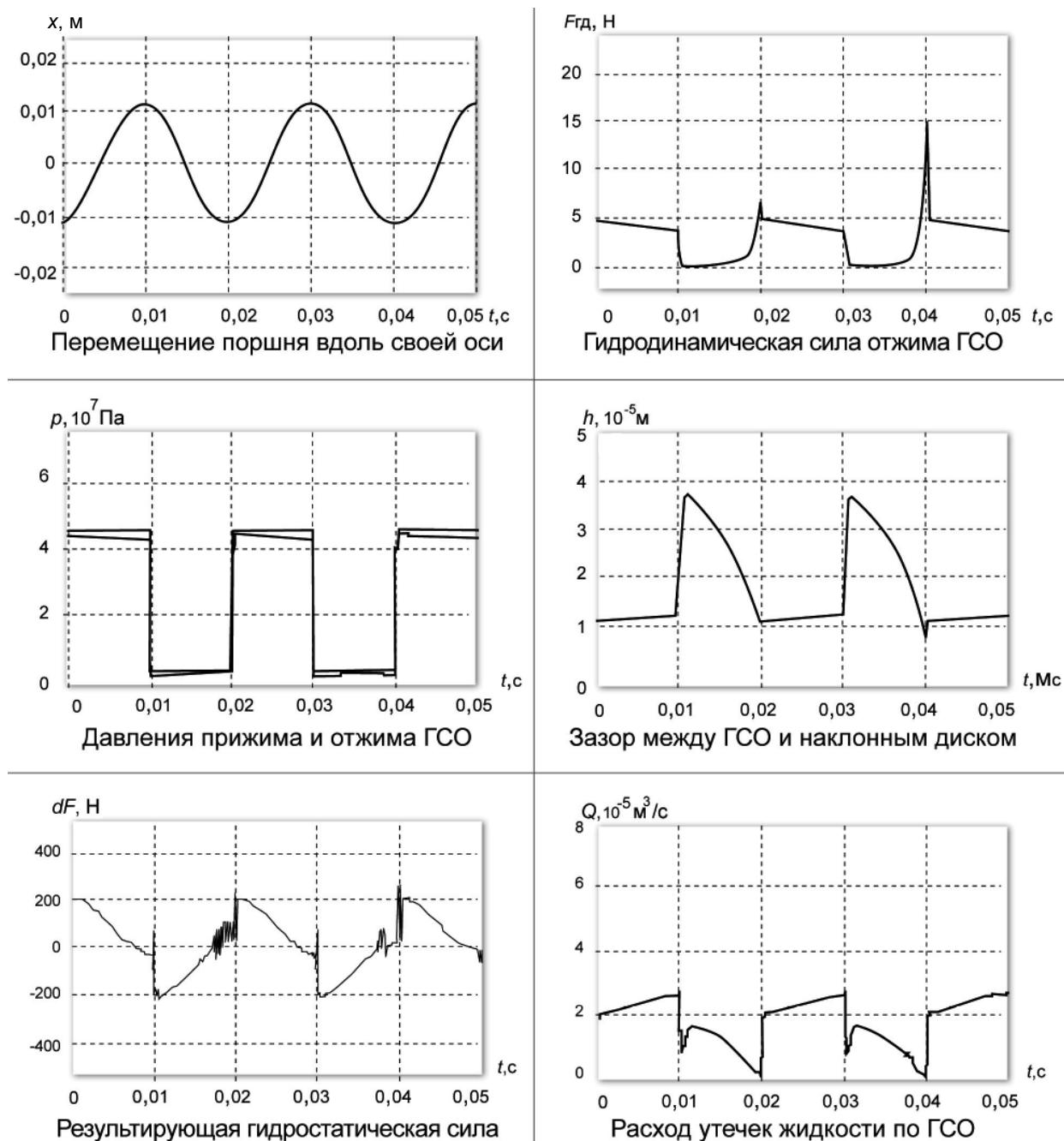


Рис. 5. Характеристики функционирования гидростатической опоры в базовом режиме

ротора насоса, угол наклона диска. Поршень по-переменно находится то в области напора, то подпитки. Расчётные графики – это зависимость от времени различных параметров и прежде всего величины зазора ГСО.

Результаты расчётов базового варианта представлены на рис. 5.

На основании приведённых данных можно сделать заключение, что в базовом режиме характеристики ГСО удовлетворительны: нет касаний ГСО ни наклонного диска, ни сепаратора. Диапазон изменения зазора 11–38 мкм. До металличес-

кого контакта есть запас 8,5 мкм. Утечки составляют в среднем 4,5 %, что подтверждается экспериментом. Движущая гидростатическая сила хорошо компенсирует силы инерции и трения.

Ниже приведены результаты модельных экспериментов, выполненные в других режимах. Целью расчётов является изучение влияния изменения параметров на величину зазора. Исследовались насосный и моторный режимы, изменение силы трения, массы поршня, угла наклона диска, рабочего давления, вязкости рабочей жидкости и др. (рис. 6).

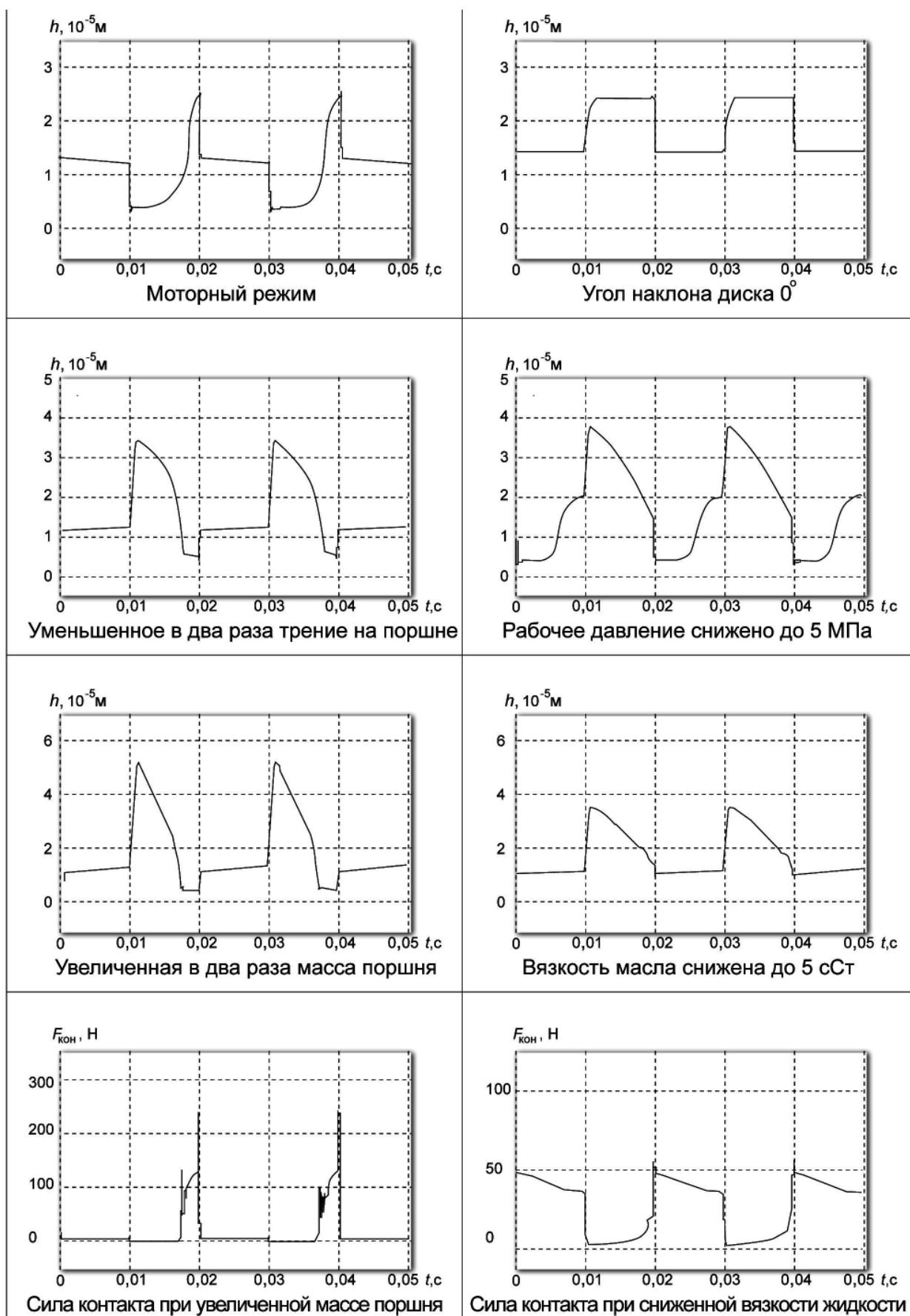


Рис. 6. Модельные исследования характеристик гидростатической опоры в разных режимах

Из графиков видно, что характер изменения зазора при работе машины в моторном режиме резко отличается от изменения зазора при насосном режиме. Но средние цифры примерно такие же.

Снижение трения в паре поршень – отверстие блока цилиндров снижает минимальный зазор. Результат относительно неожиданный. Это объясняется совпадением по направлению сил трения и инерции, которые должны преодолеваться гидростатическим усилием отжима. Металлического контакта ГСО с наклонным диском нет (зазор более 2,5 мкм).

Увеличение массы поршня снижает минимальный зазор до 2,5 мкм, что соответствует неплоскости рабочей поверхности ГСО. Поэтому появляется металлический контакт ГСО с наклонным диском, однако усилие контакта незначительно (100 Н).

С уменьшением угла наклона диска характер изменения зазора приближается к прямоугольной форме, то же имеет место и при снижении частоты вращения вала гидромашины. Это близко к статической характеристике ГСО.

Уменьшение рабочего давления увеличивает амплитуду колебания зазора, так как ослабевает стабилизирующий эффект ГСО из-за снижения жёсткости «пружины» ГСО. Снижение рабочего давления до 5 МПа приводит к касанию ГСО диска. Утечка в этом режиме снижается в 2 раза из-за снижения давления.

С нагревом жидкости вязкость масла снижается и зазор уменьшается. В этом случае возникает металлический контакт ГСО и диска.

Другие исследования показали, что в отдельные моменты (в переходных режимах) при некотором сочетании параметров в узком диапазоне наблюдается увеличение зазора с увеличением давления, т. е. просматривается элемент положительной обратной связи. Это связано с тонким балансом соотношения усилий прижима и отжима, угла наклона диска, давления и др.

В заключение отметим, что при подготовке имитационной модели ГСО ряд коэффициентов рассчитывается в других моделях. Практика мо-

делирования показала, что эффективно комплексное использование нескольких видов моделирования: моделирование гидродинамики потока жидкости в зазорах гидромашин и моделирование напряженно-деформированного состояния элементов конструкции. Основой для всех этих видов моделирования служит твёрдотельная 3D модель конструкции.

Цепочка использования моделей при проектировании элементов гидромашин рекомендуется следующая: на основе анализа статических характеристик делается эскиз 3D модели гидромашины или её узла, далее исследуется напряжённо-деформированное состояние элементов конструкции: напряжённо-деформированное состояние изменяет исходную конфигурацию зазоров в сопрягаемых рабочих парах гидромашин. С учётом новой конфигурации зазоров рассматривается течение жидкости в этих зазорах и более точно выясняется характер взаимодействия элементов в парах трения. Результаты расчётов обобщаются и вводятся в имитационную модель, где исследуются результирующие характеристики машин или их узлов с учётом выявленных при предыдущем моделировании эффектов. Результаты анализируются, разрабатываются новые конструктивные решения и проводится новый цикл исследований.

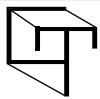
С использованием комплекса моделей на предприятии СКБ ПА (г. Ковров) разработаны аксиально-поршневые насосы и моторы различных типоразмеров, разного уровня рабочего давления, которые успешно используются в гидроприводах современной мобильной техники.

#### **Библиографические ссылки**

1. Даршт Я.А. Система имитационных моделей гидромашин // Приводная техника. 2003. № 4. С. 56–60.
2. Даршт Я.А., Пузанов А.В., Холкин И.Н. Комплекс моделирования гидромашин и гидросистем // САПР и Графика. 2003. № 6. С. 58–61.
3. Даршт Я.А., Холкин И.Н., Пузанов А.В. Исследование гидростатических опор плунжеров высоконагруженных аксиально-поршневых гидромашин // Автоматизация и современные технологии. 2004. № 3. С. 7–13.

## **Уважаемые читатели!**

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При этом ссылка на журнал обязательна.



УДК 681.3.06:001

**А.Г. Крампит**, канд. техн. наук, доц., **Н.Ю. Крампит**, канд. техн. наук, доц.  
 (Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета,  
 г. Юрга)  
 akrampit@mail.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ «КОМПАС» ДЛЯ РЕШЕНИЯ НАУЧНЫХ ЗАДАЧ

Для повышения качества и производительности процесса научного исследования предложена методика по определению геометрических размеров и площади сварного шва при использовании компьютерной программы.

**Ключевые слова:** качество, сварка, геометрические размеры, площадь, методика, компьютерная программа.

*Methodology for definition of the weld geometrical sizes and area meant to rise of the scientific research process quality and productivity by the use of computer program is proposed.*

**Key words:** quality, welding, geometrical sizes, area, methodology, computer program.

**Введение.** Конкурентоспособная продукция создаётся в результате комплекса мероприятий, одним из этапов которых является современная технология, построенная на основе новейших разработок науки и техники. Использование программных продуктов направлено на решение таких вопросов, как минимизация трудоёмкости, повышение производительности и качества процессов. В работе [1] отмечено, что большое значение имеет автоматизация моделирования, позволяющая более точно и полно изучать исследуемые объекты и явления, ускорять ход научных исследований и снижать их трудоёмкость, изучать сложные объекты и процессы, исследование которых традиционными методами затруднительно или невозможно.

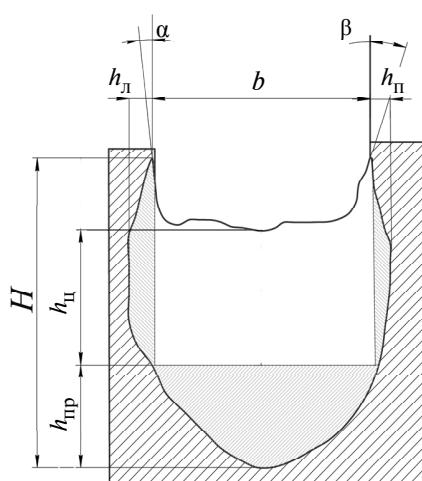


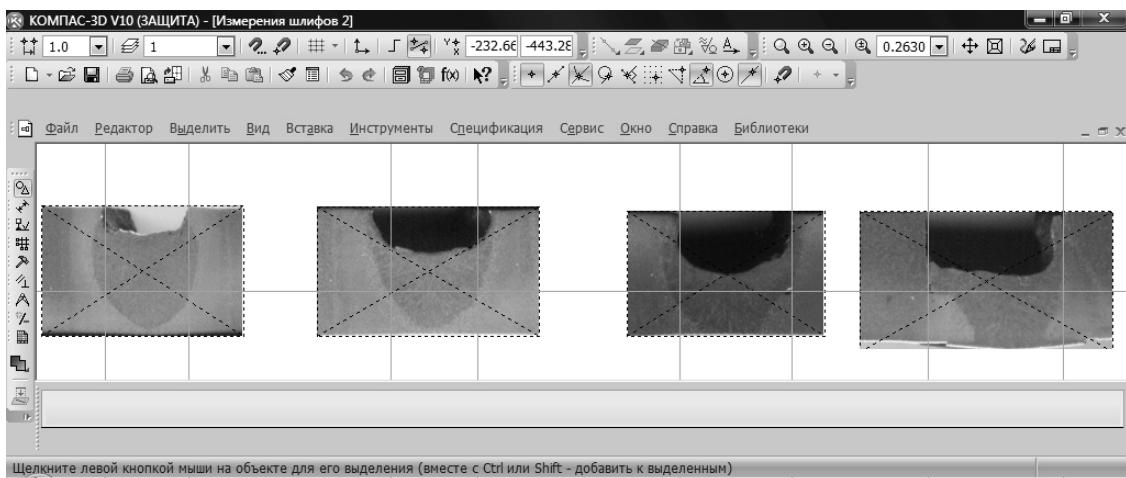
Рис. 1. Геометрические размеры сварного шва

Качество сварки зависит от особенностей протекания технологического процесса и включает ряд единичных показателей: механические свойства, геометрические размеры шва, коробление и структурные изменения, усталостную прочность и долговечность, коррозионную стойкость, наличие дефектов, а также экономические и эстетические показатели. При изготовлении сварных конструкций получение сварного шва с заданными геометрическими размерами является одной из важных задач повышения качества продукции.

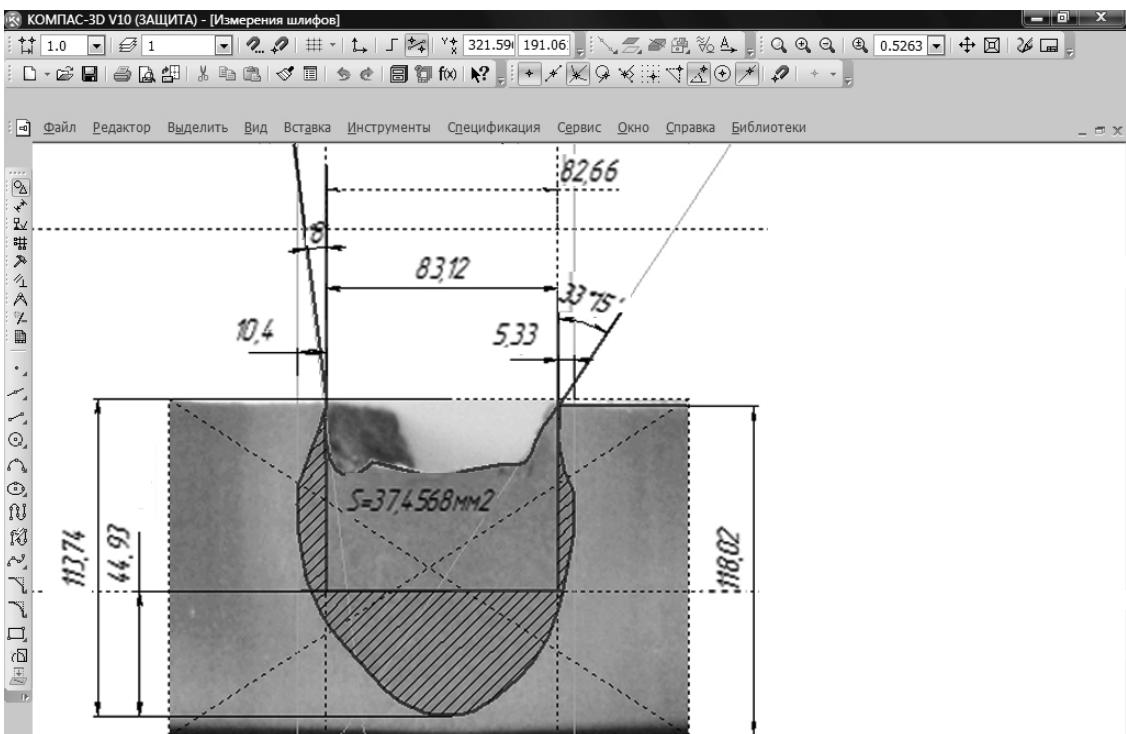
Для повышения качества и производительности процесса научного исследования предложена методика по определению геометрических размеров и площади сварного шва при использовании компьютерной программы.

**Постановка задачи.** Для полной картины получения качественного сварного соединения необходимо найти и проанализировать следующие показатели (рис. 1): общую площадь шва; площадь проплавления в корне шва; площадь наплавленного металла; площадь проплавления шва с боковыми кромками; высоту шва  $H$ ; глубину проплавления шва  $h_{\text{пр}}$ ; высоту шва по центру  $h_{\text{ц}}$ ; глубину сплавления шва справа  $h_{\text{п}}$ ; глубину сплавления шва слева  $h_{\text{л}}$ ; угол сплавления с правой кромкой  $\beta$ ; угол сплавления с левой кромкой  $\alpha$ , ширину разделки  $b$ .

В качестве компьютерного продукта выбрана программа «Компас 3D-V10» фирмы «АСКОН», так как это постоянно совершенствующаяся система автоматизированного проектирования, максимально настроенная под российские стандарты. Также эта программа предъявляет минималь-



**Рис. 2. Лист программы «Компас 3D-V10» с макрошлифами сварных соединений**



**Рис. 3. Лист программы «Компас 3D-V10» с макрошлифом сварного соединения и проставленными геометрическими размерами**

ные требования к компьютеру, быстро устанавливается и отличается высокой эффективностью и производительностью.

Методика заключалась в следующем: макрошлифы сварных швов сканировали, затем их изображения увеличивали 10-кратно, что позволяет получить значения с большей степенью точности. Увеличенные изображения макрошлифов размещали на листе программы «Компас 3D-V10». С помощью вспомогательных линий foto

образцов выставляли по одной линии и проводили перпендикулярные линии в местах нахождения кромок сварных соединений (рис. 2). Слой с изображениями фиксировали, затем накладывали новый слой и измеряли размеры. Для этого обрисовывали форму сварных швов и линии сварных кромок, используя стандартные инструменты (рис. 3).

Затем определялась площадь шва как сумма площадей проплавления в корне шва, наплавлен-

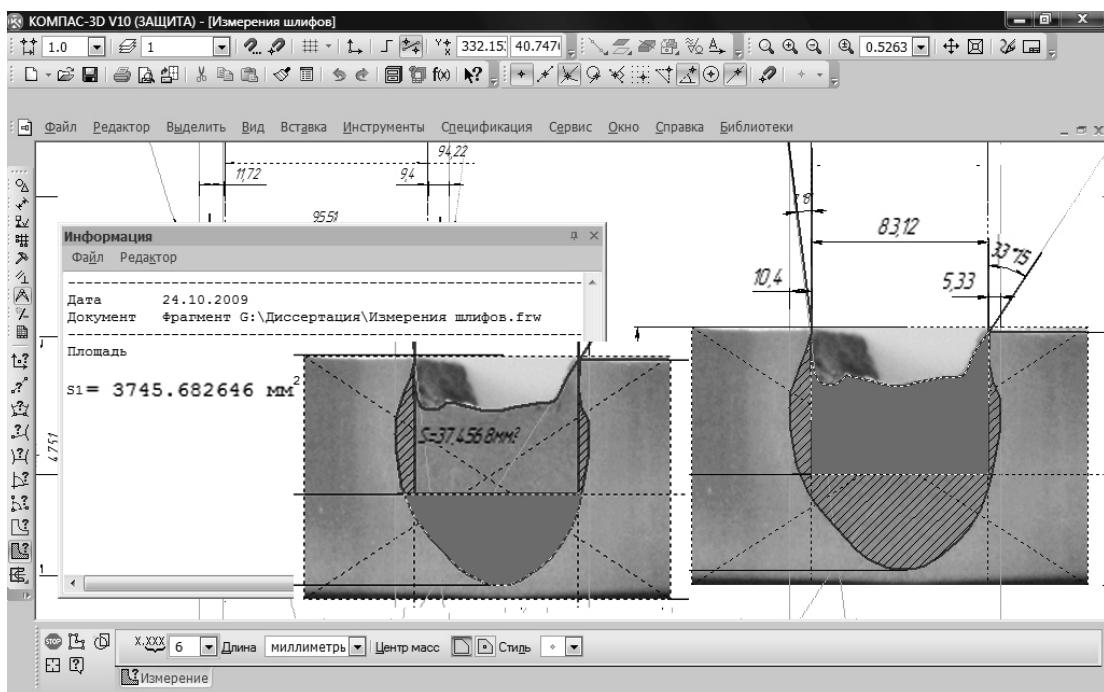


Рис. 4. Определение площади сварного валика

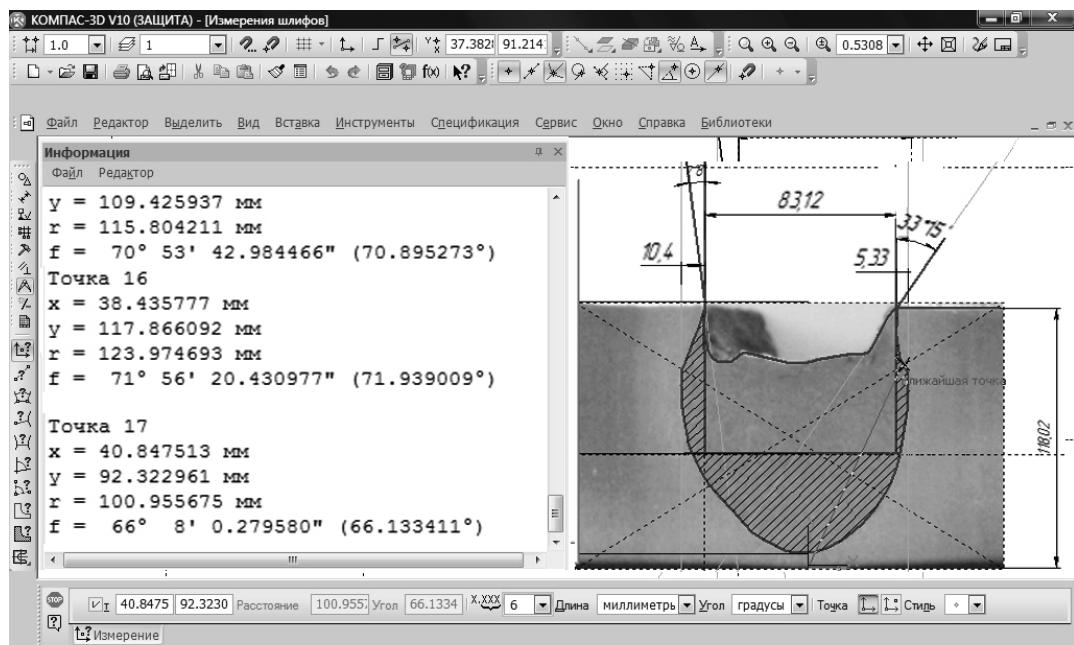


Рис. 5. Определение координат точек нижней поверхности сварного валика

ного металла и проплавления с боковыми кромками (правой и левой). На рис. 4 показан пример определения площади проплавления и площади наплавленного металла (площадь образца приведена в 100-кратном увеличении).

Используя инструмент «информация» и выбрав начало координат, снимали значения точек кривой линии, описывающей контур сварного шва. С

помощью этих значений находили уравнения внешней и внутренней поверхностей сварного шва, а также уравнения зависимостей геометрических размеров сварного шва от ширины разделки  $b$  и параметров импульсного питания (рис. 5).

На рис. 6–9 представлены зависимости геометрических размеров и площадей сварного шва от ширины разделки.

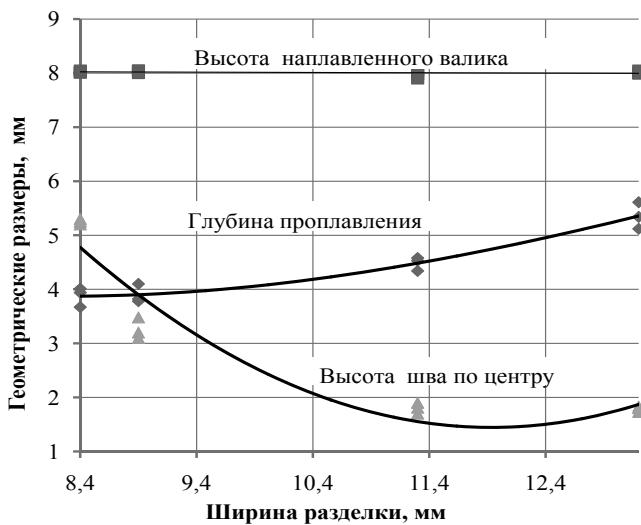


Рис. 6. Зависимости геометрических размеров (глубины проплавления, высоты наплавленного валика, высоты по центру) от ширины разделки

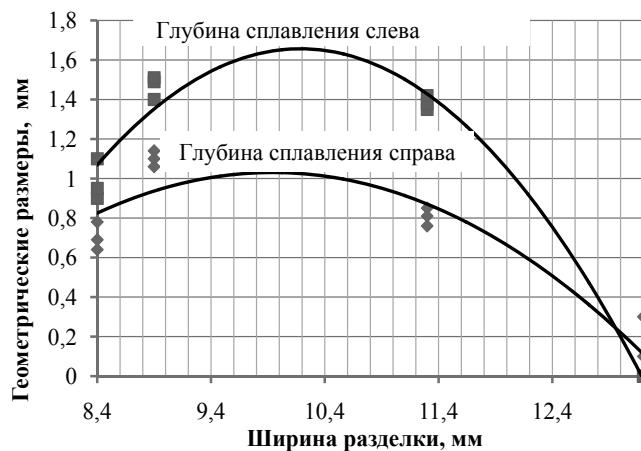


Рис. 7. Зависимости геометрических размеров (глубины сплавления слева и справа) от ширины разделки

Проанализировав зависимости, можно сказать, что увеличение ширины разделки практически не влияет на высоту шва, при этом с увеличением ширины разделки незначительно увеличивается глубина проплавления (с 4 до 5 мм) (см. рис. 6). Это объясняется изменением высоты шва по центру и, как следствие, снижением гидростатического давления жидкости на интервале наложения импульса. При этом жидкий металл может дополнительно перераспределяться на боковые кромки. При отсутствии сплавления (ширина разделки более 13 мм) сварной валик имеет также форму вогнутого мениска.

При изменении ширины разделки с 8,4 до 9 мм происходит увеличение глубины сплавления слева с 1,1 до 1,5 мм, а справа – с 0,8 до 1,1 мм. При

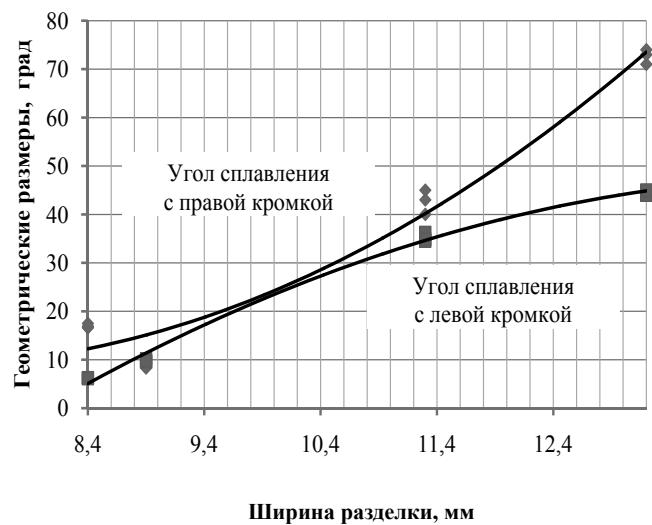


Рис. 8. Зависимости геометрических размеров (угла сплавления сварного шва и кромки разделки) от ширины разделки

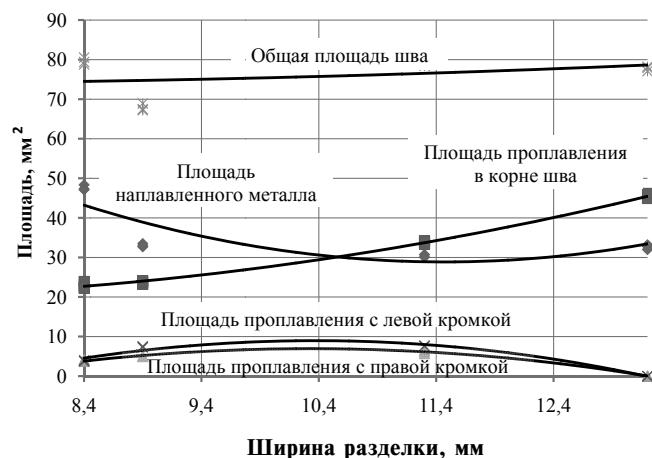


Рис. 9. Зависимости площадей сварного шва от ширины разделки

увеличении ширины разделки с 9 до 11 мм глубина сплавления справа и слева существенно не изменяется. Однако при дальнейшем увеличении разделки данное геометрическое значение резко снижается вплоть до появления несплавлений (см. рис. 7).

Зависимость угла сплавления характеризуется линейной зависимостью от ширины разделки: происходит плавное нарастание угла до момента появления несплавлений. При расширении разделки более 9,5 мм наблюдается незначительная разница между формированием левой и правой кромками, вызванная вращением жидкого металла сварочной ванны, что сказывается на формировании сварного шва (см. рис. 8).

Проведённые эксперименты по исследованию процесса сварки в щелевую разделку [2] показали, что площадь наплавленного металла снижается. При увеличении ширины разделки площадь проплавления в корне шва увеличивается (при незначительном изменении общей площади сварного шва). Площадь проплавления с боковыми кромками имеет максимум при ширине разделки от 10 до 11 мм (см. рис. 9).

Таким образом, используя компьютерные программы и стандартные приложения, можно увеличить точность проведённых измерений и число измеряемых параметров, а также улучшить наглядность при анализе результатов исследования. Применение данной методики позволяет с большей точностью определить геометрические раз-

меры и площадь сварных швов. Предложенную методику можно рекомендовать для учебного процесса, так как она способствует болееному и наглядному представлению материала.

#### **Библиографические ссылки**

1. Изотов В.Н., Ивутин А.Н. Проблемы создания высоконадёжных специализированных автоматизированных систем научных исследований и комплексных испытаний // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 12. С. 30–31.

2. Князьков А.Ф., Крампин А.Г., Крампин Н.Ю. Разработка технологических рекомендаций для процесса сварки в щелевую разделку при импульсном питании сварочной дуги // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 12. С. 3–5.

УДК 621.058.013.8

**А.Ф. Ширялкин**, канд. техн. наук, доц.  
(Ульяновский государственный технический университет)

a.shiryalkin@ulstu.ru

### **О ПРОБЛЕМАХ КАЧЕСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СРЕД**

*Предложена концепция генетического (классификационно-эволюционного) подхода к систематизации машиностроительных производственных сред, сформированная на основе опыта внедрения групповых технологий на различных предприятиях и анализа существующих классификационных систем. Указанный групповой метод используется наряду с другими, рассматриваемыми при разработке классификационной системы информации о детали, необходимой для формирования эффективной производственной среды предприятия, в первую очередь её информационного качества.*

**Ключевые слова:** систематизация, классификация, производственная среда предприятия, групповая технология, техническая подготовка производства.

*The genetic (systematic-evolutionary) approach concept to machine-building industrial environments systematization, generated on the experience basis of the group technologies introduction at the various enterprises and the analysis of existing classification systems is proposed. The indicated group method is used along with others, considered when classification system designing of the information about detail necessary for formation of the effective industrial enterprise environment and, first of all, its information quality.*

**Key words:** systematization, classification, enterprise industrial environments, group technology, enterprise technical preparation.

Понятие «качество» представляет собой сложную многоаспектную и одновременно универсальную категорию объекта. Философский аспект качества означает существенную определённость объекта, благодаря которому он является именно этим, а не иным. Это определение в контексте «существенная определённость объекта» стало основанием для разработки термина информаци-

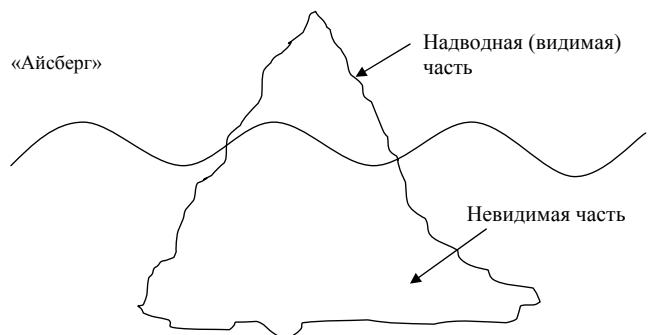
онное качество. При этом исходили из тезиса, что информация о любом материальном объекте (даже самом незначительном) в принципе бесконечна, поэтому выделить все его признаки качества невозможно. Вследствие этого характеристика качества объекта (продукции, изделия) ограничена некоторым набором, уровнем его существенных свойств или признаков. Представим мо-

дель качества объекта в виде информационного айсберга (рис. 1).

В этой модели понятие информационного качества объекта для потребителя в указанном философском контексте представляется как надводная часть информационного айсберга, состоящая из наиболее существенных его признаков. Полное информационное качество объекта можно представить как иерархическую совокупность отдельных свойств, расположенных на разных уровнях его информационной структуры, образуя некоторую классификационную систему признаков, являющуюся предметом деятельности производителя. Эта классификационная система, определяющая своими признаками информационное качество объектов производства, рождается и развивается в некоторой производственной среде, в которой, взаимодействуя с этими признаками, и создаётся изделие.

Таким образом, производственная среда предприятия (организации) – это производственное пространство предприятия (внутреннее и внешнее), составляющее элементы сложной человеко-машинной системы, в которой взаимодействие материальной и информационной сфер и создаёт изделие [1].

От информационного качества среды зависит и качество обмена информацией между элементами среды. При этом информационное качество производственной среды зависит от качества её систематизации. Под эффективностью производственной среды следует понимать соотношение эффекта применения результатов функционирования среды с затратами, связанными с её созданием. Эффективность производственной среды



**Рис. 1. Иерархическая информационная модель качества**

может быть экономической, технической, информационной, социальной. Рассмотрим информационную эффективность и качество производственной среды предприятия, основное содержание которых составляют процессы изготовления продукции, объединённые её жизненным циклом (ЖЦП) (рис. 2).

В плане развития информации модель может быть представлена в виде экспоненциально расширяющейся эволюционной спирали, каждый виток которой символизирует новый уровень совершенства изделия. Символ расширяющейся спирали информационного качества объекта – стрелка (см. рис. 2).

Для поддержания ЖЦП применяются CALS (ИПИ)-технологии (технологии информационной поддержки сфер промышленного производства продукции на всех этапах её жизненного цикла). Известно около 20 систем ИПИ.



**Рис. 2. Информационная модель жизненного цикла продукции**

При автоматизированном проектировании в САПР машиностроительных отраслей промышленности выделяются системы функционального (системы расчётов и инженерного анализа или системами – CAE (Computer Aided Engineering), конструкторского – CAD (Computer Aided Design) и технологического проектирования – CAM (Computer Aided Manufacturing). Функции координации работы систем CAE/CAD /CAM, управления проектными данными и проектированием, включая процесс внесения изменений, выполняет система управления проектными данными PDM (Product Data Management), как ключевое средство управления конфигурацией CALS/ИПИ. PDM-система улучшает коммуникации и взаимодействие между различными группами сотрудников, формирует на предприятии основу для организации процесса проектирования и производства изделия.

Информационная поддержка этапа производства продукции осуществляется автоматизированными системами управления предприятием (АСУП), а также системами планирования и управления ресурсами предприятия ERP (Enterprise Resource Planning). Наиболее развитые системы ERP выполняют различные бизнес-функции, связанные не только с планированием производства, но и с закупками, сбытом продукции, анализом перспектив при маркетинге, управлением финансами, персоналом, складским хозяйством, учётом основных фондов и т. п.

Однако, по мнению некоторых российских специалистов [2], занимавшихся работами по внедрению ERP-систем, эти работы обладают длительным временным промежутком, дороги и не гарантируют успеха. Установка системы ERP на предприятии занимает от трёх до пяти лет, а затраты на одно рабочее место составляют примерно 10 тыс. долл. США. Следует отметить негативный опыт внедрения системы ERP на предприятиях оборонного комплекса (концерн ПВО «Алмаз-Антей»). При этом основными проблемами по их адаптации на российских предприятиях являются несовместимость логики функционирования системы со сложившимися методами работы, а также трудности подготовки основных данных.

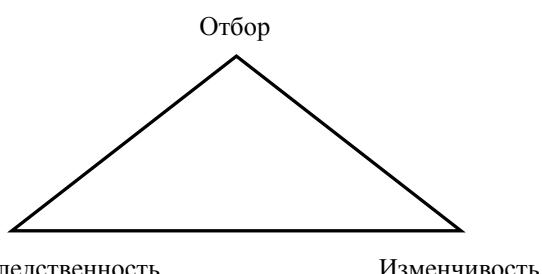


Рис. 3. Системная триада синтеза изделия

Таким образом, учитывая разнокалиберность машиностроительных предприятий и их разные возможности наиболее приемлемой может быть альтернатива самостоятельного построения на предприятии корпоративной системы управления. Формирование информационного обеспечения системы необходимо начинать с начального уровня, автоматизируя при этом наиболее простые задачи. В этом случае основные данные могут закладываться постепенно, эволюционируя на определённых системных уровнях представления информации, не ломая логики производственного процесса, так как чаще всего на предприятиях многие элементы систем ИПИ уже существуют.

Эволюционные процессы в области техники подчиняются законам техноэволюции, предложенным Б.И. Кудриным [3]. Главным из них является закон информационного отбора. Техноэволюция повторяет черты биологической эволюции на качественно ином уровне с отличиями, вытекающими из отделения документа – отобранной, согласованной и утверждённой установленным образом информации, закреплённой на соответствующем носителе. Оптимальная и наиболее устоявшаяся информация закрепляется в стандартах.

Научную основу техноэволюции представляет технетика – наука об общих законах развития технической реальности (техники, технологии, материала, продукции, отходов) и принципах создания изделий и их сообществ [3]. Эти категории в приложении к машиностроительным понятиям рассмотрены в таблице.

Данные категории могут развиваться в конкретных областях техники на всех этапах ЖЦП, проходя различные стадии информационного отбора. Например, на этапе проектирования разрабатываются ТУ на изделие, производится НИР, конструкторская, технологическая и другие виды подготовки производства. При этом образуются разные виды документа. Заметим, что документ, в первую очередь стандарт, является основой технической (технетической) наследственности машиностроительного производства как цельного живого организма. При этом процесс его создания (как и создания самого изделия) осуществляется в рамках известного биологического принципа, который можно представить в виде системной триады (рис. 3).

Полный комплект конструкторских, технологических и организационно-экономических документов на изделие, прошедших информационный и документальный отбор, который упорядочивает и закрепляет полный комплекс качественных и количественных признаков производственной среды, становится его генотипом – системой

### Основные категории технетики в машиностроении

Категория технетики	Определение категорий
Техноэволюция	Вид эволюции природы, повторяющей черты биологической эволюции на качественно ином уровне с различиями, вытекающими из отделения документа
Технетика	Наука об общих законах развития технической реальности (техники, технологий, материала, продукции, отходов) и принципах создания изделий и их сообществ
Техника	Виды оборудования, оснастки и инструмента, соответствующие определённым элементам производственной среды, предназначенные для изготовления требуемой продукции и взаимодействующие между собой в составе технологической системы и соответствующие определённым признакам информации о детали
Материал	Собирательный термин, обозначающий разнообразные вещественные элементы производства: металлы и сплавы; минерально-силикатные; полимерные (синтетические и природные); композиционные (композитные); покупные изделия
Технология (процесс)	Часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства во внутренней сфере производственной среды
Продукция	Результат взаимодействия материала, оборудования, оснастки и инструмента в составе технологической системы и реализации этапа ЖЦП «производство». Статус готовой продукции получает после её отбора в результате реализации этапа окончательного контроля
Отходы	Ненецевой продукт деятельности разных этапов ЖЦП, получающийся кроме полезной готовой продукции. Отмечено, что отходы от продукции, созданной с помощью машинных технологий, составляют около 98 % от объёма сырья, тогда как при биологических процессах отходы не более 2 %
Документ	Отобранные информации, согласованная и утверждённая установленным образом, закреплённая на соответствующем носителе
Генотип	Совокупность всей документации изделия, находящейся в информационной сфере производственной среды предприятия и предназначенная для её управления
Фенотип	Материализованное в процессе изготовления изделие как совокупность всех реализованных признаков генотипа
Техноген	Комплект документации на изготовление конкретной единичной детали
Техногеном	Совокупность систематизированной информации о детали (классификации), находящейся в информационной сфере производственной среды и способной эффективно управлять её зарождением и развитием, в том числе и качеством

взаимосвязанных единиц документированной информации, отвечающих за структуру и конкретное наполнение изделия. Таким образом, генотип изделия закрепляет информационную структуру производственной среды, определяя направления в динамике организационных потоков жизненного цикла, т. е. технологию производственных процессов. Также заметим, что изначальной информационной основой подавляющего большинства документов указанного выше комплекта, структурирующего производственную среду, служат детали изделий основного производства.

В машиностроении основным проявлением понятия технология является технологическая система. Поэтому на следующем этапе ЖЦП (материально-техническом снабжении) отбираются элементы технологической системы, осуществляющие процесс производства: материалы, комплектующие, а также оборудование, инстру-

мент и приспособления для поставки на предприятие.

Вещественным проявлением воздействия отобранный информации на техпроцесс изготовления изделия в машиностроении является появление категории материал. При этом информационное качество материала детали определяется совокупностью свойств сырья, полуфабриката и заготовки.

Под технической категорией техника, эксплуатируемой в производственной среде машиностроительного предприятия, понимаются определённые виды оборудования, оснастки и инструмента, предназначенные для изготовления продукции и взаимодействующие между собой в составе технологической системы (ТС). В информационном плане совместно с материалом ТС представляет многоуровневую и многомерную систему, предназначенную для материализации требуемого изделия.



**Рис. 4. Модель взаимодействия технологической системы с заготовкой в производственной среде**

Внешне проявленное, материализованное в процессе изготовления изделие, как совокупность реализованных признаков генотипа, становится его (изделия) фенотипом, который складывается в результате взаимодействия генотипа с конкретными условиями производственной среды. С появлением фенотипа можно говорить о категории продукции, которая возникает в результате реализации этапа «производство». При этом информационное качество детали как продукции определяется системной тетрадой [1], представляющей совокупность качеств оборудования, оснастки и инструмента и заготовки составляющих ТС (рис. 4).

Продукция считается готовой после её отбора в результате реализации этапа контроля. Отходы – это негативные результаты многих этапов ЖЦП, поэтому требуется присутствие утилизации, предваряющего процессом отбора изделий и компонентов негодных к эксплуатации. Вопросы утилизации и переработки отходов, как варианты решения экологических проблем, для многих машиностроительных предприятий являются важными видами деятельности.

Исходная, существенная и наиболее сложная часть функций машиностроительной производственной среды (до 60 % объёма производства) – изготовление деталей машин. Поэтому информация о детали основного производства представляется главные кирпичики, из которых строится не только изделие, но и создаются его элементы производственной среды.

Тогда в рамках технетики комплект документации на изготовление конкретной единичной детали следует рассматривать как техноген изделия, т. е. единицу его наследственного материала, ответственного за формирование какого-либо элементарного признака фенотипа (признак материала, геометрической формы и др.). Заметим, что этот признак ставит в соответствие определенный признак внутренней производственной среды (признак оборудования, приспособления, инструмента). Более того, опосредованно этот же признак воздействует и на формирование внешней производственной среды (конфигурацию це-

ховых площадей и в конечном итоге на формирование завода в целом).

Роль техногена как источника базовой информации в производственном пространстве предприятия – первоначальное управление процессом изготовления детали и в целом всего изделия, в том числе и качеством. Важными критериями качества системы управления являются её оперативность и гибкость, что делает необходимым решение задач в реальном режиме времени. Последнее определяется целостностью системы техногенов, качество которой как элемента технической документации зависит от качества взаимосвязи техногена данной детали с другими техногенами производственной информации.

Целостная и компактная взаимосвязь техногенов осуществляется в техногеноме информации о деталях, которым в производственном пространстве предприятия может быть правильно построенная классификационная система (КС). Последняя структурно (на генетическом уровне), отвечая за процесс рождения (изготовления) изделия, определяет как его качество, так и качество процедуры рождения (производственный процесс). В зависимости от этого определяется не только качество изделий – фенотипов, но и уровни гибкости и оперативности производственных процессов, что в целом и определяет эффективность управления всей производственной системой предприятия. Таким образом, понятие техногеном изделия следует трактовать как совокупность систематизированной информации о детали, находящейся в единой информационной сфере производственной среды предприятия и способной эффективно управлять её зарождением и развитием.

Известно, что качество классификационной системы зависит от степени приближения к естественному типу, т. е. насколько её признаки существенны на каждом системно-информационном уровне [1] и насколько структура этих признаков адекватна рассматриваемой производственной системе. Существует ряд критериев естественности классификаций [1–4]. Наиболее приемлемыми из них к объектам в области техники являются [1–4]:

критерий Мейена–Шрейдера (естественная система – это система, отвечающая многим критериям реальности: объективности, надёжности (стабильности), прогностической силы и др.);

критерий Любичева (наиболее совершенной классификацией является такая, где все признаки объекта определяются положением его в системе. Естественной следует назвать такую систему, где количество свойств объекта, поставленных в функциональную связь с его положением в системе, является максимальным);

критерий Салина (С) или критерий целесообразности (естественной будет та классификация, которая позволяет достичнуть многих целей сразу).

Таким образом, рассматривая выбранные критерии, можно заключить, что критерии Мейена – Шрейдера и Салина взаимно дополняют друг друга и выявляют свойства классификаций (объективности, стабильности, прогностической силы), на основе которых достигаются множественные (многие цели сразу) результаты. С системной точки зрения это представлены внешние данные естественных классификаций. Внутренняя суть (структура связей между элементами системы и объектом) более чётко отражена в критерии Любищева, т. е. для получения классификации объекта высокого качества необходимо построить её так, чтобы количество свойств объекта, поставленных в функциональную связь с его положением в системе, являлось максимальным. Отсюда следует определение обобщённого критерия естественности классификаций:

естественной будет та классификация, которая отвечает многим критериям реальности: объективности, надёжности (стабильности), прогностической силе и др., где количество свойств рассматриваемого объекта, поставленных в функциональную связь с его положением в системе, является максимальным, позволяя при этом достичнуть многих целей сразу.

Таким образом, под эффективной производственной средой предприятия будем понимать сложную человеко-машинную систему, выполняющую на предприятии функции преобразования входящих компонентов в готовое изделие и структурированную классификационной системой естественного типа.

При этом объекты производственной среды должны выступать в виде автономных, но взаимосвязанных классификаций, управляемых определёнными признаками информации о детали, находящихся в структуре заранее сформированной КС деталей основного производства естественного типа.

Так как увеличение объектов в ходе технозависимости является процессом объективным, то необходимы методы снижения, их унификация и типизация. Качество реализации этих методов, при достаточной величине номенклатуры деталей, напрямую связано с качеством их классификации, а также с качеством проведения работ по классификации и кодированию деталей.

Наиболее совершенной системой, обладающей отработанным составом признаков и сравнительно развитой терминологией, является классификатор ЕСКД и связанный с ним техно-

логический классификатор деталей (ТКД) [5]. Однако исследования, проведённые на предмет их применения как основы автоматизированной системы технической подготовки производства (ТеПП), указали на ряд недостатков. Таким образом, необходим классификатор, обладающий более объёмной и упорядоченной структурой, чем структура классификатора ЕСКД. Таким требованиям может удовлетворять КС естественного типа.

Учитывая высокую системную сложность информации о деталях, а также необходимость рассмотрения всей номенклатуры деталей в реальном масштабе времени, практическая реализация указанных положений концепции представляет сложный процесс, качественно выполнимый в рамках некоторой комплексной автоматизированной системы ТеПП. Эта система, целостно объединяя решение многих технических задач и ускоряя их решение с помощью информационных технологий, генетически исходит из общей информации о деталях и, конкретизируясь, усложняется по мере нарастания системно-информационных уровней.

По существу, указанный подход приводит к рождению классифицировано-структурированной производственной среды, оптимальным образом объединяющей пользователей – участников производственного процесса с объектами управления. На машиностроительных предприятиях это касается в первую очередь создания эффективной системы технической подготовки производства. При всех особенностях подобных систем на различных предприятиях процесс их рациональной организации должен носить эволюционно-генетический характер, исходящий из правильно структурированной (естественно-классифицированной) информации о деталях основного производства.

#### **Библиографические ссылки**

1. Ширялкин А.Ф. Основы формирования многоуровневых классификаций естественного типа для создания эффективных производственных сред в машиностроении. Ульяновск: УлГТУ, 2009. 298 с.
2. Горностаев С.А., Меньщиков В.В. Основные направления информатизации концерна оборонно-промышленного комплекса России // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 7. С. 37–43.
3. Кудрин Б.И. Введение в технетику. Томск: Изд-во гос. ун-та, 1993. 552 с.
4. Забродин В.Ю. О критериях естественности классификаций // НТИ серия 2, 1980, № 8. С. 22–24.
5. Классификатор ЕСКД. Классы 71, 72, 73, 74, 75. Алфавитно-предметный указатель. Термины и толкования. Перечень сокращений слов. М.: Изд-во стандартов, 1986. 35 с.

УДК 62-971-98

**М.С. Чебкасов, Ф.А. Уразбахтин, д-р техн. наук, проф., Д.А. Курганов**  
 (Ижевский государственный технический университет, Воткинский филиал)

vtkbox246@udm.net

## АДАПТАЦИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТЫ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ\*

*Представлена математическая модель технологичности элементов ракеты, позволяющая на основе количественной оценки критичности конструкторских решений проводить адаптацию конструкции к условиям производства с обеспечением заданного уровня технологичности. Рассмотрен алгоритм определения критичных элементов и параметров конструкции по технологичности. Доказана возможность управления технологичностью элементов ракеты на этапе проектирования.*

**Ключевые слова:** математическая модель, технологичность, приборный отсек.

*The mathematical model of the rocket elements manufacturability is presented, allowing to carry out design adaptation to production conditions with ensuring of the manufacturability level set on the basis of a quantitative estimation of the design decisions criticality. The manufacturability definition algorithm of the design criticality elements and parameters is considered. Manufacturability control possibility of the rocket elements at a design stage is proved.*

**Key words:** mathematical model, manufacturability, instrument module.

При проектировании головных частей, приборных, переходных, двигательных и хвостовых отсеков управляемой трёхступенчатой баллистической ракеты (УТБР) разработчиком рассматривается и оценивается множество вариантов конструктивного исполнения деталей, сборочных единиц и узлов, входящих в их состав. Выбор исключенного варианта конструкции зависит от требований, представленных в техническом задании (ТЗ) на разработку, выполнение которых обеспечивает надёжное функционирование всех элементов при эксплуатации.

Одновременно с выполнением требований ТЗ разработчику при проектировании необходимо учитывать параметры технологичности конструкции, которые непосредственно влияют на сроки подготовки производства, трудоёмкость и себестоимость изготовления, а также затраты на дальнейшее техническое обслуживание.

Учёт и выполнение одновременно ещё и требований по технологичности особенно важно проводить именно на этапе проектирования. Это связано с тем, что для подтверждения выполнения требований ТЗ разработанная конструкция каждого элемента ракеты проходит длительный цикл экспериментальной отработки, по завершении которого внесение любых изменений в конструкцию (в том числе связанных с повышением её технологичности) требует повторного проведе-

\* Статья написана в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

ния испытаний и, как следствие, дополнительных материальных и временных затрат.

В работе предложена математическая модель технологичности конструкции корпуса приборного отсека (ПО) УТБР, составленная на основе количественной оценки критичности проектируемой разработчиком конструкции, на основе которой можно проводить адаптацию корпуса ПО УТБР с целью обеспечения заданного уровня технологичности.

Под *критичностью* понимается состояние конструкции ПО УТБР, при котором одновременно имеет значение:

частные показатели технологичности  $\bar{y}_{i,j} = f(X_n)$  – не ниже 0,75;  
 комплексные показатели технологичности  $Y_i = \varphi_1(\bar{y}_{i,j}, i = \overline{1, n_1}, j = \overline{1, m_1})$  – не ниже 0,85;  
 общий уровень технологичности  $Y_{\text{общ}} = \varphi_2(Y_i, i = \overline{1, n_1})$  – не ниже уровня технологичности  $Y_{\text{зак}}$ , определённого заказчиком проекта ПО УТБР, где  $f(X_n)$  – функция параметров конструкции приборного отсека;  $X_n$  – параметры конструкции приборного отсека;  $\varphi_1(\bar{y}_{i,j}, i = \overline{1, n_1}, j = \overline{1, m_1})$  – функция частных показателей конструкции приборного отсека;  $i$  – порядковый номер группы показателя;  $j$  – порядковый номер показателя в  $i$ -й группе;  $n_1$  – количество групп показателей;  $m_1$  – количество показателей в каждой группе;  $\varphi_2(Y_i, i = \overline{1, n_1})$  – функция комплексных показателей конструкции приборного отсека.

Значения 0,75 и 0,85, определяющие нижний предел уровня технологичности ПО, принятые на

основе статистического анализа значений показателей конструкции, прошедшей технологическую отработку и апробированной в серийном производстве. Они могут уточняться в соответствии с конкретными условиями предприятия – изготовителя ПО УТБР.

Если параметры конструкции удовлетворяют данным требованиям ТЗ, то ПО УТБР считается технологичным и рекомендуется для внедрения в производство. В противном случае, по показателям технологичности  $\bar{y}_{i,j}$  следует определить перечень и значения параметров  $X_n^{kp}$ , в соответствии с которыми составляются рекомендации и мероприятия по их изменению.

В этой математической модели все показатели  $\bar{y}_{i,j}$  разделены на три группы. Они оценивают производственную ( $Y_1$ ), монтажную ( $Y_2$ ) и эксплуатационную ( $Y_3$ ) технологичности:

$$Y_1 = \{\bar{y}_{1,j}, j = \overline{1,16}\}; Y_2 = \{\bar{y}_{2,j}, j = \overline{1,2}\};$$

$$Y_3 = \{\bar{y}_{3,j}, j = \overline{1,3}\}.$$

Считая равнозначными показатели каждой группы  $Y_i$ , общий уровень технологичности  $Y_{\text{общ}}$  конструкции можно определить выражением

$$Y_{\text{общ}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 Y_i.$$

При определении значений показателей  $Y_i$  принимаются следующие допущения.

1. В группе находятся показатели  $\bar{y}_{i,j}$ , каждый из которых оценивает определённую сторону технологичности конструкции ПО. В этом случае комплексный показатель технологичности всей группы определяется выражением

$$Y_{\text{общ}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 Y_i, \quad (1)$$

где  $m_i$  – количество показателей в  $i$ -й группе.

В выражении (1) все показатели  $\bar{y}_{i,j}$  принимаются равнозначными по степени важности и являются функциями от параметров, определённых для предприятия изготовителя ПО.

2. Для оценки степени критичности показатели  $\bar{y}_{i,j}$ , отражающие разные по физическому содержанию стороны процессов, приводятся к безразмерному виду. В математической модели они нормированы так, что наилучшее значение показателя превышает 1, а наихудшее (критичное) находится в интервале 0–0,75. Значения показате-

лей в интервале от 0,75 до 1 считаются приемлемыми (допустимыми) при условии выполнения неравенства  $Y_i \geq 0,85$ .

В группу производственной технологичности  $Y_1$  входят показатели, оценивающие приспособленность конструкции ПО к имеющимся на предприятии условиям производства и развернутой производственной базе [1 – 3]:

трудоёмкости изготовления

$$\bar{y}_{1.1} = f_1(T_{\text{сб}}, T_{\text{д}}, T_{\text{исп}}); \quad (2)$$

технологической себестоимости

$$\bar{y}_{1.2} = f_2(C_{\text{м}}, C_{\text{з}}, C_{\text{ин}}, C_{\text{o}});$$

унификации конструктивных элементов, по количеству типоразмеров и массе деталей

$$\bar{y}_{1.3} = f_3(Q_{\text{сб}}^y, Q_{\text{д}}^y, Q_{\text{сб}}, Q_{\text{д}});$$

$$\bar{y}_{1.4} = f_4(Q_{\text{сб}}^{\text{top}}, Q_{\text{д}}^{\text{top}}, Q_{\text{сб}}^{\text{T}}, Q_{\text{д}}^{\text{T}});$$

$$\bar{y}_{1.5} = f_5(Q_{\text{мсб}}^y, Q_{\text{мд}}^y, Q_{\text{мсб}}, Q_{\text{мд}});$$

стандартизации

$$\bar{y}_{1.6} = f_6(Q_{\text{ст}}^{\text{T}}, Q_{\text{сб}}^{\text{T}}, Q_{\text{д}}^{\text{T}});$$

повторяемости сборочных единиц и деталей

$$\bar{y}_{1.7} = f_7(Q_{\text{сб}}^{\text{T}}, Q_{\text{д}}^{\text{T}}, Q_{\text{сб}}, Q_{\text{д}});$$

применимости типовых технологических процессов, технологической оснастки и номенклатуре типоразмеров

$$\bar{y}_{1.8} = f_8(Q_{\text{пп}}, Q_{\text{п}});$$

$$\bar{y}_{1.9} = f_9(Q_{\text{то}}^y, Q_{\text{то}}^{\text{op}});$$

$$\bar{y}_{1.10} = f_{10}(Q_{\text{сб}}^{\text{top}}, Q_{\text{д}}^{\text{top}}, Q_{\text{сб}}^{\text{T}}, Q_{\text{д}}^{\text{T}});$$

организационно-технического уровня производства

$$\bar{y}_{1.11} = f_{11}(\Delta C_{\text{нб}}, C_{\text{оп}}, C_{\text{бо}}, C_{\text{пп}});$$

сборности

$$\bar{y}_{1.12} = f_{12}(Q_{\text{сб}}, Q_{\text{д}});$$

сложности сборки

$$\bar{y}_{1.13} = f_{13}(Q_{\text{сбр}}, Q_{\text{сб}});$$

механизации и автоматизации

$$\bar{y}_{1.14} = f_{14}(Q_{\text{мпп}}, Q_{\text{отп}});$$

равновесности

$$\bar{y}_{1.15} = f_{15}(M_{\text{ср}}, M_{\text{макс}});$$

овхата типовыми технологическими процессами

$$\bar{y}_{1.16} = f_{16}(T_{\text{тпп}}, T_{\text{и}}),$$

где  $T_{\text{сб}}$ ,  $T_{\text{д}}$ ,  $T_{\text{исп}}$  – трудоёмкость изготовления и испытаний сборочных единиц и деталей корпуса ПО;  $C_{\text{м}}$ ,  $C_{\text{з}}$ ,  $C_{\text{ин}}$ ,  $C_{\text{o}}$  – затраты на материал, заработную плату, инструмент и оборудование;  $Q_{\text{сб}}^{\text{у}}$ ,  $Q_{\text{д}}^{\text{у}}$  – количество унифицированных сборочных единиц и деталей;  $Q_{\text{сб}} = Q_{\text{сб}}^{\text{у}} + Q_{\text{сб}}^{\text{оп}}$ ,  $Q_{\text{д}} = Q_{\text{д}}^{\text{у}} + Q_{\text{д}}^{\text{оп}}$  – общее число сборочных единиц и деталей;  $Q_{\text{сб}}^{\text{оп}}$ ,  $Q_{\text{д}}^{\text{оп}}$  – количество оригинальных сборочных единиц и деталей;  $Q_{\text{сб}}^{\text{топ}}$ ,  $Q_{\text{д}}^{\text{топ}}$  – количество типоразмеров оригинальных сборочных единиц и деталей,  $Q_{\text{сб}}^{\text{ту}}$ ,  $Q_{\text{д}}^{\text{ту}}$  – количество типоразмеров унифицированных сборочных единиц и деталей;  $Q_{\text{сб}}^{\text{т}} = Q_{\text{сб}}^{\text{ту}} + Q_{\text{сб}}^{\text{топ}}$ ,  $Q_{\text{д}}^{\text{т}} = Q_{\text{д}}^{\text{ту}} + Q_{\text{д}}^{\text{топ}}$  – общее количество типоразмеров сборочных единиц и деталей;  $Q_{\text{мсб}}^{\text{у}}$ ,  $Q_{\text{мд}}^{\text{у}}$ ,  $Q_{\text{мсб}}^{\text{мд}}$ ,  $Q_{\text{мд}}^{\text{мд}}$  – масса унифицированных и общая масса сборочных единиц и деталей;  $Q_{\text{ст}}^{\text{т}}$  – количество стандартных типоразмеров деталей;  $Q_{\text{пп}}$ ,  $Q_{\text{п}}$  – количество типовых технологических процессов и общее количество технологических процессов;  $Q_{\text{то}}^{\text{у}}$ ,  $Q_{\text{то}}^{\text{оп}}$  – количество типоразмеров унифицированной и вновь разрабатываемой технологической оснастки;  $\Delta C_{\text{пб}}$  – дополнительные затраты на совершенствование существующей производственной базы;  $C_{\text{оп}}$ ,  $C_{\text{во}}$ ,  $C_{\text{пп}}$  – стоимость основного и вспомогательного производственного оборудования и производственных помещений соответственно;  $Q_{\text{сбр}}$  – количество сборочных единиц, требующих регулировки, пригонки или совместной обработки с последующей разборкой и повторной сборкой;  $Q_{\text{мпп}}$  – количество операций обработки, сборки, монтажа, контроля и регулировки, которые можно осуществить механизированным или автоматизированным способом;  $Q_{\text{отп}}$  – общее количество операций в технологическом процессе;  $M_{\text{ср}}$ ,  $M_{\text{макс}}$  – средняя и максимальная масса деталей;  $T_{\text{тпп}}$ ,  $T_{\text{и}}$  – трудоёмкость исполнения по типовым технологическим процессам и общая трудоёмкость изготовления ПО.

Например, показатель, оценивающий трудоёмкость изготовления (2), имеет следующее выражение:

$$\bar{y}_{1.1} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{mi} + \sum_{j=1}^m T_{dj} + \sum_{q=1}^p T_{испq}}{T_{\text{по}}^{\delta}},$$

где  $m$ ,  $n$  – общее количество деталей и сборочных единиц корпуса и приборной рамы;  $p$  – количество испытаний, установленных в технической докумен-

тации;  $T_{mi}$ ,  $T_{dj}$ ,  $T_{испq}$  – трудоёмкость монтажа, изготовления и испытаний структурных элементов корпуса и рамы ПО;  $T_{\text{по}}^{\delta}$  – общая трудоёмкость изготовления базового варианта ПО, установленного техническим заданием.

С помощью второй группы показателей  $Y_2$  оценивается монтажная технологичность ПО. Она определяет степень эффективности использования трудовых и материальных ресурсов при установке ПО на ракете и проведении ремонтно-восстановительных работ в случае замены вышедших из строя приборов. В эту группу входят показатели [2, 3]

трудоёмкости монтажа

$$\bar{y}_{2.1} = f_{17}(T_{\text{ми}}, T_{\text{дми}}); \quad (3)$$

удельной трудоёмкости монтажа

$$\bar{y}_{2.2} = f_{18}(T_{\text{i}}, M_{\text{i}}),$$

где  $T_{\text{i}}$ ,  $T_{\text{дми}}$  – трудоёмкость монтажа и демонтажа ПО на ракете;  $M_{\text{i}}$  – масса ПО.

Выражение показателя, оценивающего трудоёмкость монтажа (3), имеет вид

$$\bar{y}_{2.1} = \frac{T_{\text{ми}} + T_{\text{дми}}}{T_{\text{м}}^{\delta}},$$

где  $T_{\text{м}}^{\delta}$  – трудоёмкость монтажа на ракете базового варианта ПО.

Третьей группой показателей оценивается эксплуатационная технологичность ПО. С её помощью определяется приспособленность конструкции к техническому обслуживанию, контролю параметров и ремонту в условиях эксплуатации. В неё входят показатели [3–5]:

трудоёмкость в эксплуатации

$$\bar{y}_{3.1} = f_{19}(T_{\text{то}}, T_{\text{ми}}, T_{\text{дми}}, T_p, T_{\text{ут}}),$$

технологическая себестоимость в эксплуатации

$$\bar{y}_{3.2} = f_{20}(C_{\text{то}}, C_{\text{тм}}, C_{\text{тр}}, C_{\text{тут}}),$$

доступность

$$\bar{y}_{3.3} = f_{21}(T_{\text{ос}}, T_{\text{то}}, T_{\text{ми}}),$$

где  $T_{\text{то}}$ ,  $T_{\text{ми}}$ ,  $T_{\text{дми}}$ ,  $T_p$ ,  $T_{\text{ут}}$  – трудоёмкость технического обслуживания, монтажа, демонтажа, ремонта и утилизации ПО соответственно;  $C_{\text{то}}$ ,  $C_{\text{тм}}$ ,  $C_{\text{тр}}$ ,  $C_{\text{тут}}$  – себестоимость технического обслуживания, монтажа, ремонта и утилизации соответственно;  $T_{\text{ос}}$  – трудоёмкость основных работ по техническому обслуживанию.

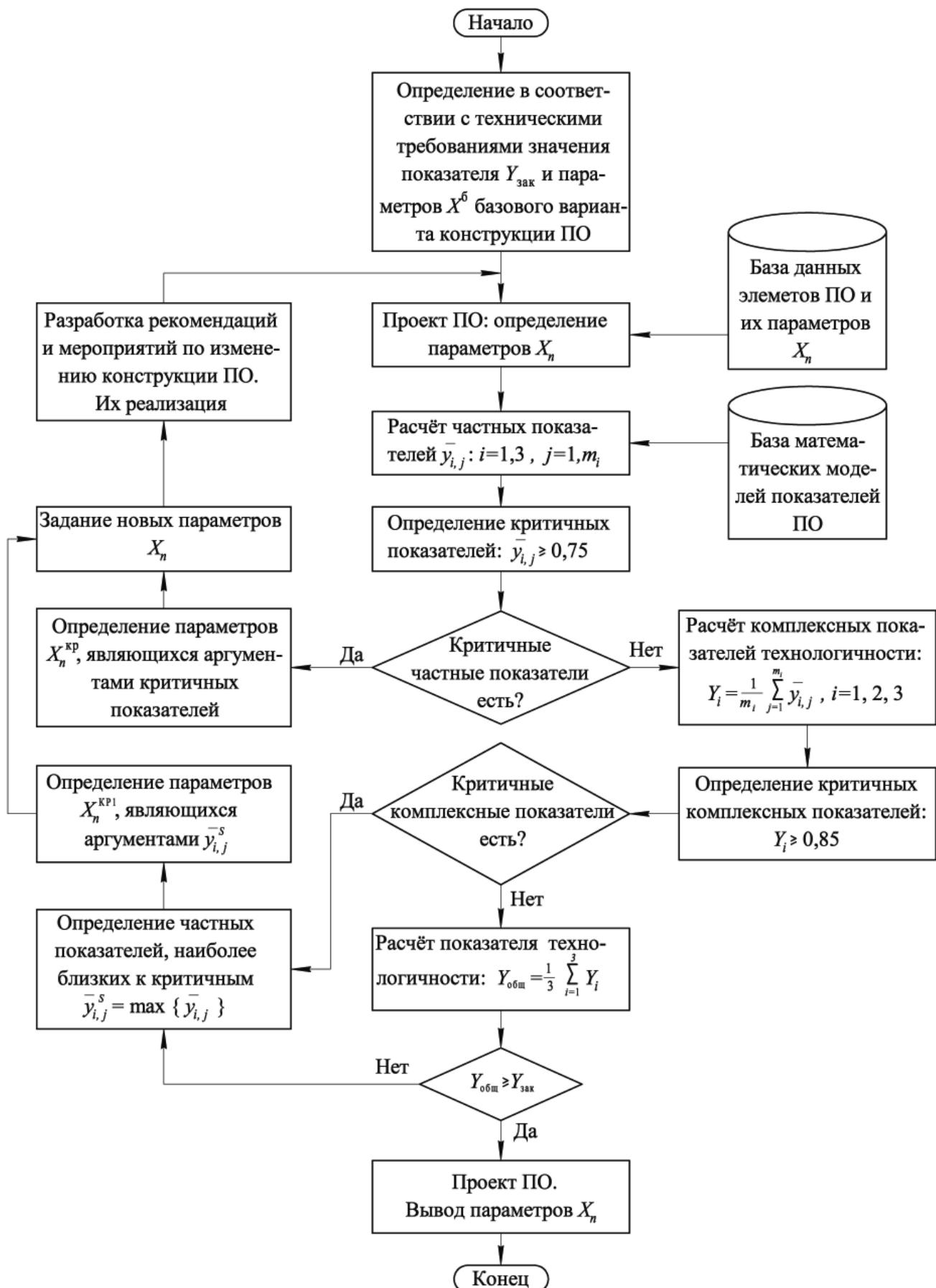


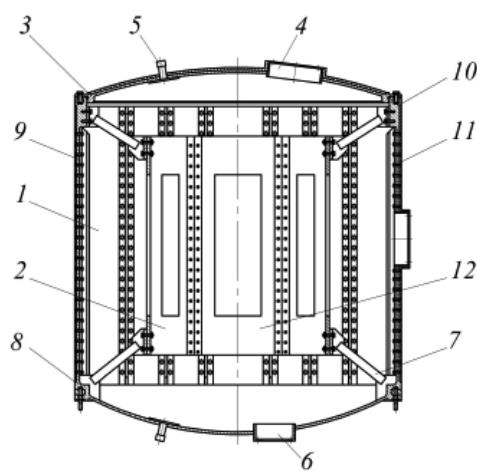
Рис. 1. Алгоритм адаптации по технологичности

Такова математическая модель оценки технологичности конструкции ПО УТБР.

Определение параметров  $X_n^{kp}$  конструкции, при которых показатели достигают критического значения, поиск вариантов их изменения и адаптации ПО УТБР до заданного уровня технологичности предлагается осуществлять по алгоритму (рис. 1), согласно которому разработчик проводит анализ ТЗ на разработку ПО УТБР с определением всех конструктивных требований и требований по технологичности, устанавливает значения  $Y_{зак}$  и базовых параметров  $X_n^b$ .

Затем на основе имеющейся на предприятии базы данных элементов и их параметров технологичности  $X_n$  разрабатывается проект ПО УТБР, обеспечивающий выполнение функциональных характеристик, рассчитываются частные и комплексные показатели технологичности с проверкой условий критичности принятых конструктивных решений. При выявлении критической ситуации определяются показатели и их параметры, не обеспечивающие заданный уровень технологичности. В этом случае назначают новые параметры  $X_n$  и разрабатывают рекомендации по изменению конструкции ПО УТБР. На их основе из базы данных предприятия выбирают элементы, заменяющие выявленные критичные, и проводится повторная проверка на технологичность. Таким образом обеспечивается адаптация ПО УТБР до заданного уровня технологичности.

Рассмотрим процесс адаптации по технологичности ПО с помощью представленной математической модели и алгоритма.



**Рис. 2. Проект корпуса приборного отсека:**

1 – силовой корпус; 2 – приборная рама; 3 – дно; 4 – иллюминатор; 5 – штуцер; 6 – короб разъёмов; 7 – кронштейн рамы; 8 – передний шпангоут; 9 – стрингерная оболочка; 10 – задний шпангоут; 11 – теплозащитное покрытие; 12 – панель

Определим технологичность проекта корпуса ПО УТБР (рис. 2), предложенного разработчиком, и на основе результатов моделирования сформулируем рекомендации для его адаптации под заданный уровень технологичности.

Корпус ПО конструктивно состоит из силового корпуса и приборной рамы. Оболочка силового корпуса выполнена стрингерной. Крепление приборной рамы обеспечивается кронштейнами. Передний и задний шпангоуты обеспечивают крепление приборной рамы истыковку ПО со смежными узлами ракеты.

Исходные параметры  $X_n$  для расчёта показателей представлены в табл. 1. Их значения получены на основе данных, имеющихся на предприятии, а также анализа существующей на предприятии-изготовителе ПО производственной базы, ранее адаптированной для изготовления изделий данного типа.

Базовые значения параметров технологичности, полученные исходя из статистических данных по изготовлению корпусов ПО аналогичного типа, представлены в табл. 2.

В результате моделирования получены значения частных и комплексных показателей технологичности ПО (табл. 3).

Проанализируем результаты, полученные моделированием. Для исходного варианта конструкции ПО УТБР о критичности свидетельствуют следующие частные показатели: унификация конструктивных элементов  $\bar{y}_{1,3} = 0,72$ , стандартизация  $\bar{y}_{1,6} = 0,74$ , применяемость технологической оснастки  $\bar{y}_{1,9} = 0,73$ , механизация и автоматизация  $\bar{y}_{1,14} = 0,74$ . Их значения ниже 0,75. Несмотря на это, комплексный показатель производственной технологичности  $Y_1 = 0,85$  соответствует предельно допустимому значению, т. е. выполняется неравенство  $Y_{общ} \geq Y_{зак}$ . В целом, казалось бы, конструкция удовлетворяет требованиям заказчика.

Однако для предприятия-изготовителя уровень технологичности не является приемлемым. Его необходимо повысить, на что указывают частные показатели  $\bar{y}_{1,3}$ ,  $\bar{y}_{1,6}$ ,  $\bar{y}_{1,9}$ ,  $\bar{y}_{1,14}$ , которые критичны.

Рассмотрим возможные пути повышения технологичности корпуса ПО УТБР.

Критичные показатели являются функциями параметров  $X_n$ :  $Q_{сб}^y$ ,  $Q_{д}^y$ ,  $Q_{сб}$ ,  $Q_{д}$ ,  $Q_{сб}^{top}$ ,  $Q_{д}^{top}$ ,  $Q_{сб}^t$ ,  $Q_{д}^t$ ,  $Q_{д}^{top}$ ,  $Q_{сб}^{top}$ ,  $Q_{д}^{top}$ ,  $Q_{ст}^t$ ,  $Q_{то}^t$ ,  $Q_{то}^{top}$ ,  $Q_{мпп}$ ,  $Q_{опп}$ . Анализ показывает, что для повышения значения показателя  $\bar{y}_{1,3}$  необходимо изменение конструкции ПО, связанное с увеличением количества унифицированных деталей и сборочных единиц. Это привлечёт за собой увеличение количества типоразмеров унифицированной технологической оснастки и повышение значения показателя  $\bar{y}_{1,9}$ .

Для повышения значения  $\bar{y}_{1,6}$  требуется снижение количества типоразмеров оригинальных и

Таблица 1

## Параметры для расчёта показателей технологичности

Обозначение	Значение для вариантов		Обозначение	Значение для вариантов	
	исходного	предлагаемого		исходного	предлагаемого
$Q_{\text{сб}}^y$ , шт.	9	12	$C_M$ , усл. тыс. руб.	50	65
$Q_{\text{сб}}^{\text{оп}}$ , шт.	11	7	$C_3$ , усл. тыс. руб.	199	183
$Q_{\text{сб}}$ , шт.	20	19	$C_{\text{ин}}$ , усл. тыс. руб.	96	89
$Q_{\text{сб}}^{\text{ты}}$ , шт.	3	5	$C_o$ , усл. тыс. руб.	32	45
$Q_{\text{сб}}^{\text{топ}}$ , шт.	6	9	$\Delta C_{\text{пп}}$ , усл. млн руб.	17	11
$Q_{\text{сб}}^T$ , шт.	9	14	$C_{\text{оп}}$ , усл. млн руб.	83	73
$Q_{\text{д}}^y$ , шт.	62	71	$C_{\text{во}}$ , усл. млн руб.	12	9
$Q_{\text{д}}^{\text{оп}}$ , шт.	49	47	$C_{\text{пп}}$ , усл. млн руб.	200	200
$Q_{\text{д}}$ , шт.	111	118	$C_{\text{то}}$ , усл. тыс. руб.	2,3	3,1
$Q_{\text{д}}^{\text{ты}}$ , шт.	9	10	$C_{\text{тм}}$ , усл. тыс. руб.	0,4	0,4
$Q_{\text{д}}^{\text{топ}}$ , шт.	17	15	$C_{\text{тр}}$ , усл. тыс. руб.	0,1	0,3
$Q_{\text{д}}^T$ , шт.	26	25	$C_{\text{тут}}$ , усл. тыс. руб.	0,5	0,5
$Q_{\text{ст}}^T$ , шт.	43	57	$T_{\text{пп}}$ , нормо-час	580	510
$Q_{\text{мсб}}^y$ , кг	14	16	$T_i$ , н. час	3190	3150
$Q_{\text{мд}}^y$ , кг	1,5	1,7	$T_{\text{то}}$ , нормо-час	36	41
$Q_{\text{мсб}}$ , кг	37	42	$T_{\text{ми}}$ , нормо-час	4	4
$Q_{\text{мд}}$ , кг	4	3,5	$T_{\text{дми}}$ , нормо-час	3	3
$Q_{\text{пп}}$ , шт.	45	52	$T_p$ , нормо-час	2	3
$Q_{\text{п}}$ , шт.	197	187	$T_{\text{ут}}$ , нормо-час	8	8
$Q_{\text{то}}^{\text{ты}}$ , шт.	27	35	$T_{\text{ос}}$ , нормо-час	33	35
$Q_{\text{то}}^{\text{топ}}$ , шт.	19	12	$T_{\text{сб}}$ , нормо-час	1250	1370
$Q_{\text{сбр}}$ , шт.	4	2	$T_d$ , нормо-час	1580	1500
$Q_{\text{мпп}}$ , шт.	380	340	$T_{\text{исп}}$ , нормо-час	360	280
$Q_{\text{отп}}$ , шт.	570	490	$M_{\text{ср}}$ , кг	1,5	1,6
			$T_{\text{max}}$ , кг	7	5

унифицированных элементов с максимально возможной их заменой на стандартные.

Повысить значение показателя  $\bar{y}_{1,14}$  можно изменением непосредственно конструкции элементов ПО, максимально используя автоматизированные средства производства при изготовлении.

Для реализации предложенных мероприятий, что по существу является адаптацией корпуса ПО УТБР до заданного уровня технологичности, разработчику необходимо рассмотреть предложенные варианты элементов и их параметры  $X_n$ , имеющиеся в базе данных предприятия-изготовителя. При этом анализ и выбор вариантов целесообразнее проводить в виде заседаний экспертного совета [6].

Допустим, что эксперты советом было принято решение внести в конструкцию ПО следующие изменения (рис. 3): вместо стрингерной оболочки применить вафельную, заменить элементы крепления приборной рамы элементами изделия – аналога, адаптировать конструкцию панелей приборной рамы для применённых элементов крепления.

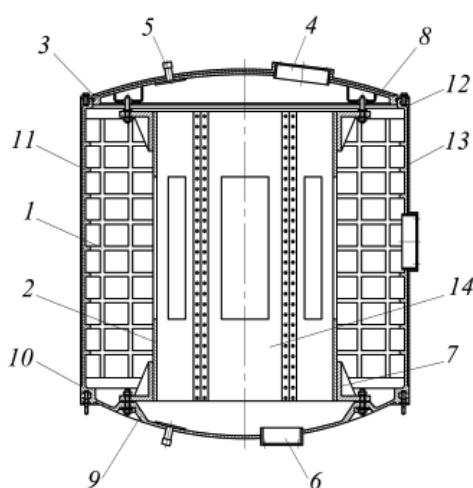


Рис. 3. Корпус заданного уровня технологичности:

1 – силовой корпус; 2 – приборная рама; 3 – дно; 4 – иллюминатор; 5 – штуцер; 6 – короб разъёмов; 7 – кронштейн рамы; 8 – кронштейн дна; 9 – бобышка; 10 – передний шпангоут; 11 – вафельная оболочка; 12 – задний шпангоут; 13 – теплоизоляционное покрытие; 14 – панель

Таблица 2

**Базовые значения параметров технологичности**

Наименование	Обозначение	Значение
Трудоёмкость изготовления, нормо-час	$T_i^6$	4000
Технологическая себестоимость, усл. тыс. руб.	$C_i^6$	450
коэффициент унификации конструктивных элементов	$k_{\text{уэ}}^6$	0,75
унификации по количеству типоразмеров	$k_{\text{ут}}^6$	0,75
унификации по массе	$k_{\text{ум}}^6$	0,75
стандартизации	$k_{\text{ст}}^6$	0,75
повторяемости сборочных единиц	$k_{\text{пов}}^6$	0,80
применимости типовых технологических процессов	$k_{\text{пр}}^6$	0,80
применимости технологической оснастки	$k_{\text{то}}^6$	0,80
применимости по номенклатуре типоразмеров	$k_{\text{НТП}}^6$	0,80
организационно-технического уровня производства	$k_{\text{отп}}^6$	0,98
сборности	$k_{\text{сб}}^6$	0,95
сложности сборки	$k_{\text{сл}}^6$	0,95
механизации и автоматизации	$k_{\text{мех}}^6$	0,90
равновесности	$k_p^6$	0,80
ахвата типовыми технологическими процессами	$k_{\text{тп}}^6$	0,90
доступности	$k_d^6$	0,95
Трудоёмкость монтажа, нормо-час	$T_m^6$	8
Удельная трудоёмкость монтажа, нормо-час/кг	$T_{\text{ум}}^6$	0,95
Трудоёмкость в эксплуатации, нормо-час	$T_e^6$	60
Технологическая себестоимость в эксплуатации, усл. тыс. руб.	$C_e^6$	4
Уровень технологичности ПО, установленный заказчиком	$T_{\text{зак}}$	0,85

Параметры изменённой конструкции ПО УТБР и значения показателей технологичности приведены в последних столбцах табл. 1 и 3.

В результате моделирования полученные значения частных и комплексных показателей оказались не ниже заданных ТЗ, т. е. критичных показателей

Таблица 3

**Значения показателей технологичности корпуса приборного отсека**

Обозначение	Значение для вариантов	
	исходного	предлагаемого
$\bar{y}_{1,1}$	0,80	0,79
$\bar{y}_{1,2}$	0,84	0,85
$\bar{y}_{1,3}$	0,72	0,81
$\bar{y}_{1,4}$	0,88	0,82
$\bar{y}_{1,5}$	0,83	0,81
$\bar{y}_{1,6}$	0,74	0,79
$\bar{y}_{1,7}$	0,92	0,89
$\bar{y}_{1,8}$	0,96	0,90
$\bar{y}_{1,9}$	0,73	0,93
$\bar{y}_{1,10}$	0,82	0,77
$\bar{y}_{1,11}$	0,96	0,98
$\bar{y}_{1,12}$	0,89	0,91
$\bar{y}_{1,13}$	0,84	0,94
$\bar{y}_{1,14}$	0,74	0,77
$\bar{y}_{1,15}$	0,98	0,85
$\bar{y}_{1,16}$	0,91	0,93
$Y_1$	0,85	0,86
$\bar{y}_{2,1}$	0,88	0,88
$\bar{y}_{2,2}$	0,87	0,89
$Y_2$	0,87	0,88
$\bar{y}_{3,1}$	0,88	0,98
$\bar{y}_{3,2}$	0,83	1,08
$\bar{y}_{3,3}$	0,87	0,82
$Y_3$	0,86	0,91
$Y_{\text{общ}}$	0,86	0,88

не выявлено. Это позволяет утверждать, что конструкция ПО УТБР успешно прошла адаптацию по технологичности – полностью удовлетворяет требованиям заказчика и данного производства.

На основании изложенного, можно сделать следующие выводы. Построена математическая

модель оценки критичности элементов ракеты, которая количественно оценивает его конструкцию по технологичности на стадии проектирования. На примере ПО УТБР доказано, что использование данной математической модели позволяет оперативно проводить оценку степени технологичности проектируемой конструкции, определять элементы и параметры критичности. Полученная структурированная информация об объекте и возможностях производства позволяет осуществлять управление его технологичностью.

#### **Библиографические ссылки**

1. Кононенко В.Г., Кушнаренко С.Г., Прялин М.А. Оценка технологичности и унификации машин. М.: Машиностроение, 1986. 160 с.

2. Михельсон-Ткач В.Л. Повышение технологичности конструкций. М.: Машиностроение, 1988. 104 с.

3. Технологичность конструкции изделия: справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.; под общ. ред. Ю.Д. Амирова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 768 с.

4. Нижниковский Г.С., Резниченко П.Т. Технология монтажа металлических конструкций. Киев: Высшая школа, 1981. 232 с.

5. Уразбахтина А.Ю., Уразбахтин Ф.А. Критические ситуации при резке заготовок для штамповки деталей воспламенительного устройства ракетного двигателя // Вестник ИжГТУ. 2010. № 4. С. 36–39.

6. Проектирование технических систем на основе анализа упорядоченных во времени критических состояний. В.Н. Репко, Ф.А. Уразбахтин, Б.А. Якимович, Н.Ю. Орлова. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1999. 268 с.

УДК 628.931

**Е.В. Вставская**, канд. техн. наук, доц.  
(Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)  
elena\_vstavskaya@mail.ru

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО ПРОВОДАМ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ В СИСТЕМАХ ОСВЕЩЕНИЯ**

*Рассмотрены вопросы организации управления осветительными системами с использованием передачи информации методом широтной модуляции начального угла сетевого напряжения.*

**Ключевые слова:** система управления, источник света, широтная модуляция, передача информации.

*Questions of the lighting systems control arrangement through the use of information transfer by a width modulations method of mains voltage initial corner are considered.*

**Key words:** control system, light source, width modulations, information transfer.

**Введение.** Система управления наружным освещением обычно управляет с диспетчерского пункта [1]. В зависимости от алгоритма управления контроллер формирует сигнал, например, включения группы уличных фонарей. Для передачи этого сигнала на исполнительные устройства (обычно электронные балласты ламп уличных фонарей) используются следующие средства: слаботочные сигнальные линии, радиоканал, передача высокочастотного информационного сигнала по силовому кабелю (PLC-модемы).

В такой системе любой светильник можно включить или выключить сигналом с диспетчерского пункта. Это достигается с помощью блоков непосредственного управления светильниками.

При передаче информации с использованием слаботочных сигнальных линий необходим монтаж сигнальных линий, соединяющих блоки управления светильниками с автоматизирован-

ными пунктами питания, что является недостатком.

Передача информации по радиоканалу позволяет избежать указанного недостатка, однако обладает довольно высокой стоимостью аппаратной части.

Частотный способ передачи информационных сообщений с использованием PLC-модемов предопределяет затухание сигнала в линиях питающей сети, нагрузками которой являются электронные импульсные преобразователи, входными каскадами которых, как правило, являются радиочастотные заградительные фильтры. Высококачественные емкостные входные сопротивления таких фильтров, распределённые на протяжении питающей линии, формируют многозвездный сглаживающий фильтр, резко ослабляющий прохождение высокочастотных сигналов.

Для управления светильниками возможно также использование способа передачи информации по питающей сети с применением широтной модуляции [2].

**Описание метода передачи информационных сообщений по питающей сети с использованием широтной модуляции [3].** В основе метода передачи информации по питающей сети лежит следующий принцип: для передачи информации используется изменение угла широтной модуляции в начале полупериода сетевого напряжения, при чём выбранный диапазон изменения угла модуляции не влияет на работу импульсных преобразователей питающего напряжения [4]. При этом в силовую электропроводку не вносятся никакие дополнительные источники сигнала, что не нарушает правила эксплуатации силовой электропроводки зданий и не является источником электромагнитных помех.

Большинство современных потребителей электрической энергии рассчитано на потребление постоянного электрического тока или тока в виде

постоянной и высокочастотной переменной составляющих [5]. При этом в составе всех преобразователей присутствует звено двухполупериодного выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром. Особенность такой питающей сети заключается в том, что потребление тока импульсными преобразователями напряжения с выходом постоянного тока происходит в диапазоне угла полупериода напряжения от  $60^\circ$  до  $120^\circ$  (рис. 1).

Поэтому при изменении формы питающего напряжения модуляцией начального угла в пределах  $60^\circ$  влияние модуляции на ток, потребляемый преобразователем от сети, отсутствует.

Данный метод имеет ряд преимуществ:

при передаче информации в качестве несущего сигнала используется силовое питающее напряжение, что не требует монтажа дополнительной проводки;

поскольку носителем информационного сигнала является питающее напряжение, то возможно распространение сигнала на значительные расстояния;

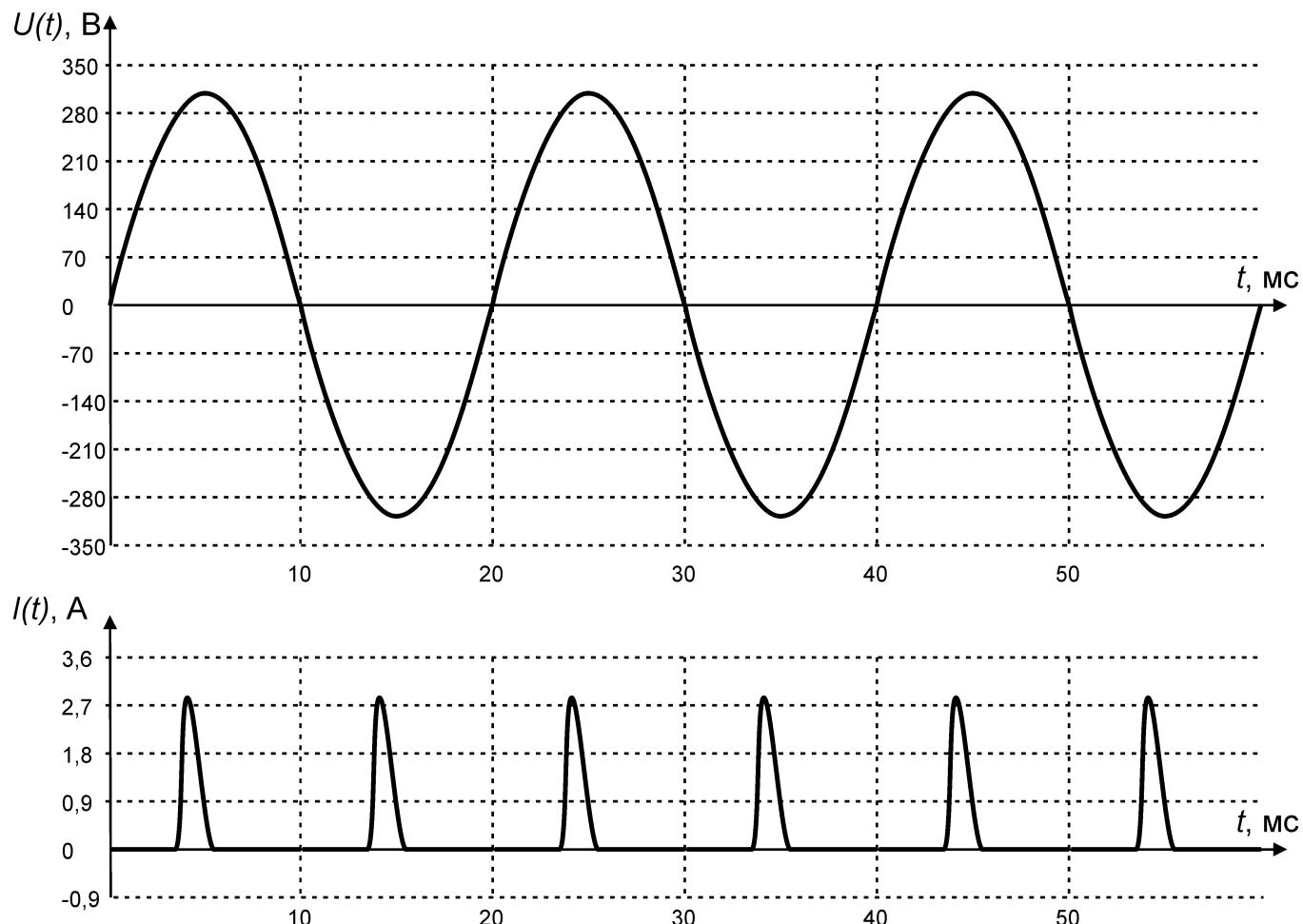
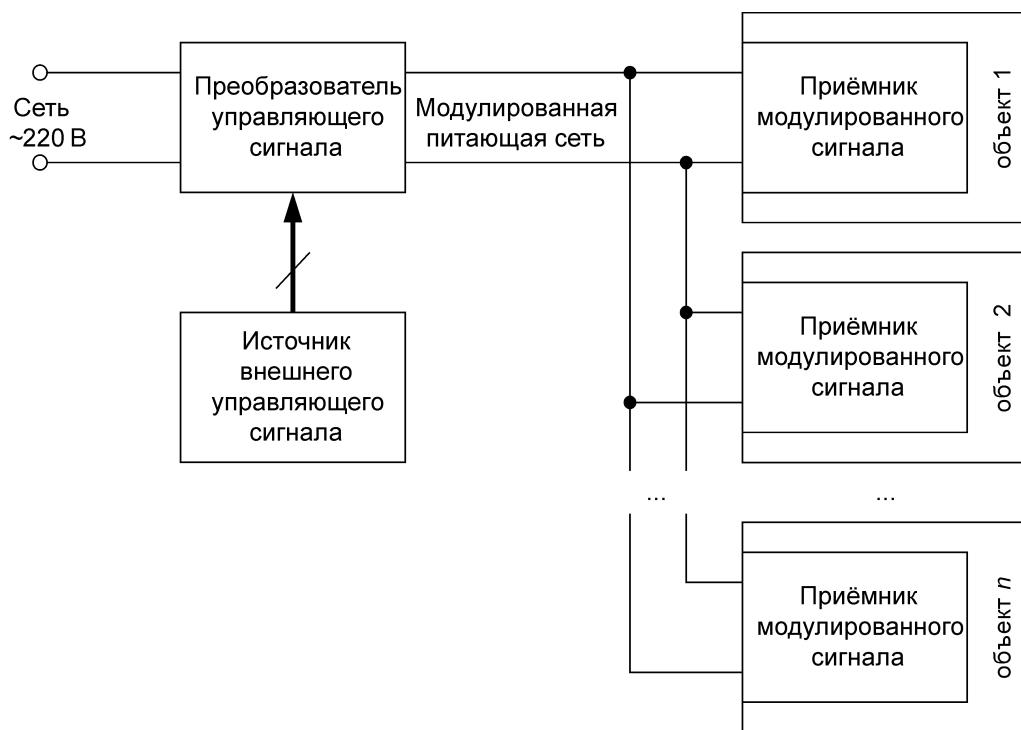


Рис. 1. Потребление тока импульсными преобразователями



**Рис. 2. Структура системы передачи информации по проводам питающей сети**

мощность, затрачиваемая на реализацию управляющего сигнала, минимальна, так как для осуществления модуляции используется ключевой режим работы коммутационных элементов;

возможна реализация как централизованного, так и индивидуального управления всеми объектами в составе системы освещения;

возможно гибкое управление световым потоком источников света.

**Структура системы передачи информации по проводам питающей сети.** Система передачи информации по питающей сети содержит источник внешнего управляющего сигнала, преобразователь управляющего сигнала (передающее устройство) и приёмники модулированного сигнала (приёмные устройства), входящие в состав каждого из управляемых объектов (рис. 2).

Максимальное количество обслуживаемых приёмных устройств определяется разрядностью адреса приёмного устройства и допустимой мощностью, на которую рассчитано передающее устройство.

**Способы передачи информации по питающей сети.** Информацию по питающей сети можно передавать аналоговым и цифровым способами.

*Аналоговый способ* предусматривает одновременное и одинаковое управление всеми объектами системы. В качестве источника внешнего управляющего сигнала может использоваться аналоговый сигнал напряжения, формируемый

внешним источником или потенциометром. При этом преобразователь управляющего сигнала формирует широтно-модулированный сетевой сигнал, питающий объекты системы на основе задающего внешнего сигнала. Изменение управляющего сигнала пропорционально изменению угла модуляции от 0 до 50°.

При *цифровом способе* в качестве источника внешнего управляющего сигнала может быть выбран центральный блок (контроллер, компьютер), который формирует задающие сигналы и передаёт их преобразователю управляющего напряжения по последовательному интерфейсу. Преобразователь управляющего напряжения транслирует полученный набор сигналов в питающую сеть как последовательность наличия или отсутствия широтной модуляции на начальных углах полупериодов. При этом возможно использование широтной модуляции в пределах 5–10° начального угла полупериода. В режиме отсутствия информационного сигнала широтная модуляция не генерируется. Такой способ более предпочтителен, так как вносит существенно меньшие помехи в питающую сеть. Кроме того, передачей информации по питающей сети в цифровой форме можно осуществить индивидуальное управление объектами системы, если информационное сообщение будет содержать адрес устройства.

При цифровом способе в качестве источника управляющего сигнала может использоваться и

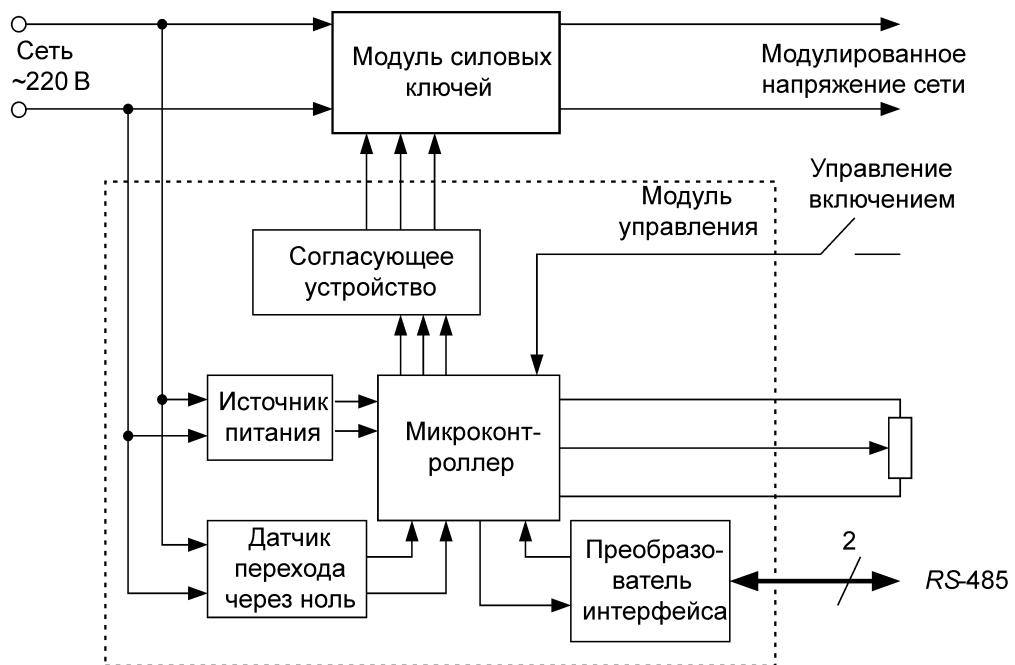


Рис. 3. Структурная схема передающего устройства

аналоговый сигнал напряжения. В этом случае информация, передаваемая по питающей сети, генерируется при изменении аналогового сигнала на некоторую величину. В остальное время широтная модуляция напряжения сети отсутствует. При формировании задающего сигнала аналоговым напряжением управление осуществляется в широковещательном режиме, т. е. информационное сообщение адресовано всем приёмным устройствам, подключённым к информационной питающей сети.

Анализ особенностей работы аналогового и цифрового способов передачи информации по питающей сети показывает, что цифровой способ является более предпочтительным.

**Структура и принцип работы преобразователя управляющего сигнала.** Передающее устройство (преобразователь управляющего сигнала (см. рис. 2)) целесообразно выполнить из двух модулей: управления и силовых ключей. Реализация последнего определяется мощностью обслуживания осветительной сети. Структурная схема передающего устройства представлена на рис. 3.

Устройство преобразователя информации может принимать управляющую информацию в аналоговой или цифровой форме в зависимости от выбранного режима работы и обслуживать несколько приёмных устройств, которые устанавливаются по одному на каждый управляемый объект, принимают информационные сообщения и ставят им в соответствие некоторые значения сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ),

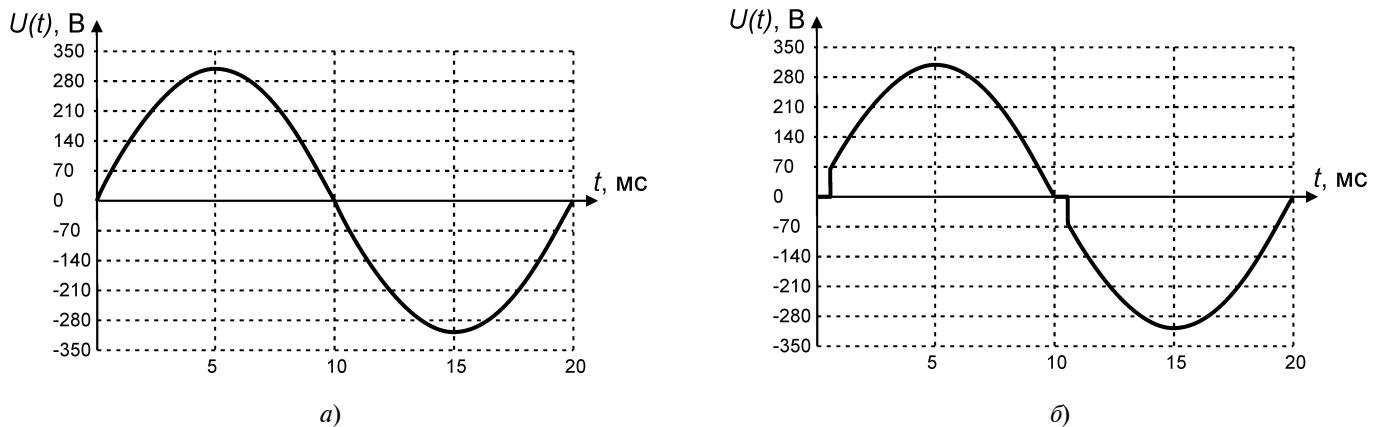
управляющего режимом работы источника питания. Световой поток регулируется дискретно от 0 до 100 % с шагом 10 %.

Для формирования управляющей информации в цифровой форме используется цифровой интерфейс между модулем управления и контроллером. Для реализации индивидуального управления приёмными устройствами необходимо введение системы адресации. Информационное сообщение должно содержать адрес приёмного устройства, которому адресовано управление, и величину светового потока для указанного устройства. Кроме того, полезно предусмотреть групповую и широковещательную адресацию.

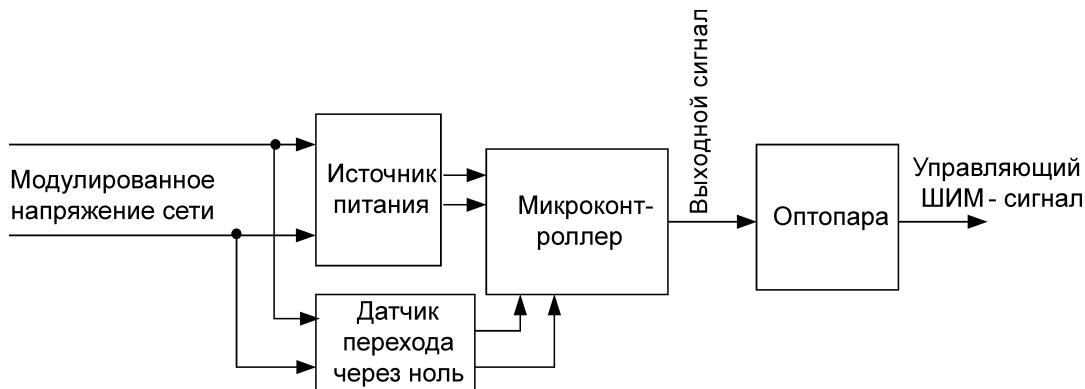
При формировании информационного сообщения во избежание внесения в линию связи постоянной составляющей напряжения целесообразно осуществлять передачу каждой единицы информации периодом сетевого напряжения. Так передача логического нуля соответствует широтной модуляции  $0^\circ$  (рис. 4, а), логической единицы –  $10^\circ$  (рис. 4, б).

Начало информационного сообщения идентифицируется по углу модуляции  $20^\circ$ , что повышает надёжность приёма посылки.

Существенным преимуществом передачи информации таким способом является высокая помехозащищённость, связанная с возможностью исправления однократной ошибки приёма единицы информации в информационном сообщении и восстановления его значения по состоянию контроля чётности. Если при приёме единицы



**Рис. 4. Кодирование битов информации для передачи по питающей сети:**  
а – логического нуля; б – логической единицы



**Рис. 5. Структурная схема приёмного устройства**

информации обнаруживается различная модуляция на положительном и отрицательном полупериоде напряжения, то единица информации считается принятой неверно. Однако наличие бита контроля чётности позволяет определить требуемое состояние неверно принятой информации и исправить ошибку.

**Структура и принцип работы приёмного устройства**, представляющего собой электронный модуль, предназначенный для приёма управляющей информации по питающей сети и формирования задающего сигнала ШИМ для управления осветительными объектами.

Модулированное сетевое напряжение поступает на электронный блок дешифратора принятого сигнала, встраиваемый в каждый светильник, который является простым и недорогим устройством на одном микроконтроллере и состоит из схемы датчика перехода через ноль, микроконтроллера и оптопары. Датчик перехода через ноль выдает микроконтроллеру сигналы равенства нулю сетевого напряжения (период отсечки

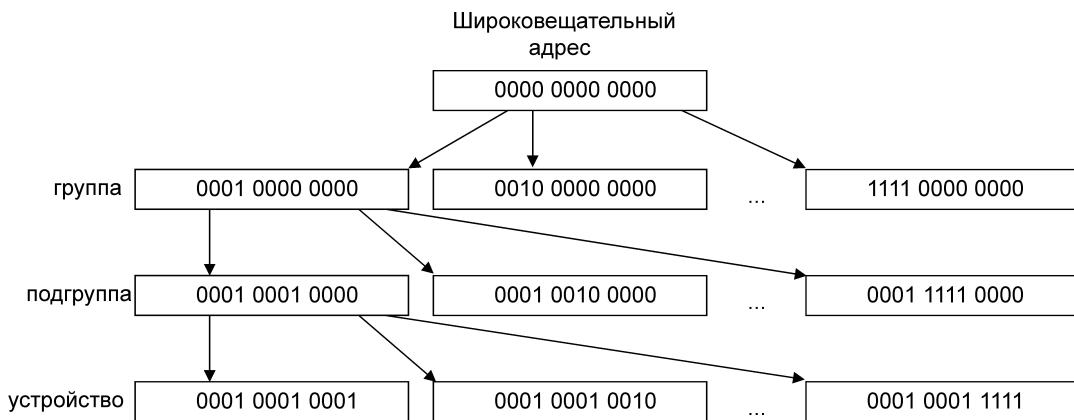
фазы). Микроконтроллер измеряет длительность равенства нулю сетевого напряжения и по заданному алгоритму вырабатывает сигнал для управляемого импульсного источника питания светодиодного светильника. Оптопара обеспечивает гальваническую развязку электронного блока дешифратора и входа управления импульсного источника питания.

Структурная схема приёмного устройства представлена на рис. 5.

**Адресация приёмных устройств.** Индивидуальное управление источниками света осуществляется введением системы адресации.

Для формирования 12-разрядного адреса приёмное устройство содержит переключатель на 12 положений. Для реализации групповой и широковещательной адресации 12-битный адрес разделяется на 3 группы по 4 бита. Таким образом, схема адресации будет иерархической (рис. 6).

Групповой адрес формируется последними четырьмя нулями в каждой тетради битов. Так, команда, содержащая адрес 0000 0000 0000, адресуя-



**Рис. 5. Структурная схема приёмного устройства**

ется всем приёмным устройствам. Команда, содержащая адрес 0001 0000 0000, адресуется всем устройствам группы 0001. Команда, содержащая адрес 0001 0010 0000, адресуется всем устройствам группы 0001 подгруппы 0010. Команда, содержащая адрес 0001 0010 0011, адресуется индивидуально устройству 0011 подгруппы 0010 группы 0001.

Таким образом, каждая подгруппа может адресовать 15 устройств, каждая группа –  $15 \cdot 15 = 225$  устройств, вся система –  $225 \cdot 15 = 3375$  устройств. Предложенная система адресации позволяет осуществлять индивидуальное, групповое и широковещательное управление приёмными устройствами.

**Выводы.** Построение систем передачи информации по проводам питающей сети с использованием широтной модуляции начального угла сетевого напряжения является эффективным и недорогим способом управления режимами работы объектов осветительных систем. Метод передачи информации основывается на организации взаимодействия передающего устройства и приёмных устройств, связанных с индивидуальными объектами системы. Передачу информации целесообразно осуществлять цифровым способом, используя кодирование единицы информации как наличие или отсутствие широтной модуляции  $10^\circ$  начального угла полупериода напряжения. Для организации гибкого управления объектами систем-

мы целесообразно использовать иерархическую адресацию.

#### **Библиографические ссылки**

1. Автоматизированные системы управления энергоэффективным освещением // Казаринов Л.С. [и др.] Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. 208 с.
2. Вставская Е.В., Костарев Е.В. Способ передачи информации по питающей сети и его применение в построении систем автоматизированного управления наружным освещением // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2010. Вып. 13. № 2 (219). С. 81–85.
3. Барбасова Т.А., Вставская Е.В., Константинов В.И., Константина О.В., Костарев Е.В. Патент России № 99913. Устройство для приёма-передачи информации по питающей сети и управления режимами работы потребителей электрической энергии. 2010. Бюл. № 33.
4. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей / В.И. Константинов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2010. Вып. 11. № 2 (178). С. 46–51.
5. Проектирование светодиодных источников света по максимуму функционального резерва при ограничении на весогабаритные характеристики / Л.С. Казаринов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2011. Вып. 13. № 2 (219). С. 74–81.

#### **Вниманию авторов!**

Требования к оформлению статей, присыпаемых для публикации, можно найти на сайте [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)