Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

8

2016

Главный редактор
Микрин Е.А. — д.т.н., проф., академик РАН, ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор — **Лутовинина О.Н.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

УЧРЕДИТЕЛИ:

ОБЩЕСТВО
С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
"НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г.
за № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

ООО "Издательство
"Инновационное машиностроение"

Адрес издательства:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (495) 661-03-36

© Издательство "Инновационное машиностроение",
"Автоматизация. Современные технологии", 2016

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Ничков А.В., Тимофеев Н.А., Ничков А.Г. Анализ изменения тороидального профиля червячной фрезы при переточках . . . 3

Юсифов С.И., Ибрагимова Э.Н. Автоматизация системы нанесения силикатно-эмалевого покрытия на внутреннюю поверхность трубы . . . 7

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Толстых С.Г., Островский Г.М. Анализ гибкости, оптимизация и синтез химико-технологических систем при интервальной неопределённости . . . 10

Моногаров О.И., Панова А.В. Модификация метода селекции сигналов частичных разрядов на основе их представления полем мгновенных скоростей . . . 17

Микаева С.А., Микаева А.С., Ашрятов А.А., Потапкин Н.Н. Энергосбережение в учебных аудиториях . . . 20

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Шахтарин Б.И., Балахонов К.А., Федотов А.А., Калашников К.С. Алгоритмы синхронизации OFDM-сигналов в системах акустической подводной связи . . . 25

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Тимофеев А.А., Самохвалов А.А., Толкачёв П.А. Моделирование цифрового синтезатора частот с фильтром второго порядка . . . 31

Парфёнов Н.М., Тимошенков С.П., Тимошенков А.С. Исследование влияния режимов травления на морфологию поверхности кремния . . . 36

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Кондрашов Ю.Н. Использование информационно-аналитических технологий для анализа деятельности предприятий . . . 40

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Nichkov A.V., Timofeev N.A., Nichkov A.G. Analysis of changes of toroidal profile hob with regrinds . . . 3

Yusifov S.I., Ibragimova E.N. Automation system of coating silicate-enamel coating on an inner surface of a pipe . . . 7

MODERN TECHNOLOGY

Dvoretskiy D.S., Dvoretskiy S.I., Tolstykh S.G., Ostrovskiy G.M. Analysis of flexibility, optimization and synthesis of chemical-technological systems under interval uncertainty . . . 10

Monogarov O.I., Panova A.V. Modification of the method of selection of partial discharge signals based on their representation by field of instantaneous velocities . . . 17

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Ashryatov A.A., Potapkin N.N. Energy conservation in educational audiences . . . 20

MODERN INFORMATION TECHNOLOGY

Shakhtarin B.I., Balakhonov K.A., Fedotov A.A., Kalashnikov K.S. Algorithms for synchronizing OFDM-signals into acoustic underwater communications systems . . . 25

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Timofeev A.A., Samokhvalov A.A., Tolkachev P.A. Simulation of digital frequency synthesizer with a filter of the second order . . . 31

Parfenov N.M., Timoshenkov S.P., Tymoshenkov A.S. Investigation of the effect of etching conditions on the morphology of the surface of silicon . . . 36

ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Kondrashov Yu.N. Use of information and analytical techniques for the analysis of enterprises . . . 40

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 e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 01.06.2016.
Подписано в печать 25.07.2016.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО "Канцлер"
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала "Автоматизация. Современные технологии" возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал "Автоматизация. Современные технологии" обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2016

УДК 621.9.02

А.В. Ничков, канд. техн. наук, доц., **Н.А. Тимофеев, А.Г. Ничков,** д-р техн. наук, проф.
(Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

TimofeevNA87@gmail.com

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТОРОИДАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЧЕРВЯЧНОЙ ФРЕЗЫ ПРИ ПЕРЕТОЧКАХ

Рассмотрены характер изменения тороидального профиля червячной затылованной фрезы по мере её износа и переточки, что необходимо для определения предельно допустимого стачиваемого слоя до перевода фрезы из чистовой в черновую, а также корректировка параметров профиля шлифовального круга для увеличения количества переточек фрезы.

Ключевые слова: червячная фреза тороидального профиля; затылование фрезы; переточка фрезы; корректировка профиля.

Character of change of a toroidal profile of the relief hob in process its wear and regrinding is considered. It is necessary to determine the maximum allowable grind down layer before transfer from the finishing in the rough mill, and also to adjust parameters of the profile of the grinding wheel to increase the number of regrinding.

Keywords: hob of toroidal profile; backing-off mill; regrinding mills; profile correction.

Для определения характера изменения тороидального профиля червячной фрезы при её переточках вследствие износа используем методику, приведённую в работе [1].

Схема к определению профиля червячной фрезы и его изменения при переточках приведены на рис. 1, где показано взаиморасположение червячной фрезы и шлифовального круга при затыловании.

Параметры фрезы: модуль $m = 6{,}3$ мм; число заходов $z_{10} = 1$; $k_1 = \dfrac{k}{\xi}$ — параметр затылования, где $k = 5$ мм — величина затылования зубьев; $\xi = 45°$ — окружной шаг зубьев фрезы; $\alpha = 0{,}099$ рад — угол наклона винтовой линии на делительном диаметре фрезы.

Параметры шлифовального круга: диаметр круга $D_к = 200...100$ мм; параметры профиля $a = 42{,}738$ мм; $c = \pm 21{,}415$ мм; $R = 30$ мм.

Для образования заднего угла червячной фрезы шлифовальному кругу сообщают дополнительное движение затылования, вследствие чего происходит формообразование поверхности зуба [2].

Боковая поверхность зубьев червячной фрезы при указанных движениях описывается [1] двумя уравнениями:

$$F = \sqrt{\left[x\cos\varphi + y\sin\varphi - A - k_1\varphi\right]^2 + \left[\left(-x\sin\varphi + y\cos\varphi\right)\cos\alpha - \left(z - p\varphi\right)\sin\alpha\right]^2} - \\ -A + a - \sqrt{R^2 - \left[\left(-x\sin\varphi + y\cos\varphi\right)\sin\alpha + \left(z + p\varphi\right)\cos\alpha - c\right]^2} = 0; \tag{1}$$

$$F_\varphi = \frac{\left[x\cos\varphi + y\sin\varphi - A - k_1\varphi\right]\left(-x\sin\varphi + y\cos\varphi + k\right)}{\sqrt{\left[x\cos\varphi + y\sin\varphi - A - k_1\varphi\right]^2 + \left[\left(-x\sin\varphi + y\cos\varphi\right)\cos\alpha - \left(z + p\varphi\right)\sin\alpha\right]^2}} + \\ + \frac{\left[\left(-x\sin\varphi + y\cos\varphi\right)\cos\alpha - \left(z + p\varphi\right)\sin\alpha\right]\left[\left(-x\cos\varphi - y\sin\varphi\right)\cos\alpha + p\sin\alpha\right]}{\sqrt{\left[x\cos\varphi + y\sin\varphi - A - k_1\varphi\right]^2 + \left[\left(-x\sin\varphi + y\cos\varphi\right)\cos\alpha - \left(z + p\varphi\right)\sin\alpha\right]^2}} + \\ + \frac{\left[\left(-x\sin\varphi + y\cos\varphi\right)\sin\alpha + \left(z + p\varphi\right)\cos\alpha - c\right]\left[\left(-x\cos\varphi - y\sin\varphi\right)\sin\alpha - p\cos\alpha\right]}{\sqrt{R^2 - \left[\left(-x\sin\varphi + y\cos\varphi\right)\sin\alpha + \left(z + p\varphi\right)\cos\alpha - c\right]^2}} = 0. \tag{2}$$

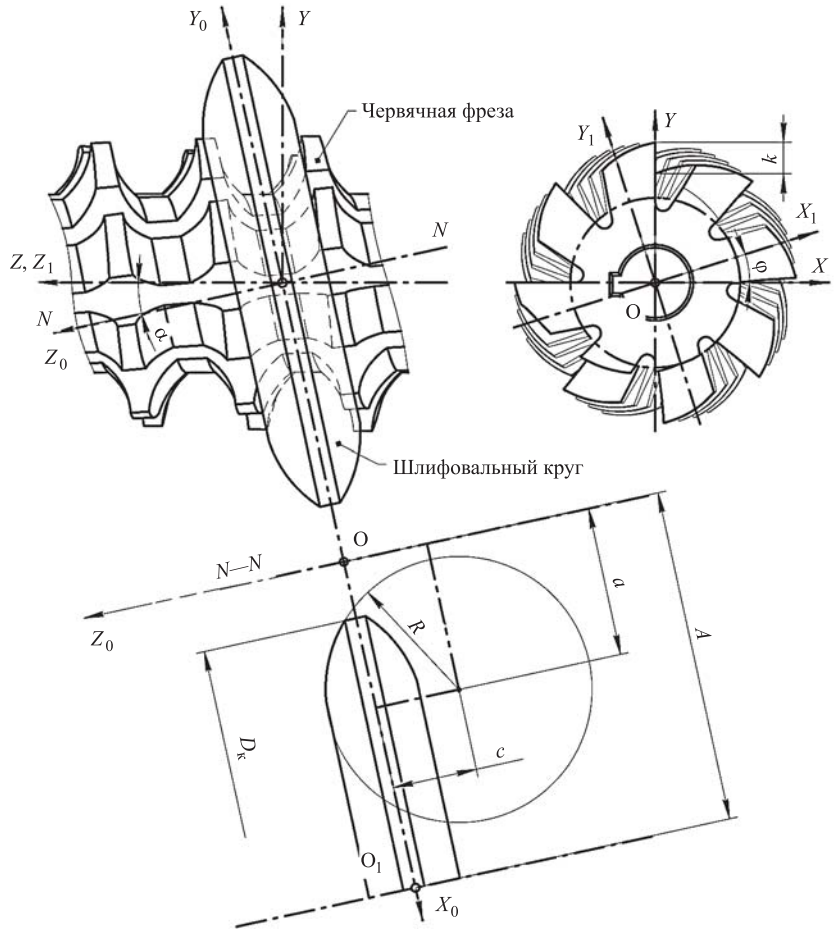

Рис. 1. Схема к расчёту тороидального профиля червячной фрезы

Таблица 1

Координаты точек профилей однозаходной червячной фрезы

x, мм	Левый профиль, мм			Правый профиль, мм		
	z		$\Delta_л$	z		$\Delta_п$
	$\theta_1 = 0°$	$\theta_2 = 20°$		$\theta_1 = 0°$	$\theta_2 = 20°$	
24	2,626	2,763	−0,111	−2,331	−2,337	0,004
28	5,049	5,128	−0,070	−4,918	−4,912	−0,005
32	6,761	6,807	−0,042	−6,744	−6,733	−0,009
36	7,879	7,902	−0,022	−7,940	−7,926	−0,014

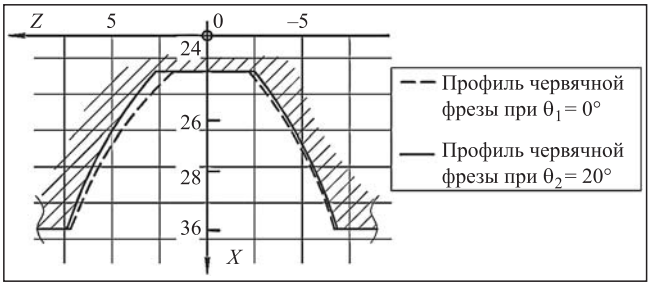

Рис. 2. Профиль однозаходной червячной фрезы в нормальной к витку плоскости

Уравнение (1) — семейство поверхностей шлифовального круга $F(x, y, z, \varphi) = 0$ при его винтовом движении; уравнение (2) — первая производная F по угловому параметру φ, ($F_\varphi(x, y, z, \varphi) = 0$).

С учётом уравнений (1) и (2) определим профиль зубьев червячной фрезы в любом сечении. В данном случае выбираем секущую плоскость, расположенную нормально по отношению к витку червячной фрезы:

$$y = x\mathrm{tg}\alpha. \qquad (3)$$

При совместном решении уравнений (1)—(3) определим точки (x, y, z) профиля фрезы в нормальном сечении витка фрезы.

Для того чтобы определить аналогичные точки переточенной фрезы, необходимо подставить в уравнения (1) и (2) формулы преобразования координат $x = x\cos\theta - y\sin\theta$, $y = y\cos\theta + x\sin\theta$, $z = z + p\theta$, где θ — угол переточки фрезы по передней поверхности зуба, так как в результате затылования координаты точек режущей кромки переточенной фрезы смещаются к её оси на величину падения затылка $k_1\theta$. Для сравнения координат z точек фрезы новой и переточенной необходимо добавить к координате x величину падения $k_1\theta$.

В табл. 1 приведены результаты расчёта координат точек профилей червячной фрезы новой и окончательно переточенной (угол переточки $\theta_1 = 0°$ и $\theta_2 = 20°$) в обоих случаях $D_к = 100$ мм.

В табл. 1 указаны координаты точек профилей (x, z) и отклонения на левом $\Delta_л$ и правом $\Delta_п$ профилях, вычисленные по нормали.

Наибольшее $\Delta_{л_{max}} = -0{,}111 - (-0{,}022) = -0{,}089$ мм практически в 5,5 раз превышает допуск (0,016 мм) на отклонение профиля зуба фрезы.

На рис. 2 показан характер изменения профиля зуба фрезы после её переточки: отклонения профиля по впадине больше, чем по вершине.

Аналогичные расчёты представлены в табл. 2 для двухзаходной фрезы при $\theta_1 = 0°$ и $\theta_2 = 20°$; $D_к = 100$ мм.

Расчёт двухзаходной фрезы показал максимальное отклонение $\Delta_{л_{max}} = -0{,}195 - (-0{,}033) = 0{,}162$ мм, что в 10 раз выше допустимого значения (0,016 мм).

Рассмотрим влияние диаметра шлифовального круга и величины переточки на профиль зуба однозаходной червячной фрезы.

Зависимость изменения отклонений профиля однозаходной червячной фрезы от величины её переточки θ для фрез, затылованных разными шлифовальными кругами ($D_к$ = 100 и 200 мм соответственно), представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что фреза однозаходная, затылованная кругом $D_к$ = 100 мм, превысит допуск на отклонение профиля зуба (0,016 мм) при угле переточки $\theta_1 = 5{,}3°$, а затылованная кругом $D_к$ = 200 мм, при $\theta_2 = 4{,}9°$. Для двухзаходной фрезы эти значения составляют: $\theta_1 = 3{,}3°$ и $\theta_2 = 2{,}9$. После превышения допуска на профиль червячной фрезы её, как правило, переводят на черновые операции.

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением угла переточки фрезы отклонения её профиля от номинального в большей мере сказываются на одной стороне профиля зуба, в данном случае левой: при $D_к$ = 100 мм, θ = 20°, фреза однозаходная — $\Delta_{л_{max}} = 0{,}089$ мм (в 5,5 раз больше допуска); при $D_к$ = 100 мм, θ = 20°, фреза двухзаходная — $\Delta_{л_{max}} = 0{,}162$ мм (в 10 раз больше допуска).

Для того чтобы повысить срок службы фрезы увеличением стачиваемого слоя, необходимо откорректировать её профиль. В данном случае новая фреза изначально будет изготовлена с заранее «развернутым» в пределах допуска профилем, который в дальнейшем, по мере переточки, в определённый момент совпадёт с исходным.

За исходный профиль примем фрезу с параметрами: m = 6,3 мм; z_{10} = 1; k = 5 мм; ξ = 45°; α = 0,099 рад, затылованную шлифовальным кругом с параметрами: $D_к$ = 200 мм; a = 42,738 мм; c = ±21,415 мм; R = 30 мм.

Расчёты показывают, что данную фрезу можно перетачивать на θ = 4,9°, дальнейшая переточка приведёт к превышению допуска на отклонение профиля зуба.

Для решения задачи по увеличению количества переточек рассмотрим схему определения корректирующих параметров тороидального профиля шлифовального круга, изменяющих профиль червячной фрезы.

Таблица 2

Координаты точек профилей двухзаходной червячной фрезы

x, мм	Левый профиль, мм			Правый профиль, мм		
	z		$\Delta_л$	z		$\Delta_п$
	$\theta_1 = 0°$	$\theta_2 = 20°$		$\theta_1 = 0°$	$\theta_2 = 20°$	
24	2,736	2,972	−0,195	−2,153	−2,126	−0,021
28	5,079	5,221	−0,127	−4,820	−4,793	−0,023
32	6,737	6,819	−0,077	−6,702	−6,673	−0,027
36	7,835	7,869	−0,033	−7,954	−7,916	−0,036

На рис. 4 показана схема определения корректирующих параметров профиля шлифовального круга.

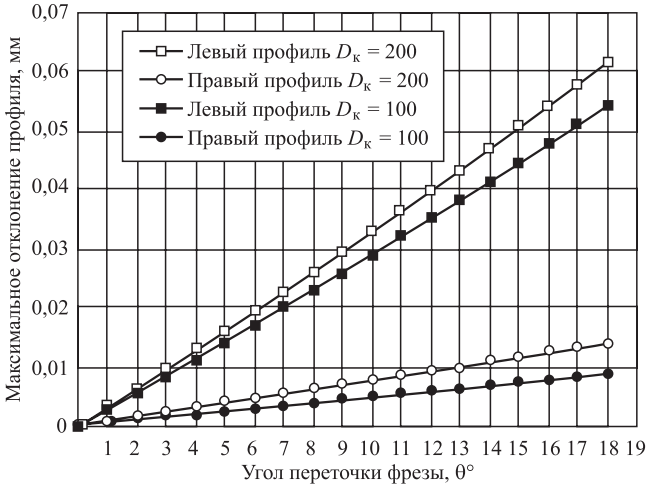

Рис. 3. Влияние угла переточки на отклонение профиля фрезы

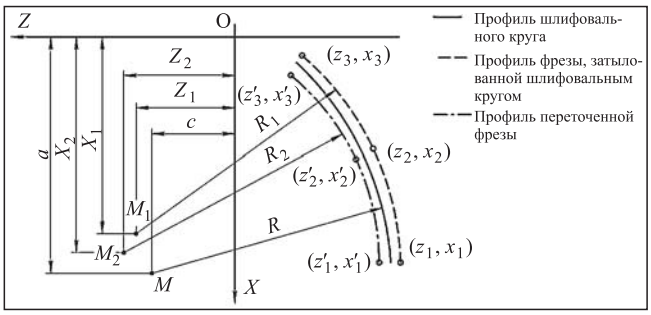

Рис. 4. Схема для корректировки тороидального профиля червячной фрезы:

a, *c*, *R* — соответственно координаты центра и радиус профиля шлифовального круга в нормальном сечении (начальные параметры установки шлифовального круга); x_1, z_1, R_1 — соответственно координаты центра и радиус профиля червяка или фрезы в нормальном сечении (фреза новая, полученная после затылования); x_2, z_2, R_2 — соответственно координаты центра и радиус профиля в нормальном сечении фрезы (фреза переточенная)

После затылования червячной фрезы кругом, имеющим профиль в нормальном сечении в виде дуги окружности радиусом R, получим в том же сечении кривые линии профиля фрезы, отличные от начальной дуги. Заменим эти кривые дугами окружностей с радиусами R_1, R_2, для чего выберем на данных кривых по три точки (x_1, z_1), (x_2, z_2), (x_3, z_3) и $(x'_1, z'_1), (x'_2, z'_2), (x'_3, z'_3)$. Далее найдём координаты центра и радиус дуг профиля (новой фрезы) из системы уравнений:

$$\begin{cases} (z_1 - Z_1)^2 + (x_1 - X_1)^2 = R_1^2; \\ (z_2 - Z_1)^2 + (x_2 - X_1)^2 = R_1^2; \\ (z_3 - Z_1)^2 + (x_3 - X_1)^2 = R_1^2, \end{cases} \quad (4)$$

а переточенной из уравнений:

$$\begin{cases} (z'_1 - Z_2)^2 + (x'_1 - X_2)^2 = R_2^2; \\ (z'_2 - Z_2)^2 + (x'_2 - X_2)^2 = R_2^2; \\ (z'_3 - Z_2)^2 + (x'_3 - X_2)^2 = R_2^2. \end{cases} \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) определим координаты центров окружностей (X_1, Z_1), (X_2, Z_2) и их радиусы R_1, R_2. Таким образом, зная параметры установки профиля шлифовального круга и параметры профиля фрезы, затылованной данным кругом, можно при корректировке значений a, c, R получить любой профиль, отвечающий различным техническим требованиям.

Для того чтобы шлифовальным кругом с параметрами установки R, a, c затыловать фрезу и получить профиль "переточенной фрезы" (см. рис. 4, штрихпунктирная линия), необходимо откорректировать начальные параметры круга (R, a, c), используя уравнение (6) для правого профиля:

$$c' = X_1 - X_2 + c;\ a' = Z_1 - Z_2 + a;$$
$$R' = R_1 - R_2 + R, \quad (6)$$

для левого профиля:

$$c' = X_1 - X_2 - c.$$

Корректируя параметры установки шлифовального круга и тем самым увеличивая количество переточек фрезы, необходимо также учитывать уменьшение диаметра фрезы, что в свою очередь скажется на профиле зуба червячного колеса. В таком случае для компенсации уменьшения диаметра фрезы необходимо в процессе зубофрезерования её доворачивать или добавлять ей осевые перемещения.

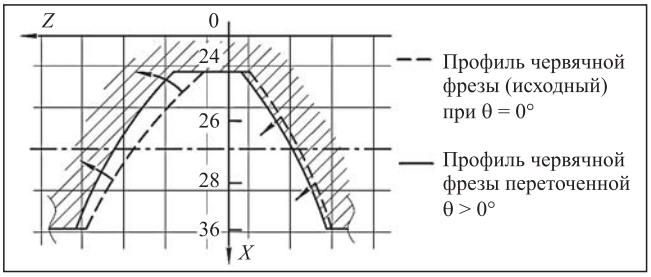

Рис. 5. Характер смещения профиля червячной фрезы в процессе переточки

Рассмотрим характер влияния переточки на смещение тороидального профиля червячной фрезы.

Из рис. 5 видно, что в процессе переточки левый профиль червячной фрезы смещается влево, а также изменяется ширина впадины, т.е. уменьшается толщина зуба фрезы, что в свою очередь ведёт к возникновению погрешности шага зацепления и разнотолщинности зубьев червячного колеса. Стрелками на рис. 5 показано смещение профиля в процессе переточки фрезы.

В данном случае, для того чтобы увеличить количество переточек фрезы, необходимо при её изначальном затыловании искусственно сместить левый профиль в пределах допуска на отклонение профиля зуба (0,016 мм). Откорректированные параметры установки шлифовального круга будут:

для левого профиля (в мм):

$a = 42{,}7575$, $c = -21{,}3570$, $R = 29{,}9430$;

для правого профиля (в мм):

$a = 42{,}7741$, $c = 21{,}4004$, $R = 30{,}0162$.

Сравним координаты точек исходной фрезы (непереточенной) и корригированной (непереточенной).

Таблица 3

Координаты точек профилей исходной и корригированной червячных фрез

x, мм	Левый профиль, мм			Правый профиль, мм		
	z		$\Delta_л$ по нормали	z		$\Delta_п$ по нормали
	исходная	корригированная		исходная	корригированная	
24	2,626	2,763	−0,011	−2,331	−2,337	−0,022
28	5,049	5,128	−0,020	−4,918	−4,912	−0,021
32	6,761	6,807	−0,012	−6,744	−6,733	−0,009
36	7,879	7,902	−0,022	−7,940	−7,926	−0,014

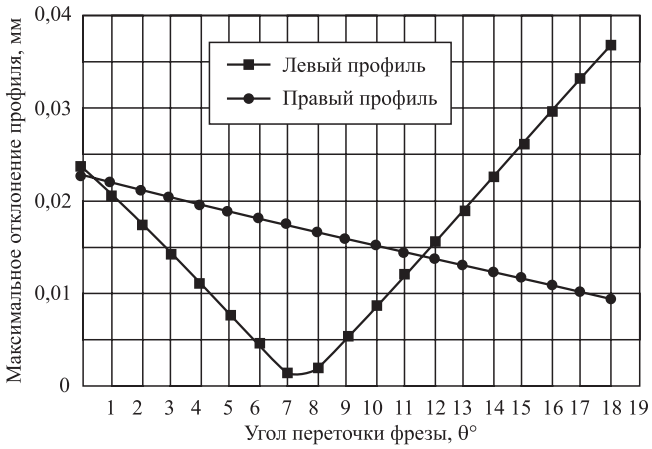

Рис. 6. Влияние угла переточки на отклонение профиля корригированной фрезы

Представленные в табл. 3 координаты точек профилей исходной фрезы и фрезы после её корректировки для левого и правого профилей в нормальном сечении показывают, что погрешность не превышает допуск в 0,016 мм и составляет $\Delta_{Л_{max}} = -0{,}022 - (0{,}011) = 0{,}011$ мм, $\Delta_{П_{max}} = -0{,}022 - (-0{,}014) = 0{,}008$ мм.

Результаты расчётов максимально возможного количества переточек данной корригированной фрезы приведены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что после коррекции параметров установки шлифовального круга (*a*, *c*, *R*) угол предельно допустимой переточки фрезы возрос с θ = 4,9° до θ = 14,5°. При θ = 6,7789° профиль переточенной фрезы практически совпадает с "исходным".

Таким образом, при допустимом износе, равном 0,3 мм, количество переточек возможно увеличить в 3 раза, что значительно повысит срок службы червячной фрезы.

Библиографические ссылки

1. **Ничков А.В., Ничков А.Г.** Отклонение профилей червяка и червячной фрезы при их формообразовании шлифовальным кругом // Техника машиностроения. № 5. 2001. С. 106—108.

2. **Литвин Ф.Л.** Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука. 1968. 584 с.

УДК 681.516.75

С.И. Юсифов, д-р техн. наук, проф. **Э.Н. Ибрагимова**
(Азербайджанская государственная нефтяная академия, г. Баку)
elladai@inbox.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ НАНЕСЕНИЯ СИЛИКАТНО-ЭМАЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ НА ВНУТРЕННЮЮ ПОВЕРХНОСТЬ ТРУБЫ

Представлена автоматическая система регулирования технологического режима нанесения силикатно-эмалевого покрытия на внутреннюю поверхность нефтяной трубы. При этих технологических режимах обеспечивается качество покрытия трубы, т.е. отсутствие микротрещин по всей поверхности силикатно-эмалевого покрытия трубы.

Ключевые слова: автоматическое управление; силикатно-эмалевые покрытия трубы; нефтяные трубы; скорость подачи и вращения трубы; микротрещины.

Automatic control of technological mode applying silicate-enamel coating on the inner surface of the oil pipe is presented. With these technological modes is provided with quality pipe coating, i.e. absence of surface microcracks throughout silicate-enamel coating pipe.

Keywords: automatic control; silicate-enamel coating of a pipe; oil pipes; feed rate and rotation of the pipe; microcracks.

Введение. Для защиты внутренней поверхности трубы от агрессивных нефтехимических и газовых продуктов используют силикатно-эмалевое покрытие, которое увеличивает срок службы трубопроводов на десятки лет.

Положительный опыт производства нефтяных труб с силикатными покрытиями в Каспийском морском пароходстве (CASPIAN PIPE COATING, г. Баку) вызвал большой интерес как российских, так и зарубежных специалистов в изучении технологического процесса образования макро- и микротрещин по всей поверхности стальных труб со стандартными размерами [1].

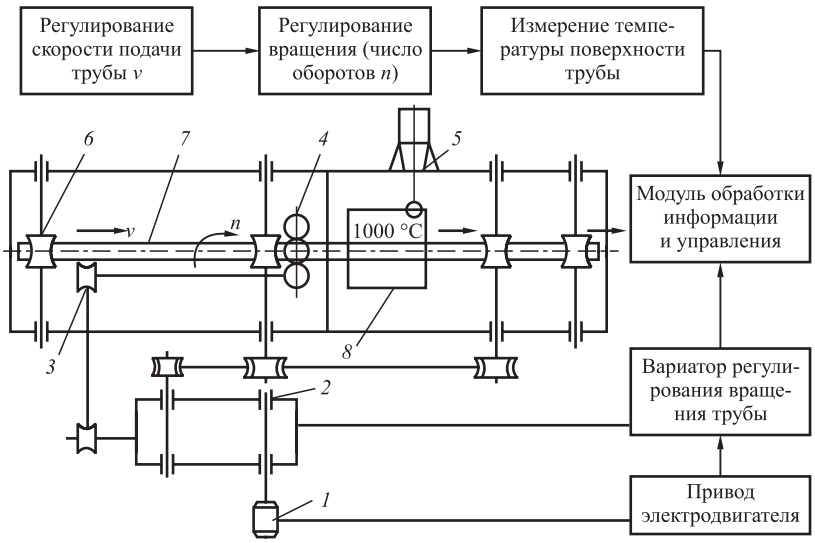

Рис. 1. Структурная схема системы управления нанесением покрытия на поверхность трубы:
1 — электродвигатель; *2* — вариатор; *3* — ременная передача; *4* — вращательный ролик; *5* — пирометр; *6* — конический ролик; *7* — труба; *8* — нагревательная печь

В процессе нанесения покрытия наблюдаются кольцевые, винтовые и криволинейные микро- и макротрещины. Причинами нарушения технологии нанесения покрытия являются отклонения от точности технологического процесса и системы управления контролем качества и т.д. К основным параметрам технологического процесса относят размеры трубы, температуру нагрева поверхности трубы, скорость осевой подачи и вращения трубы.

Описание установки и объекта управления. Для устранения макро- и микротрещины в покрытиях разработана установка нанесения силикатно-эмалевых покрытий на внутреннюю поверхность трубы, в отличие от системы управления, прототипом которой является конструкция Н.Ю. Ибрагимова, представленная в работе [2].

Структурная схема разработанной установки и система управления нанесением покрытия на внутреннюю поверхность трубы, приведённая на рис. 1, работает следующим образом. Приёмная часть установки предназначена для обеспечения подачи трубы в нагревательную печь *8* со строго определённой линейной скоростью *v* трубы *7* и её вращения, которое осуществляется цилиндрическим роликом *4* с помощью электродвигателя *1*, вариатора *2*, ремённой передачи *3*. Для нанесения покрытия трубы имеются конические вращательные ролики *6*. При нанесении силикатно-эмалевого покрытия эта часть трубы подвергается равномерному нагреванию. Качество образования микро- и макротрещин по всей поверхности покрытия трубы контролируются.

Очевидно, что поступательное и вращательное движения трубы взаимосвязаны. Ведущие конические ролики *6*, установленные под углом λ к оси трубы, не обеспечивают точной подачи и вращения покрытия трубы и раздельного их регулирования. При передаче движения трубы за счёт коэффициента силы трения *f* конических роликов всегда имеется относительное скольжение.

Существующая установка не имеет возможности автоматического регулирования скорости подачи трубы с одновременным вращением в зависимости от режима нагрева поверхности трубы. Между тем от точности скорости подачи и одновременного вращения трубы, а также поддержания температуры 650...700 °С на поверхности трубы обеспечивается отсутствие микротрещины в границах между металлом и покрытием трубы.

Измерение температуры поверхности трубы осуществляется пирометром *5* и вторичным прибором гальванометром для возможного автоматического регулирования равномерного нагрева поверхности трубы.

Анализ системы управления. Математическое описание процесса нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы определяется выражением механического движения трубы [3]:

$$v = \frac{\pi D n}{60} \frac{F_f}{F_s} f \sin\lambda, \qquad (1)$$

где v — линейная скорость подачи трубы; D — наружный диаметр трубы; n — число оборотов вращения трубы; F_f и F_s — сила трения поверхности покрытия и металлической трубы; f — коэффициент трения поверхности контакта трубы; λ — угол наклона трубы относительно поверхности конических роликов.

На рис. 2 представлена система управления процессом нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы на основе функциональной схемы модуля обработки информации.

Параметры управления технологическим процессом нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы: наружный диаметр трубы *D*, число оборотов вращения трубы *n* и температура нагрева поверхности трубы в пре-

делах 650...700 °С представлены на функциональной схеме модуля обработки информации.

Индикаторным механизмом этого процесса являются лампы Н1 и Н2. Следует отметить, что загорание лампы Н1 или Н2 показывает соответственно годность и негодность технологического процесса нанесения покрытия трубы. Система управления установлена контроллером типа Simatic S7—300 [4].

Если скорость подачи для нефтяной трубы изменяется в пределах 0,01...0,15 м/с и температура нагрева поверхности трубы составляет 650...700 °С, то технологический процесс считают высококачественным и загорается лампа Н1, в обратном случае загорится лампа Н2. С помощью программы Simatic Step-7 фирмы Siemens выполняется автоматическое регулирование систем автоматизации процесса нанесения покрытия на основе программируемых логических контроллеров. Обеспечение разработанной программы Step-7 можно представить в следующем виде:

```
FUNCTION ABC: VOID
VAR _INPUT
D, n: REAL;
T:NTEGER;
END_VAR
VAR_OUTPUT
H1, H2:BOOL;
END_VAR
PI: = 3.14;
Lambda: = (30*Pi/180);
f: = 0.1;
FTFN: = 0.95;
IF (D > = 0.05) AND (D< = 0.75) THEN
END _VAR
VAR_TEMP
lambda, f, FTFN,PI:REAL;
V: REAL;
IF (N> = 30) AND (N< = 450) THEN
V: = (Pi*D*n)*sin(lambda)*(f*FtFn)/60;
IF (V> = 0.1) AND (V< = 1.5) AND (T = 700)
THEN H1: = TRUE
ELSE H2: = TRUE;
END_IF;
END_IF;
END_IF;
END_FUNCTION
```

Практические результаты. Интерпретация скорости подачи и вращения при нанесении покрытия на внутреннюю поверхность нефтяной трубы в зависимости от диаметра трубы представлена на рис. 3. Для наглядности приведена трёхмерная интерпретация автоматического процесса нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы. При таком автоматическом регулировании технологического процесса обеспечивается высокое качество покрытия трубы.

Заключение. Разработана система управления автоматическим регулированием скорости подачи и вращения при нанесении силикатно-эмалевого покрытия на внутреннюю поверхность трубы, что позволяет устранить микротрещины в границах между металлом и покрытием трубы. Полученные результаты дают возможность выбора технологического режима нанесения покрытия на внутреннюю поверхность нефтяной трубы для устранения микротрещин.

Рис. 2. Функциональная схема системы управления нанесением покрытия на поверхность трубы

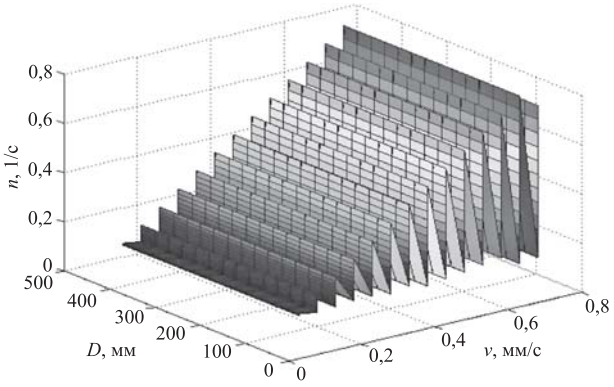

Рис. 3. Регулирование скорости подачи и вращения нефтяной трубы в зависимости от диаметра эмалированной поверхности

Библиографические ссылки

1. **Максудов Р.А., Кан А.Г.** Остеклованные трубы в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1983, 127 с.

2. **Нуруллаев Т.Н., Ибрагимов Н.Ю., Османов В.О.** Способ нанесения силикатного покрытия на внутреннюю поверхность стальной трубы // Патент N i 2003032. 2003. Азербайджанская республика.

3. **Скворцов Б.В., Голикова М.И.** Компьютерное моделирование системы автоматического управления нанесением покрытия на внутреннюю поверхность трубы. Materiály IX mezinárodní vědecko-praktická konference "MODERNÍ VYMOŽENOSTI VĚDY — 2013", Díl 76 Technické vědy, Praha 2013. С. 83—88.

4. **Исмайылова Э.Н.** Определение трещины в силикатных покрытиях труб. 10-я Междун. науч.-практ. конф., Болгария, София, 2014. Т. 47. С. 73—75.

УДК 66.02

Д.С. Дворецкий, д-р техн. наук, проф., **С.И. Дворецкий,** д-р техн. наук, проф.,
С.Г. Толстых, канд. техн. наук, доц.
(Тамбовский государственный технический университет),
Г.М. Островский, д-р техн. наук, проф.
(ОАО «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова», г. Москва)

svetlanatolstyh@mail.ru

АНАЛИЗ ГИБКОСТИ, ОПТИМИЗАЦИЯ И СИНТЕЗ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

Предложен системный подход к синтезу гибких химико-технологических систем, формирующих предпосылки эффективного управления и автоматизации. Сформулирована двухэтапная задача оптимального проектирования гибких химико-технологических систем, и формализована многоэтапная итерационная процедура решения задач оптимизации и синтеза в условиях интервальной неопределённости исходных данных и коэффициентов математической модели. Разработана методика расчёта конструктивных параметров и режимных переменных (оптимальных заданий регуляторам АСР) аппаратурно-технологического оформления химико-технологических систем с научно-обоснованным запасом технического ресурса, гарантирующего их оптимальное (в смысле энерго- и ресурсосбережения и качества выпускаемой продукции) и безопасное функционирование независимо от изменения неопределённых переменных.

Ключевые слова: химико-технологическая система; неопределённость; функция гибкости; математическая модель; оптимизация; синтез; коэффициент запаса; реакторная установка; автоматическая система регулирования.

A systematic approach to synthesis of flexible chemical processes that form the premise of effective control and automation is proposed. Two-stage problem of optimal design of flexible chemical processes is formulated. Multi-stage iterative procedure for solving optimization problems and synthesis is formalized under interval uncertainty of initial data and coefficients of a mathematical model. The methodology for calculating of design parameters and mode variables (optimal assignments regulators of ACR) hardware-technological decor of chemical-technological systems is developed. Reserve of technical resource is scientifically based. This ensures their optimal energy- and resource efficiency and product quality, and also safe functioning independently of change uncertain variables.

Keywords: chemical-technological system; uncertainty; function of flexibility; mathematical model; optimization; synthesis; coefficient of stock; reactor facility; automatic control system.

Введение. Математические модели стали неотъемлемой частью анализа, оптимизации и синтеза химико-технологических систем (ХТС). Целью оптимизации и синтеза ХТС является определение оптимальной структуры ХТС, типов и конструкций технологических машин и аппаратов, конструктивных параметров и режимных переменных функционирования ХТС в статических и динамических режимах с точки зрения каких-либо критериев эффективности. При этом должны быть выполнены проектные и регламентные требования (ограничения), связанные с обеспечением заданных значений производительности ХТС, спецификации качества производимой продукции, технико-экономических показателей функционирования ХТС, условий безопасности и др.

Задачи анализа, оптимизации и синтеза ХТС, как правило, решаются в условиях неточности исходной физико-химической, технологической и экономической информации с использованием неточных математических моделей ХТС. Кроме того, в ходе эксплуатации ХТС случайным образом изменяются внутренние характеристики технологического оборудования ХТС, а также условия внешней среды. В результате выбор оптимальных значений проектных параметров ХТС должен обеспечить работоспособность и оптимальную работу ХТС на всем этапе её функционирования, несмотря на использование неточных математических моделей и возможные изменения внутренних и внешних факторов в ходе её эксплуатации.

Анализ гибкости ХТС. При анализе гибкости и оптимизации ХТС должны быть удовлетворены проектные и регламентные ограничения, выполнение которых осложняется наличием источников неопределённости (неточности) в математических моделях: неточностью экспериментальных данных, с помощью которых были определены коэффициенты в математических моделях (константы скоростей химических реакций, коэффициенты межфазового обмена, коэффициенты тепло- и массопереноса и т.д.); неточностью физических и химических закономерностей (принимаемых допущений и гипотез), положенных в основу математических моделей; изменением внутренних факторов ХТС на этапе её функционирования, приводящих к изменению некоторых коэффициентов в математических моделях (уменьшение активности катализатора приводит к изменению кинетических коэффициентов скорости реакций, оседанию некоторых веществ на поверхности теплообмена теплообменника, к изменению коэффициента теплоотдачи и, соответственно, теплопередачи); изменением внешних факторов функционирования ХТС во время её эксплуатации; геометрической неточностью в реализации размеров технологического оборудования при их изготовлении; неточностью реализации оптимальных режимов функционирования ХТС.

В связи с этим при проектировании ХТС известно только, что некоторая часть её параметров принадлежит некоторой области неопределённости Ξ, которая задаётся следующим образом: $\Xi = \{\xi{:}\xi^L \leqslant \xi \leqslant \xi^U\}$. Предположим, что на этапе эксплуатации ХТС неопределённые параметры $\xi \in \Xi$ либо постоянны, либо меняются достаточно медленно, так что переходными процессами в системе можно пренебречь. Поэтому используем стационарные математические модели, и задача синтеза ХТС будет формулироваться как задача статической оптимизации.

Таким образом, при синтезе ХТС вынуждено используются неточные математические модели. Поэтому возникает вопрос: как можно гарантировать выполнение всех проектных ограничений на этапе функционирования ХТС? Методы теории гибкости позволяют решить эту проблему [1—3].

Задача статической оптимизации при проектировании ХТС может быть записана в виде:

$$\min_{a\in A,\, d\in D,\, z\in Z} \bar{I}(a, d, z, \xi); \qquad (1)$$

$$h(a, d, z, \xi) = 0; \qquad (2)$$

$$\bar{g}(a, d, z, \xi) \leqslant 0, \qquad (3)$$

где $\bar{I}(\cdot)$ — целевая функция; a — вектор, описывающий (задающий) структуру ХТС, тип (конструкцию) технологических аппаратов и оборудования ХТС; d — вектор конструктивных переменных; ξ — вектор неопределённых параметров; h — вектор-функция ограничений типа равенства (уравнения математической модели ХТС); $\bar{g}$ — вектор-функция ограничений типа неравенства (проектные и регламентные ограничения); z — вектор режимных управляющих переменных (оптимальных заданий регуляторам системы автоматического управления); A, D, Z — области изменения переменных a, d и z соответственно; множество A включает структурные параметры ХТС, множество D — конструктивные переменные.

Ясно, что переменные a, d остаются постоянными на этапе функционирования ХТС. Вектор z включает все переменные, которые могут изменяться на этапе функционирования ХТС и могут быть использованы для управления ХТС. Область в пространстве $A \times D \times Z$, в которой выполняются ограничения (3), называется допустимой областью задачи оптимизации ХТС.

Задача синтеза ХТС формулируется при следующих предположениях:

в жизненном цикле ХТС выделяются два этапа — проектирования и функционирования;

имеются регламентные ограничения и проектные требования, связанные с осуществлением технологического процесса, экономикой производства, спецификацией качества продукции, технико-экономическими показателями ХТС, производительностью, взрывобезопасностью, экологией, которые записываются в форме (2), (3);

имеются три типа переменных — структурные a, конструктивные d (размеры аппаратов, количество функциональных узлов и т.п.) и режимные (управляющие) z (температура, давление, расход и др.).

Двухэтапная задача оптимизации ХТС. На этапе функционирования ХТС конструктивные переменные остаются неизменными, а режимные (управляющие) могут изменяться. Поэтому на этапе проектирования заранее можно определять многомерные функции $z(\xi)$, обеспечивающие выполнение регламентных и проектных ограничений для любого значения $\xi \in \Xi$ на этапе функционирования ХТС.

Будем называть ХТС гибкой, а соответствующие ей структуру и аппаратурно-технологическое оформление допустимыми, если на этапе функционирования все ограничения

выполняются при условии, что неопределённые параметры ξ могут принимать любые значения из области неопределённости Ξ.

В качестве целевой функции в задаче оптимизации при проектировании ХТС используем некоторую оценку будущей работы ХТС на этапе её функционирования: среднее значение, которое может принять критерий; наихудшее значение критерия; верхнюю границу для критерия, которая не может быть нарушена с заданной вероятностью.

Условие гибкости ХТС можно записать в виде неравенства:

$$\max_{\xi\in\Xi} g_j(a, d, z, \xi) \leqslant 0,\ j = 1, \ldots, m. \qquad (4)$$

Поскольку математическое ожидание $M_\xi\{I(a, d, z, \xi)\}$ даёт среднее значение первоначальной целевой функции $I(a, d, z, \xi)$ на этапе функционирования ХТС, то естественно использовать эту величину как целевую функцию задачи оптимизации в условиях неопределённости. Объединяя целевую функцию и условие гибкости (4), сформулируем двухэтапную задачу оптимизации ХТС с жёсткими ограничениями в следующем виде:

$$\min_{a\in A, d\in D} M_\xi\{\min_{z\in Z} I(a, d, z, \xi)\} =$$
$$= \min_{a, d, z(\xi)} M_\xi\{f(a, d, z, \xi)\};$$
$$h_r(a, d, z(\xi), \xi) = 0\ ,\ \ r = 1, \ldots, K;$$
$$g_j(a, d, z(\xi), \xi) \leqslant 0\ ,\ j = 1, \ldots, m,\ \ \xi \in \Xi;$$
$$\chi(a, d, z(\xi), \xi) \leqslant 0,$$

где χ — функция гибкости; K — количество ограничений в виде равенств.

В некоторых случаях стационарный режим, найденный на первом этапе и оптимальный с точки зрения экономического критерия, может оказаться неустойчивым. Поэтому при проектировании гибких ХТС необходимо к проектным ограничениям добавить условия устойчивости стационарных режимов, например, по Ляпунову [4] или матричные меры для оценки устойчивости [5, 6].

Гибкость и стоимость исходной информации. Чем больше имеется информации о ХТС на этапах проектирования и функционирования, тем более экономичную конструкцию ХТС можно спроектировать. Для получения большей информации о ХТС можно использовать разработку более точной математической модели; установку дополнительных датчиков и контрольно-измерительных приборов; установку системы автоматического регулирования для стабилизации параметров входных потоков. Использование дополнительных средств требует капитальных и операционных затрат. Возникает вопрос об экономической целесообразности использования дополнительных средств, т.е. об оптимальном уровне полноты и точности экспериментальной информации, доступной на этапе функционирования ХТС. Обозначим через P стоимость дополнительных датчиков, приборов и системы автоматического регулирования, позволяющих формулировать двухэтапную задачу оптимизации (ДЭЗО). Пусть оптимальные значения критериев одноэтапной задачи оптимизации (ОЭЗО) и ДЭЗО равны f_1^* и f_2^* соответственно. Тогда использование системы автоматического регулирования целесообразно, если $f_2^* - f_1^* \geqslant P$.

Естественно поставить общую задачу определения оптимального уровня необходимой экспериментальной информации (оптимального количества датчиков, приборов, уровня ошибок измерения и ошибок реализации оптимальных значений управляющих переменных) при решении задачи оптимального проектирования ХТС.

Пример оптимального проектирования реакторной установки тонкого органического синтеза непрерывного действия. В качестве примера рассмотрим ДЭЗО проектирования турбулентного трубчатого реактора диазотирования ароматических аминов производительностью 1000 т пигмента/г (рис. 1).

Выполнение требований технического задания необходимо обеспечить при условии неопределённости некоторых параметров на этапе проектирования установки: концентрации твёрдой фазы амина в питании реактора $[C_A]_S^{(0)}$, кинетического коэффициента A растворения твёрдой фазы амина и энергий активации побочных реакций образования диазосмол E_4, E_5. Действительно, значение концентрации $[C_A]_S^{(0)}$ при подготовке суспензии амина будет всегда колебаться относительно номинального значения из-за объективно существующей неточности систем дозирования твёрдых и жидких веществ в технологические аппараты, а значения кинетических констант известны приблизительно. В лучшем случае их можно задать интервальными значениями (табл. 1).

В ДЭЗО при фиксированных структуре $\hat{a}$ секции реакторной установки ($\hat{a}_1$, $\hat{a}_2$ — количество вертикальных труб и диффузор-кон-

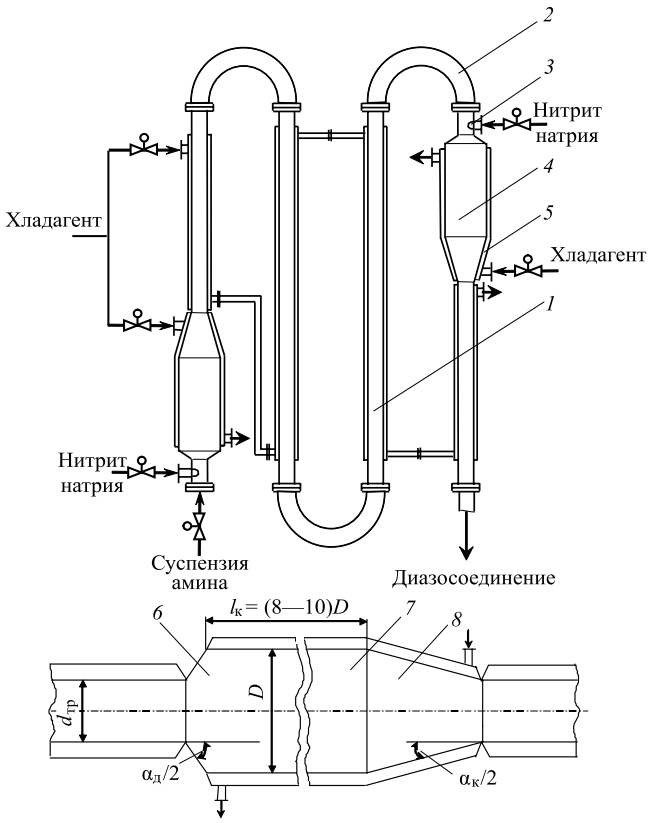

Рис. 1. Турбулентный трубчатый реактор с камерами смешения диффузор-конфузорного типа:
1 — трубчатый модуль; *2* — колено; *3* — форсунки для распыления нитрита натрия; *4* — диффузор-конфузорное устройство; *5* — теплообменная рубашка; *6* — диффузор; *7* — прямой участок; *8* — конфузор; $d_{тр}$ — диаметр трубчатой части реактора; *D* — диаметр камеры смешения; $l_к$ — длина камеры смешения; $\alpha_д$ — угол расширения диффузора; $\alpha_к$ — угол сужения конфузора

фузоров (камер смешения) в одной секции), диаметре трубчатой части $\hat{d}_{тр}$ и высоте $\hat{l}_{тр}$ вертикальных труб, диаметре камеры смешения $\hat{D}_{кам} = 0{,}14$ м, угле расширения диффузора $\hat{\alpha}_д = 60°$ и сужения конфузора $\hat{\alpha}_к = 30°$ требуется определить конструктивные переменные d^* (общую длину L^* трубчатой части (количество секций N^* реактора)), объём $V_{кам}$ диффузор-конфузора (камеры смешения)), режимные z^* переменные (распределение температуры $T^{(i)*}$ и подачи нитрита натрия $G_N^*(i)$ по зонам $i = 1, 2, 3$ (длине трубчатой части) реакторной установки), структуру $h(b) \in H$ и вектор настроечных параметров $s(h) \in S$ автоматической системы регулирования (АСР), чтобы приведённые затраты на производство 1 т пигмента достигали минимального значения, а структура АСР и оптимальные настройки регуляторов обеспечивали заданное качество переходных процессов, установленное в техническом задании на проектирование.

Постановка задачи:

$$I^*(\hat{a}, d^*, z^*) = \min_{d,u,z(\xi)} u, \qquad (5)$$

при связях в форме нелинейных уравнений математической модели $y = \Im(\hat{a}, d, z, \xi)$ процесса диазотирования [7] и ограничениях:

$$\Pr_\xi\{g_1 = I(\hat{a}, d, z(\xi), \xi) - u \leqslant 0\} \geqslant \rho_1; \qquad (6)$$

$$\Pr_\xi\{g_j(\hat{a}, d, z(\xi), \xi) \leqslant 0\} \geqslant \rho_j,\ j = 2, 3, 4, 5; \qquad (7)$$

$$\chi(a, d) = \\ = \max_{\xi\in\Xi} \min_{z} \max_{j\in J_2} g_j(\hat{a}, d, z, \xi) \leqslant 0,\ j = 6, 7, 8, \qquad (8)$$

где

$$g_2 = 1000{,}0 - Q(\hat{a}, d, z, \xi);$$
$$g_3 = 7{,}0\ \text{моль/м}^3 - c_{АК}^{вых}(\hat{a}, d, z, \xi);$$
$$g_4 = c_{АК}^{вых}(\hat{a}, d, z, \xi) - 14{,}0\ \text{моль/м}^3;$$
$$g_5 = 98\,\% - K_D(\hat{a}, d, z, \xi);$$
$$g_6 = \Pi_\chi(\hat{a}, d, z, \xi) - 0{,}5\,\%;$$
$$g_7 = \Pi_\sigma(\hat{a}, d, z, \xi) - 1{,}0\,\%;$$
$$g_8 = \Pi_\eta(\hat{a}, d, z, \xi) - 0{,}5\,\%.$$

В ДЭЗО (5)—(8) u — скалярная переменная (аналог конструктивных переменных); Pr{•} — вероятность выполнения ограничения {•}; g_0, g_j — функции ограничений; $g_0(a, d, z(\xi), \xi) = I(a, d, z(\xi), \xi)$ — приведённые затраты на создание и эксплуатацию турбулентной трубчатой реакторной установки диазотирования; ρ_0, ρ_j — заданные значения вероятности вы-

Таблица 1

Неопределённые параметры ξ

Неопределённые параметры	Средние значения	Интервалы изменения
Реакторная установка диазотирования		
Концентрация твёрдой фазы амина в питании реактора, моль/м^3	370,0	355,0—385,0
Кинетический коэффициент растворения твёрдой фазы амина	$5{,}4\cdot10^5$	$5{,}13\cdot10^5$—$5{,}67\cdot10^5$
Энергия активации реакций разложения диазосоединения, Дж/моль	87 150	86 975,7—87 324,3
	63 690	6241,6—63 817,4

полнения ограничений; $\chi(d)$ — функция гибкости реакторной установки.

Характерной особенностью ДЭЗО при синтезе ХТС является возможность подстройки управляющих переменных z в зависимости от параметра ξ на этапе функционирования проектируемой ХТС, т.е. фактически режимные переменные $z^* = z^*(\xi)$ являются оптимальными заданиями регуляторам АСР.

Для решения задачи (5)—(8) с помощью алгоритма, описанного в работе [3], потребовалось 18 итераций, результаты которых приведены в табл. 2. Многократно возникающую при этом вспомогательную задачу НЛП решали методом последовательного квадратичного программирования с использованием программы «ROPUD», разработанной сотрудниками лаборатории математического моделирования НИФХИ им. Л.Я. Карпова (г. Москва) под руководством д-ра техн. наук, проф. Г.М. Островского.

Сравнивая результаты решения задачи оптимизации без учёта неопределённости и ДЭЗО, видим, что при синтезе гибкой турбу-

Таблица 2

Результаты решения задач (5)—(8)

Наименование переменных задачи	Значения переменных	
	Без учёта неопределённости	С учётом неопределённости (смешанные ограничения)
Конструктивные переменные		
Число секций реактора N^*, шт.	7	9
Число вертикальных труб a_1, шт.	10	
Число камер смешения a_2, шт.	1	
Диаметр трубы $d_{тр}$, м	0,04	
Высота трубы $h_{тр}$, м	1,8	
Объём диффузор-конфузора $V_{дк}$, м^3	$20{,}0 \cdot 10^{-3}$	
Составляющие критерия оптимизации		
Стоимость изготовления реактора и строительно-монтажных работ C_K^*, у.е.	22 660,0	23 372,0
Затраты на сырьё и материалы $C_{см}^*$, у.е./т	1843,3	1845,2
Затраты на энергоносители $C_{эн}^*$, у.е./т	31,4	49,7
Амортизационные отчисления, у.е./т	2,7	3,9
Приведённые затраты $C^* = u^*$, у.е./т	1877,4	1979,5
Значения вероятностей выполнения ограничений		
$\text{Вер}_\xi\{g_1 = C(\hat{a}, d, z(\xi), \xi) - u \leqslant 0\}$	0,58	0,95
$\text{Вер}_\xi\{g_2 = 1000{,}0 - Q(\hat{a}, d, z, \xi) \leqslant 0\}$	—	0,95
$\text{Вер}_\xi \left\{ \begin{matrix} g_3 = 7{,}0 \text{ моль/м}^3 - c_{АК}^{вых}(\hat{a}, d, z, \xi)) \leqslant 0 \\ \vee\ g_4 = c_{АК}^{вых}(\hat{a}, d, z, \xi) - 14{,}0 \text{ моль/м}^3 \leqslant 0 \end{matrix} \right\}$	—	0,95
$\text{Вер}_\xi\{g_5 = 98\,\% - K_D(\hat{a}, d, z, \xi) \leqslant 0\}$	—	0,95
Значения функций ограничений		
Содержание диазосмол в диазорастворе Π_χ, %	0,5	0,5
Содержание нитрозных газов в диазорастворе Π_σ, %	0,88	0,97
Проскок амина Π_η, %	0,47	0,5
$\max\limits_{\xi \in \Xi} \min\limits_{z} \max\limits_{j \in J_2} g_j(\hat{a}, d, z, \xi)$	—	−0,07

лентной трубчатой реакторной установки диазотирования необходимо использовать коэффициент запаса по числу секций, равный $\Delta N = \dfrac{N^* - N^{\text{ном}}}{N^{\text{ном}}} = 0,28$, что несколько выше принятого в химической промышленности коэффициента запаса 0,25.

Структура локальных систем автоматического регулирования переменных состояния турбулентной трубчатой реакторной установки диазотирования выбирается с использованием множеств регулируемых (наблюдаемых) переменных и допустимых управляющих воздействий с учётом наблюдаемости выходных переменных и управляемости, показателей инерционности и регулируемости реакторной установки по каналам управления [3].

Результаты решения ДЭЗО (5)—(8) послужили основой для разработки принципиальной технологической и функциональной схемы автоматизации опытно-промышленной реакторной установки синтеза азопигментов непрерывного действия.

Опишем её работу на примере производства азопигментов алого концентрированного, лакокрасочного и жёлтого светопрочного, (рис. 2).

Солянокислую суспензию амина (3-нитро-4-аминотолуола) с заданной концентрацией приготавливают в аппарате *1*. Процесс диазотирования 3-нитро-4-аминотолуола нитритом натрия в присутствии 2,5...3-кратного избытка соляной кислоты осуществляют непрерывно в турбулентном трубчатом реакторе диазотирования *2*, куда солянокислая суспензия амина подаётся центробежным насосом *3*. Водный раствор нитрита натрия непрерывно и распределённо (по длине трубчатого реактора) подают в реакторную установку с помощью системы дозирующих насосов *4* таким образом, чтобы избыточная концентрация азотистой кислоты (диазотирующего агента) в зоне реакции диазотирования находилась в пределах 7,0...14,0 моль/м^3. Процесс диазотирования осуществляют в турбулентном режиме движения потока реакционной массы при заданном (оптимальном) температурном профиле. Полученный диазораствор непрерывно подаётся на очистку, которая осуществляется с помощью ультрацентрифуги *5*, и далее — в ёмкость *6*.

Очищенный раствор диазосоединения самотёком непрерывно поступает в турбулентный трубчатый реактор азосочетания *7*, куда одновременно подают растворы азосоставляющей (β-нафтолята или анилида ацетоуксус-

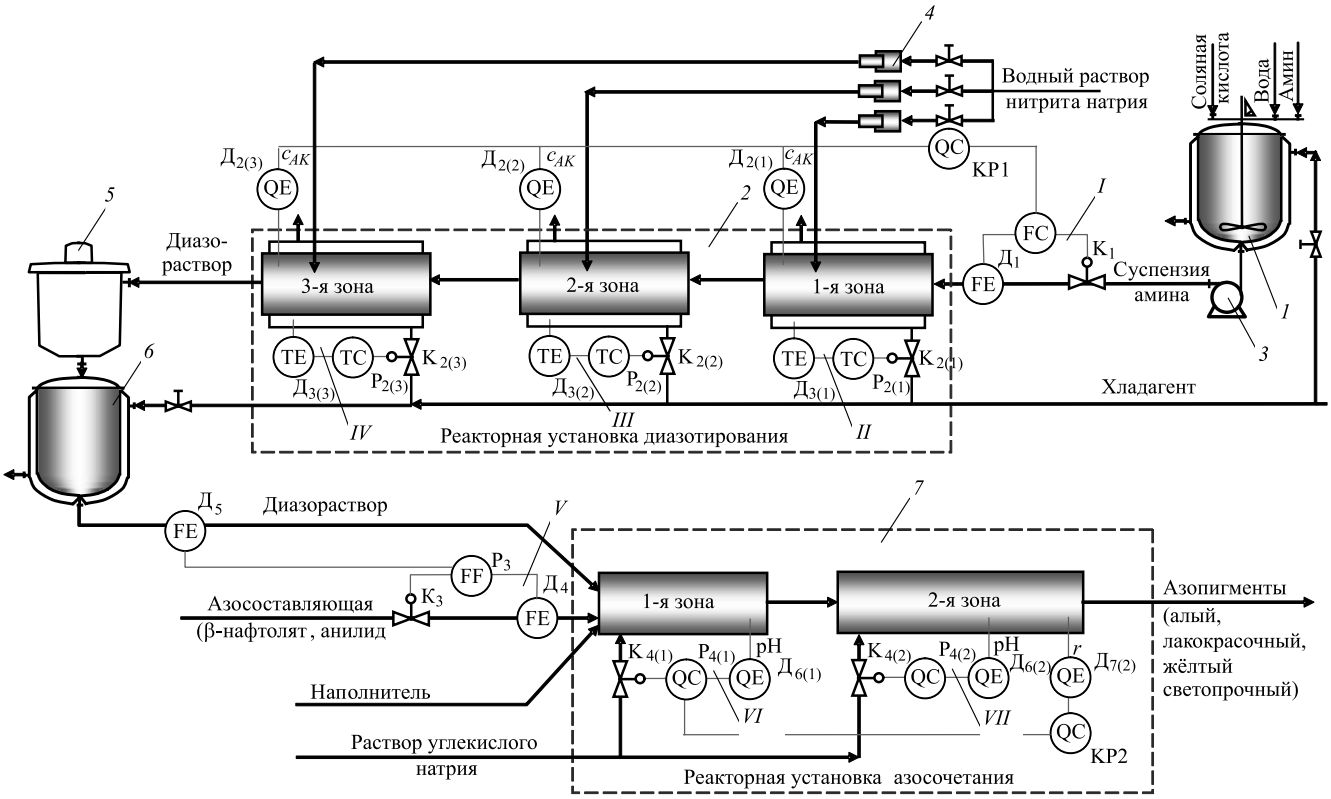

Рис. 2. Схема непрерывного технологического процесса синтеза азопигментов

ной кислоты в зависимости от марки пигмента) и наполнителя (хлористого бария, гидроокиси алюминия). Щелочный агент подаётся распределённо по длине реактора *7* для формирования оптимального профиля pH-среды сочетания.

Суспензии азопигментов накапливаются в специальных аппаратах-сборниках для проведения последующих операций термообработки и транспортирования на заключительные стадии физико-механической обработки (фильтрования, сушки и размола).

Автоматическая система регулирования переменных состояния реакторных установок диазотирования и азосочетания включает контуры *I—VII*, реализующие найденные при решении задачи стохастической оптимизации оптимальные значения режимных (управляющих) переменных. В контуре *I* поддерживается оптимальное значение расхода солянокислой суспензии амина (датчик ($Д_1$), регулятор ($Р_1$), клапан ($К_1$)) с коррекцией по концентрации азотистой кислоты в третьей зоне реакторной установки диазотирования ($Д_{2(1,2,3)}$, корректирующий регулятор КР1). Оптимальное распределение подачи нитрита натрия в зоны реакторной установки диазотирования обеспечивается системой высокоточных дозирующих насосов. В контурах *II—IV* поддерживается оптимальный профиль температуры в зонах *1*, *2*, *3* диазотирования ($Д_{3(1,2,3)}$, $Р_{2(1,2,3)}$, $К_{2(1,2,3)}$). Соотношение расходов азосоставляющей и диазораствора в питании реакторной установки азосочетания поддерживается в контуре *V* с помощью $Д_4$, $Д_5$, $Р_3$ и $К_3$. Оптимальный профиль pH среды азосочетания реализуется в контурах *VI* и *VII* ($Д_{6(1,2)}$, $Д_{7(2)}$, $Р_{4(1,2)}$, $КР_2$, $К_{4(1,2)}$).

Заключение. Сформулированная выше задача (5)—(8) оптимального проектирования аппаратурно-технологического оформления непрерывного процесса диазотирования в условиях интервальной неопределённости исходных данных и коэффициентов математической модели позволяет научно-обоснованно рассчитывать коэффициенты запаса технического ресурса ХТС, гарантирующие сохранение её работоспособности (гибкости) при любых значениях ξ из области неопределённости Ξ. При этом задача аппаратурно-технологического оформления позволяет осуществить подстройку режимных (управляющих) переменных на этапе функционирования производства, что обеспечивает экономичность физико-химических процессов на различных стадиях производства. В постановке задачи (5)—(8) заложены предпосылки эффективного управления и автоматизации, что позволяет разрабатывать гибкие энерго- и ресурсосберегающие процессы и аппараты, реакторные установки и обеспечивать высокую конкурентоспособность проектируемого производства на мировом рынке.

Библиографические ссылки

1. **Halemane K.P., Grossmann I.E.** Optimal process design under uncertainty // A.I.Ch.E. Journal. 1983. V. 29, No. 3. P. 425—433.

2. **Островский Г.М., Волин Ю.М.** Технические системы в условиях неопределённости: учеб. пособие. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2008. 319 с.

3. **Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Островский Г.М.** Новые подходы к проектированию химико-технологических процессов, аппаратов и систем в условиях интервальной неопределённости. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. 344 с.

4. **Красовский А.А.** Справочник по теории автоматического управления. М.: Наука, 1987. 711 с.

5. **Kokossis A.C., Floudas C.A.** Stability in Optimal Design: Synthesis of Complex Reactor Networks // AIChE Journal. 1994, № 40. P. 849—861.

6. **Mohideen M.J., Perkins J.D., Pistikopoulos E.N.** Optimal Design of Dynamic Systems under Uncertainty // AIChE Journal. 1996, № 42. P. 2252.

7. **Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Пешкова Е.В.** Компьютерное моделирование турбулентных реакторных установок тонкого органического синтеза в условиях неопределённости // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. Научно-теоретический журнал. 2007. Т. 50. Вып. 8. С. 70—75.

Уважаемые читатели!

Редакция предлагает руководителям организаций,
ищущих новые рынки для реализации своей продукции,
услуги по размещению рекламы и объявлений.
Цены за публикацию рекламы умеренные.

УДК 621.317.7.087.6

О.И. Моногаров, А.В. Панова, канд. экон. наук
(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)

olegmngarv@rambler.ru

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА СЕЛЕКЦИИ СИГНАЛОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НА ОСНОВЕ ИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОЛЕМ МГНОВЕННЫХ СКОРОСТЕЙ

Рассмотрена модификация метода селекции сигналов частичных разрядов (ЧР) на основе их представления полем мгновенных скоростей. Модификация заключается в совершенствовании алгоритма выполнения вычислительных процедур, связанных с поиском импульсов ЧР в зашумлённом сигнале. В результате, разброс значений ЧР внутри кластеров сократился в среднем на 15 %, а скорость обработки входных данных увеличилась до 200 %.

Ключевые слова: контроль качества; кабельная изоляция; частичные разряды; селекция частичных разрядов; поле мгновенных скоростей; распределение мгновенных скоростей.

A modification of the method of selection of partial discharge signals (PD) on the basis of their presentation instantaneous velocity field is considered. The modification is to improve the algorithm implementation computing procedures related to PD pulses in the search for a noisy signal. As a result, the spread of PD values within clusters decreased on average by 15 %, and the processing speed of the input data has increased to 200 %.

Keywords: quality control; cable insulation; partial discharges; PD-selection; instantaneous velocity field; the distribution of instantaneous velocity.

Контроль качества выпускаемой электротехнической продукции является одной из приоритетных задач современных промышленных предприятий, так как от этого показателя напрямую зависят конкурентные позиции предприятия на рынке. Не является исключением и производство кабельно-проводниковой продукции. В соответствии с работами [1, 2] при проведении приёмосдаточных испытаний осуществляется:

контроль конструкции и конструктивных размеров;

контроль электрического сопротивления жил кабеля;

контроль электрического сопротивления изоляции;

испытание переменным напряжением;

измерение уровня частичных разрядов;

контроль стойкости изоляции к тепловой деформации.

Наиболее сложной и ответственной частью любого кабеля является изоляция токопроводящих жил, которая в процессе эксплуатации принимает на себя следующие негативные воздействия: механические и тепловые деформации, фотонную и ионную эмиссии, химическую эрозию, в связи с чем к ней предъявляются особенно жёсткие требования.

Контроль качества изготовления кабельной изоляции выполняется измерением её электрических характеристик и уровня частичных разрядов. При этом определение электрических характеристик (сопротивление, удельное объёмное сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, уровень пробивного напряжения) не позволяет локализовать присутствующие дефекты, а в некоторых случаях они могут остаться незамеченными. Для более качественной диагностики изоляции кабелей применяют метод частичных разрядов (ЧР), основанный на измерении уровня ЧР при воздействии на изоляцию повышенным напряжением.

Согласно [3] "частичные разряды — это маленькие электрические искровые разряды, возникающие в газе (например, в воздухе), содержащемся в пустотах, или образующиеся в высокочастотных, неоднородных электрических полях. Если пустоты присутствуют внутри твёрдой или жидкой органической изоляции, то ЧР будут разрушать органический материал и могут послужить причиной повреждения изоляции". Определение уровня ЧР связано с проблемой их селекции в зашумлённом сигнале среди помех схожей физической природы, таких как коронные разряды, электростатические разряды, ЧР от испытательного оборудования и др. В работах [4—6] для решения этой проблемы были разработаны система контроля качества изоляции кабелей методом ЧР и математический метод селекции сигналов ЧР на основе их представления полем мгновенных скоростей.

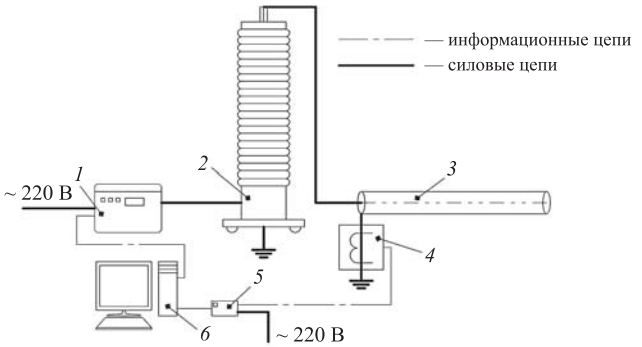

Рис. 1. Функциональная схема системы контроля качества изготовления кабельной изоляции посредством управления частотой следования ЧР:
1 — блок управления испытательным трансформатором; *2* — высоковольтный испытательный трансформатор; *3* — испытуемый кабель; *4* — датчик ЧР; *5* — цифровой осциллограф; *6* — компьютер

Принципиальным отличием разработанной системы от уже существующих является регулирование уровня испытательного напряжения, посредством чего можно изменять частоту следования ЧР, что позволяет снизить такие негативные эффекты, как наложение импульсов друг на друга и инерционность средств измерений.

Функциональная схема системы (рис. 1) состоит из следующих основных элементов: высоковольтного испытательного трансформатора, блока управления, датчика частичных разрядов, компьютера и осциллографа. Испытательный трансформатор и блок управления используются для подачи испытательного напряжения на контролируемый объект (кабель). Датчик ЧР и осциллограф служат для регистрации и снятия осциллограмм сигналов ЧР, которые затем обрабатываются на компьютере с использованием специального программного обеспечения.

На первоначальном этапе работы системы измеряют уровень ЧР на напряжении, установленном нормативными документами ($2U_0$, где U_0 — номинальное напряжение изоляции кабеля) [2], определяют максимальное значение кажущегося ЧР и соответствующий ему уровень воздействующего напряжения, который, как правило, является ниже амплитудного значения испытательного напряжения. Затем проводят повторное измерение уже на сниженном испытательном напряжении. В результате получаем осциллограмму с зарегистрированным максимальным ЧР, присутствовавшем при первичном измерении, так как уровень напряжения, на котором он возникает, сохраняется. Таким образом, информация о максимальном ЧР не теряется, что является обязательным условием при проведении приёмосдаточных испытаний высоковольтных кабелей, при этом изменяется информация о снижающейся частоте следования ЧР. Её снижение улучшает селекцию ЧР и не искажает диагностическую картину, вследствие чего частота следования ЧР при приёмосдаточных испытаниях не нормируется, достаточным считается знание о максимальном значении кажущегося ЧР.

В рамках этой системы также разработан и реализован математический метод селекции сигналов ЧР на основе их представления полем мгновенных скоростей, который заключается в следующем [4]:

разложение нестационарного сигнала в каждой точке в ряд Маклорена, выражаемый формулой с требуемой точностью, которая характеризует максимальный порядок производных, используемых для разложения сигнала в ряд:

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f^{(k)}(a)}{k!}(x-a)^k + R_k(x),$$

где k — порядок производной функции $f(x)$; a — некоторая точка, принадлежащая области определения функции $f(x)$, на которой последняя бесконечно дифференцируема; $R_k(x)$ — остаточный член, который при $x \to a$ стремится к нулю;

расчёт мгновенных скоростей, являющихся коэффициентами степенных функций в ряде Маклорена;

построение распределения изменения во времени мгновенных скоростей;

анализ построенных в п. 3 распределений в соответствии с поставленной задачей.

Дальнейшие исследования показали, что данный метод не всегда может адекватно распознавать в зашумлённом сигнале ЧР. На рис. 2 изображена осциллограмма ЧР в кабеле 35 кВ ПвВ 3х95/16-35.

Частичный разряд, изображённый на рис. 2, имеет характерную форму затухающей осциллирующей функции с крутым передним фронтом, который для кабелей, как правило, составляет несколько десятков наносекунд. Форма кривой ЧР неидеальна, в ней присутствует множество локальных неровностей и точек перегиба, образовавшихся в результате сложности физического процесса пробоя газового включения в изоляции, наложения большого количества более мелких импульсов и последующей фильтрации сигнала. При более тщательном рассмотрении оказалось, что

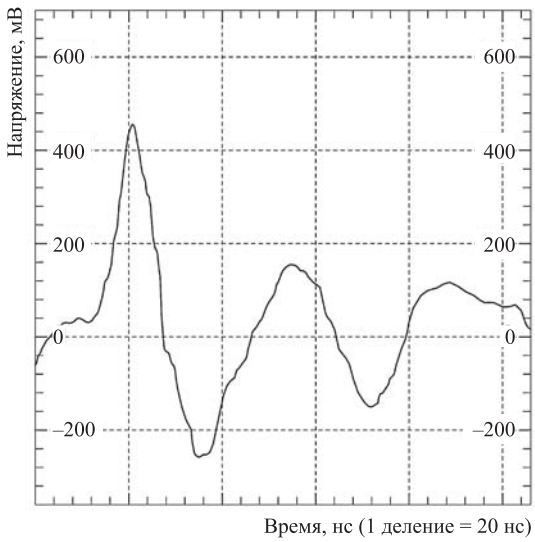

Рис. 2. Осциллограмма частичного разряда, зарегистрированного в кабеле 35 кВ ПвВ 3х95/16-35

эти неровности в форме сигнала могут быть источниками резких скачков второй мгновенной скорости (или второй производной значения сигнала по времени в математических терминах), которые являются ложными сигналами о присутствии ЧР. На рис. 3 представлено распределение второй мгновенной скорости ЧР во времени.

На рис. 3 показано распределение абсолютного значения второй мгновенной скорости во времени, пунктирными линиями показан доверительный интервал значений, в котором должны находится ЧР. Границы интервала определяются экспериментально для каждого кабеля инжекцией в него тестовых импульсов и анализом их зарегистрированных осциллограмм, что продиктовано различной степенью затухания сигналов в разных кабелях. Из рис. 3 видно, что в обозначенный интервал попадает множество точек, из чего можно сделать ошибочный вывод о том, что это также частичные разряды. Дальнейшая проверка уже по значениям первой мгновенной скорости и по длительности импульса, скорее всего, не позволит этим ложным значениям исказить диагностическую картину, однако есть вероятность, что некоторые из них всё же могут быть приняты за ЧР, что приведёт к дополнительным вычислительным процедурам. Поэтому было предложено определять вторую мгновенную скорость не во всех точках сигнала ЧР, а только в точках экстремума. Та же самая осциллограмма, изображённая на рис. 2, обработанная по новой методике, представлена на рис. 4, для удобства значения показаны звёздочками с опущенными перпендикулярами к оси абсцисс.

Из рис. 4 видно, что количество точек, исследуемых на присутствие ЧР уменьшилось, при этом ни одна из ложных точек не оказалась в зоне доверительного интервала значений ЧР и для дальнейшего анализа осталось только одно значение, соответствующее вершине первого пика ЧР. Конечно, нельзя исключать попадание ложных точек в зону доверительного интервала даже после такой обработки, но при последующих проверках по другим параметрам отсеять их будет уже гораздо проще и быстрее, чем тот огромный массив значений, показанный на рис. 3.

Таким образом, модификация существующего метода селекции сигналов ЧР на основе их представления полем мгновенных скоростей позволяет существенно увеличить достоверность проводимых измерений и скорость обработки поступающей информации, что достигается включением дополнительной

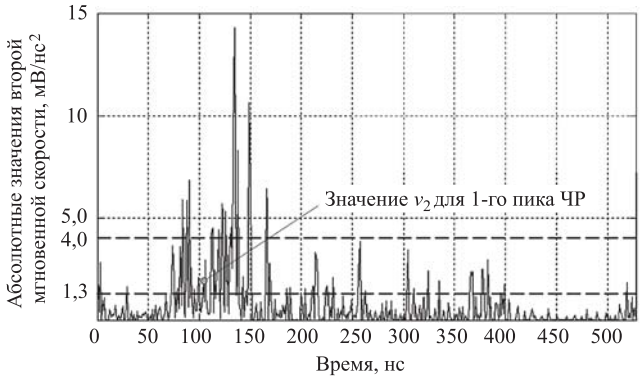

Рис. 3. Распределения абсолютного значения второй мгновенной скорости v_2 по времени с указанием доверительного интервала (пунктирные линии) значений ЧР

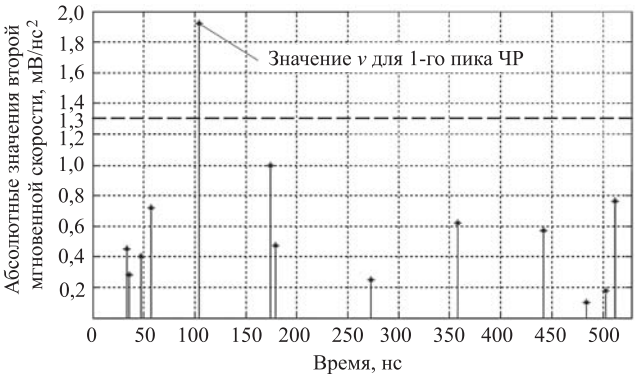

Рис. 4. Распределение абсолютного значения второй мгновенной скорости v_2 по времени, рассчитанного в точках экстремума функции сигнала ЧР, с указанием нижней границы доверительного интервала значений ЧР

вычислительной процедуры (выделение точек экстремума в распределении значений второй мгновенной скорости) и позволяет значительно сузить массив обрабатываемых данных, исключить заведомо ложные значения. По результатам исследований ширина разброса кажущихся значений частичных разрядов внутри выделяемых кластеров в среднем дополнительно уменьшилась на 15 %, а скорость обработки входных данных увеличилась до 200 %. Улучшение указанных показателей свидетельствует об эффективности и целесообразности предложенных программно-алгоритмических решений.

Библиографические ссылки

1. **Холодный С.Д.** Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике: учеб. пособие / С.Д. Холодный, С.В. Серебрянников, М.А. Боев. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 232 с.

2. **ГОСТ Р** 55025—2012 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2012. 65 с.

3. **Stone G.C.** Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment, FIEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. 12(5), October 2005. P. 891—904.

4. **Моногаров О.И.** Разработка математического метода селекции сигналов частичных разрядов на основе их представления полем мгновенных скоростей // Контроль. Диагностика. 2014. № 10. С. 44—51.

5. **Моногаров О.И.** Разработка промышленной системы контроля качества изоляции кабелей методом частичных разрядов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015. № 2. С. 74—79.

6. **Шахнин В.А., Моногаров О.И.** Способ диагностики высоковольтного оборудования // Патент России № 2434236. 2011. Бюл. № 32.

УДК 621.31:330.131:628.9

С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф., **А.С. Микаева,** канд. экон. наук
(Московский технологический университет),
А.А. Ашрятов, канд. техн. наук, **Н.Н. Потапкин**
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск)

mikaeva@npo.lit.ru

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В УЧЕБНЫХ АУДИТОРИЯХ

Рассмотрены пути повышения энергоэффективности образовательных учреждений за счёт экономии электроэнергии при освещении учебных аудиторий. Приведены примеры вариантов усовершенствования осветительных установок при помощи моделирования в программе DIALux. Показано, что выбор энергоэффективных световых приборов позволит сэкономить до 35 % электроэнергии.

Ключевые слова: энергоэффективность; осветительная установка; светильник; люминесцентная лампа.

Ways to improve the energy efficiency of educational institutions at the expense of energy-saving are considered when classrooms are lighted. Examples of variants of improvement of lighting systems using the simulation DIALux program are presented. It is shown that the choice of energy-efficient lighting fixtures will save up to 35 % of electricity.

Keywords: *energy efficiency; lighting system; lamp; luminescent lamp.*

Введение. Приведены результаты [1] исследования энергопотребления большой группы образовательных учреждений Приволжского федерального округа. Затраты на энергоносители ежегодно увеличиваются на 15—20 %. Основная доля расходов приходится на тепловую и электрическую энергию. Рассмотрим основные мероприятия по снижению электрической энергии (ЭЭ) на освещение учебных аудиторий.

По разным оценкам, количество образовательных учреждений составляет около 50 тысяч, среди них как средние специальные, так и высшие учебные заведения. Большинство зданий имеют типовые помещения, где используется однотипное оборудование для освещения, как правило, светильники серии ЛПО (люминесцентный, накладной, предназначенный для общественных помещений). Данные помещения проектировали и строили много лет

назад и на сегодняшний день использование установленного в нём осветительного оборудования неэффективно, а в ряде случаев и запрещено. Поэтому предложены основные мероприятия по снижению энергозатрат на системы освещения в учебных аудиториях.

Проектирование энергоэффективного освещения. В первую очередь, при правильном подходе к проектированию освещения определяют количественные и качественные параметры осветительной установки (ОУ). Завышение либо занижение параметров ОУ приводит к неблагоприятным последствиям, снижению работоспособности, утомляемости, раздражительности, потере остроты зрения [2]. Согласно действующим нормативным документам [3, 4] необходимо обеспечить: освещённость на рабочей поверхности 400 лк; освещённость в середине информационной доски 500 лк; объединённый показатель дискомфорта UGR не более 21; коэффициент пульсации освещённости не более 10 %, в кабинетах для работы с компьютерами не более 5 %.

Для освещения рабочих мест учебных аудиторий используют систему общего освещения с размещением светильников параллельно световым проёмам и местного освещения для подсветки информационной доски.

При проектировании электрического освещения особое внимание уделяют выбору эффективных световых приборов (СП), обладающих необходимым светораспределением и конструктивным исполнением; применению высокоэффективных источников света (ИС) (люминесцентные лампы (ЛЛ) Т5); применению эффективной пускорегулирующей аппаратуры (ПРА); повышению оптических характеристик ОУ; системам, сокращающим использование искусственного освещения.

Кроме того, при реконструкции ОУ необходимо учитывать, что структура её стоимостных показателей складывается из [5] капитальных затрат на осветительное оборудование (10...15 %); затрат на монтаж и обслуживание осветительных приборов (ОП 15 %); стоимости ЭЭ (70...75 %).

Таким образом, очевидно, что большое значение имеют энергетические и светотехнические параметры светильников, а не их стоимость.

Выбор осветительных приборов. Расход ЭЭ может быть снижен благодаря грамотному выбору ОП с необходимым светораспределением, конструктивным исполнением и оптимальной высотой подвеса [6]. Для помещений образовательных учреждений, как правило, применяют люминесцентные светильники серии ЛПО (люминесцентный, накладной с рассеивателем). При выборе светильников необходимо обратить внимание на оптический КПД светильника, он должен составлять примерно 70 %.

Оптический КПД светильника в значительной степени зависит от рассеивателя, применяемого в светильнике. В настоящее время при производстве рассеивателей для светильников рассматриваемого типа применяют полиметилметакрилат, поликарбонат и светостабилизированный полистирол. В процессе эксплуатации светильников у рассеивателей снижается коэффициент пропускания света в результате воздействия коротковолнового видимого и ультрафиолетового излучения, присутствующего в спектре ламп и в спектре естественного освещения. Наименьшее снижение коэффициента пропускания света имеет полиметилметакрилат, а наибольшее — полистирол, который за короткое время теряет свою первоначальную прозрачность и желтеет.

Таким образом, если для модернизации ОУ выбран СП, изготовленный из некачественных материалов (как правило, он имеет низкую стоимость), то это приводит к преждевременному снижению световых показателей светильника и, соответственно, к снижению уровней освещённостей на рабочих поверхностях ОУ, что впоследствии вызовет необходимость в преждевременной замене ОП.

Выбор источников света. Согласно п 7.18 Свода Правил 52.13330.2011 [3] для учреждений дошкольного, школьного и профессионально-технического образования следует применять люминесцентные (в том числе компактные) и галогенные лампы накаливания.

В настоящее время для освещения помещений образовательных учреждений наиболее широко применяются ЛЛ мощностью 36 Вт. Световая отдача ламп типа Т8 36 Вт, по данным каталогов Philips и Osram, составляет 93 лм/Вт, а аналогичная ЛЛ производства ГУП РМ "Лисма" имеет 72 лм/Вт.

В то же время наиболее эффективными являются ЛЛ нового поколения с диаметром трубки 16 мм (лампы Т5), для питания которых применяются только электронные высокочастотные ПРА (ЭПРА). Аналогом ЛЛ в трубке Т8 мощностью 36 Вт является ЛЛ с диаметром колбы 16 мм (Т5) мощностью 28 Вт. Световые потоки данных ламп при температуре окружающей среды 35 °С. Также отметим преимущества ЛЛ в трубке Т5: срок службы 24 000 ч;

Таблица 1

Эффективность балластов

Лампа (код ILCOS)	Мощность лампы, Вт		Эффективность балластов (Plamp/Pinput, %)						
	ЭмПРА	ЭПРА	A1*	A2	A3	B1	B2	C	D
FD 18-E-G13-26	18	16	—	<19	<21	<24	<26	<28	>28
FD 36-E-G13-26	36	32	—	<36	<38	<41	<43	<45	>45
FD 58-E-G13-26	58	50	—	<55	<59	<64	<67	<70	>70

* Диммируемые ЭПРА

Таблица 2

Параметры светильника ЛПО 2 × 36 с различными ПРА

Тип ПРА	$P_{св}$, Вт	$I_{св}$, А	Коэффициент мощности	$Ф_{св}$, лм	$Н_{св}$, лм/Вт	$К_{пи}$, %
1И40	89,3	0,87	0,47	3076,7	33,52	48,2
Philips EEI = A3	60,28	0,279	0,984	2741,2	45,47	14,2
Tridonic EEI = A2	71,4	0,332	0,978	3014,3	44,45	3,4

Примечание: $P_{св}$ — мощность; $I_{св}$ — ток; $Ф_{св}$ — световой поток; $Н_{св}$ — световая отдача; $К_{пи}$ — коэффициент питания.

спад светового потока к концу срока службы составляет не более 10 %; резко сниженное содержание ртути в этих лампах (с 30 до 3 мг); высокий индекс цветопередачи. Световая отдача ЛЛ Т5 составляет 105 лм/Вт [7].

Выбор пускорегулирующей аппаратуры. Пускорегулирующей аппарат — это светотехническое изделие, с помощью которого осуществляется питание ИС от электрической сети, обеспечивающее необходимые пусковые и рабочие режимы ИС. При выборе ПРА следует знать, что от его качества зависят параметры ИС, в том числе и энергетические.

Для облегчения выбора ПРА для ЛЛ с точки зрения энергоэкономичности Комитет Европейских ассоциаций ОП и ПРА (CELMA) директивой ЕС № 2000/55/EG предложил классифицировать ПРА по индексу энергоэффективности [8]. Индекс энергоэффективности EEI — Energy Efficiency Index — наносится на ПРА производителем (входящим в CELMA). Для потребителя это означает, что существует семь классов в зависимости от потерь ЭЭ (табл. 1). Первые три марки — A1 (наиболее эффективный); A2 и A3 — это ЭПРА, а остальные четыре марки — B1, B2, C и D — это электромагнитные ПРА (ЭмПРА). По классификации CELMA, светильник с двумя ЛЛ мощностью 36 Вт, укомплектованный ЭмПРА класса D, будет потреблять свыше 90 Вт, а аналогичный светильник с ЭПРА EEI = A3 — около 76 Вт, что соответствует экономии 15,5 % ЭЭ. С ЭПРА A2 — 72 Вт, что на 20 % экономичнее относительно варианта с ЭмПРА.

В табл. 2 приведены результаты исследования светильника ЛПО 2 × 36 с одними и теми же ЛЛ, но с различными ПРА. На рис. 1 представлены фактические значения потребляемой мощности из сети в зависимости от питающего напряжения. Анализируя данные табл. 2 и рис. 1, можно утверждать, что ЭПРА EEI = A2 имеют лучшие параметры как энергетические, так и световые. Также стоит отметить, что параметры ЭПРА EEI = A2 не зависят от питающего напряжения, что благоприятно для ЛЛ. Так, по данным производителей ЛЛ, срок их службы при работе с ЭПРА энергоэффективности составляет 17 000 ч.

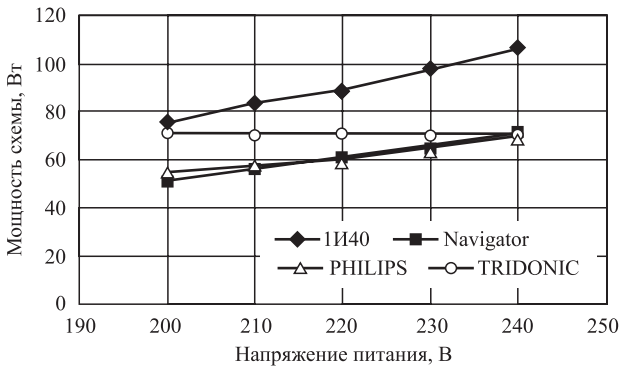

Рис. 1. Результаты исследований электрических параметров светильника

Применение систем, сокращающих использование искусственного освещения. Известно, что лозунг «Уходя, гасите свет» не всегда и не везде выполняется. Поэтому максимального эффекта от энергосберегающих мероприятий при модернизации ОУ можно достичь, используя автоматизированные системы управления освещением (АСУО).

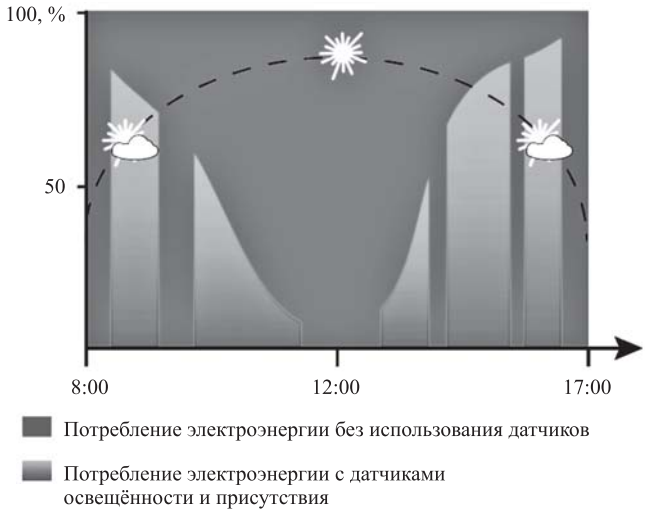

Рис. 2. Потенциал экономии электроэнергии на автоматизированных системах управления освещением

АСУО позволяют сокращать время работы осветительных приборов и максимально использовать естественный свет, поддерживая постоянные уровни освещённости на рабочей поверхности, снижая тем самым искусственную составляющую света. На рис. 2 [9] показан потенциал энергосбережения при внедрении АСУО.

В настоящее время на рынке систем управления освещением предлагают совмещённые датчики, которые автоматически включают/выключают освещение в помещении в зависимости от интенсивности естественного света и/или присутствия людей. По разным оценкам, экономия от внедрения датчиков может достичь 50 % экономии ЭЭ в зависимости от расположения световых проёмов и интенсивности использования помещений. Поэтому в учебных классах, в спортивных и актовых залах учебных заведений и детских дошкольных учреждений следует предусматривать управление работой светильников рядами, параллельными световым проёмам в зависимости от изменения естественного освещения.

Также отметим, что необходимо неукоснительно соблюдать регламент по регулярной чистке стёкол световых проёмов и не реже двух раз в год осуществлять чистку СП [3]. Выполнение данного регламента, по данным работы [8], позволяет экономить до 25 % потребляемой ЭЭ.

Технико-экономическое сравнение. Для оценки влияния изложенных рекомендаций на технико-экономические показатели ОУ провели сравнение вариантов ОУ учебной аудитории.

Было построено четыре проекта с различными светильниками. Параметры помещения, м: длина 9, ширина 6, высота 3,2. Основное требование — замена устаревших светильников на новые без реконструкции системы подвеса. Все проекты рассчитаны с использованием светильников одного производителя.

Светотехнический расчёт произведён в программе DIALux. Основные параметры предложенных проектов приведены в табл. 3. На рис. 3 показан проект учебной аудитории.

Из табл. 3 следует, что можно достичь 35 % экономии ЭЭ относительно первого проекта, моделирующего подавляющее большинство существующих ОУ со светильниками ЛПО46 2 × 36-604 с ЭмПРА.

Для определения периода окупаемости выбранных вариантов ОУ произведём расчёт:

$$\text{Годовые затраты на ЭЭ} = \Sigma PTq,$$

где ΣP — суммарная потребляемая мощность, кВт; T — количество часов использования осветительной нагрузки в год, ч; q — тариф на ЭЭ, руб./кВт·ч (4,5 руб.).

Рис. 3. Модернизация осветительных установок в программе DIALux

Таблица 3

Технико-экономическое сравнение проектов

Проекты	Число, шт.	$E_{ср}$	P, Вт	ΣP, кВт	Экономия ЭЭ, %
ЛПО46-2х36-604 с ЭмПРА	10	416	88	0,88	0
ЛПО46-2х36-614 с ЭПРА	10	488	72	0,72	18
ЛПО46-2х28-614	10	435	60	0,6	32
ЛПО46-2х35-614	8	451	72	0,576	35

Согласно ФЗ № 273 "Об образовании в Российской Федерации" продолжительность учебного времени колеблется в пределах 33—45 недель. Допустим, что длительность учебного года составляет 40 пятидневных недель, по 6 часов использования осветительной нагрузки. Суммарное время использования осветительной нагрузки в год для учебных аудиторий в этом случае составляет в среднем 1200 ч. Результаты расчётов приведены в табл. 4.

Наиболее оптимальным является вариант проекта 4 со светильниками ЛПО46 2 × 35 с ЛЛ типа Т5 мощностью 35 Вт. Экономия ЭЭ в данном случае составит 35 % по сравнению с аналогичными светильниками с лампами мощностью 36 Вт и ЭмПРА. Расчётный период окупаемости составил чуть более двух лет, который определён на рис. 4 по пересечению прямых, характеризующих полные затраты на ОУ со светильниками ЛПО46-2 × 36-604 с ЭмПРА (проект 1) и ЛПО46-2 × 35-614 (проект 4).

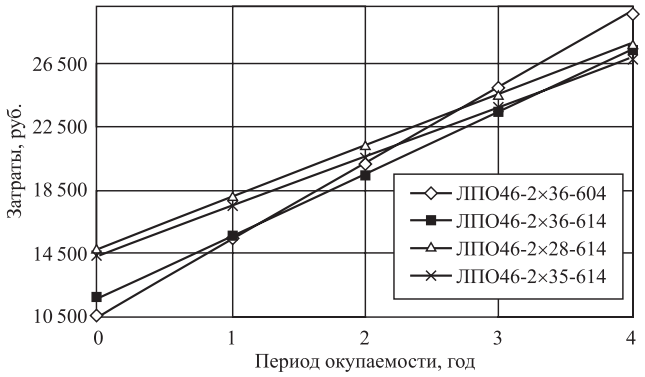

Рис. 4. Расчётный период окупаемости осветительных установок с различными светильниками

Таблица 4

Сравнение основных стоимостных параметров ОУ

Проекты	Цена СП, руб.	Число, шт.	Капитальные затраты на оборудование, руб.	Годовые затраты на ЭЭ, руб.
ЛПО46-2 × 36-604 с ЭмПРА	1072	10	10 720	4752
ЛПО46-2 × 36-614 с ЭПРА	1180	10	11 800	3888
ЛПО46-2 × 28-614	1481	10	14 810	3240
ЛПО46-2 × 35-614	1802	8	14 416	3110

Однако фактический период окупаемости составит меньший срок, так как в данном расчёте не учитывалось сокращение эксплуатационных расходов.

В настоящее время есть возможность внедрения современных светильников с высокоэффективными ЛЛ со световой отдачей выше 100 лм/Вт для освещения учебных аудиторий с периодом окупаемости 2 года.

Таким образом, внедряя современные, качественные осветительные приборы тем самым косвенно инвестируем в образование, так как при правильном освещении повышается работоспособность и умственная активность учащихся, что является залогом их будущего. Кроме этого, за счёт экономии ЭЭ происходит сокращение выбросов CO_2 при её выработке и соответственно улучшается экологическая обстановка окружающей среды [10].

Библиографисике ссылки

1. **Вагин Г.Я.** Исследование эффективности использования энергоносителей в образовательных учреждениях // Энергобезопасность и энергосбережение. 2010. № 6. С. 21—25.

2. **Кнорринг Г.М.** Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г.М. Кнорринг, И.М. Фадин, В.Н. Сидоров. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отдние, 1992. 448 с.

3. **СП 52.13330.2011** Свод правил. Естественное и искусственное освещение. Введ. 20. 05. 2011.

4. **СанПин 2.4.2.2821-10** «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям и организации обучения в общеобразовательных организациях». Введ. 29. 12. 2010 с изменениями от 25. 12. 2013.

5. **Айзенберг Ю.Б., Рожкова Н.В.** Энергосбережение в светотехнических установках // Новости светотехники. Вып.16 (4). 1999. 24 с.

6. **Кунгс Я.А., Фаермарк М.А.** Экономия электрической энергии в осветительных установках. М.: Энергоатомиздат. 1984. 161 с.

7. **Рыбалов С.Л.** Новое поколение энергоэффективных тонких люминесцентных ламп типа Т5. [Электронный ресурс] http://www.energosovet.ru/stat778.html (дата обращения: 21.01.2016).

8. **Айзенберг Ю.Б**. Справочная книга по светотехнике. М.: ЗНАК. 2006. 972 с.

9. **Датчики** освещённости Хелвар. [Электронный ресурс]. http://www.helvar.com/sites/default/files/Sensors_brochure_web_RU.pdf (дата обращения: 14.04.2015).

10. **Уханов Д.М., Зволинский В.П., Половых С.О., Юрченко С.И., Дарда И.В.** Возможности и перспективы повышения эффективности теплоэлектроэнергетики в жилищно-коммунальном хозяйстве // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2; URL: www.science-education.ru/116-12981 (дата обращения: 22. 03. 2015).

УДК 621.38

Б.И. Шахтарин, д-р техн. наук, проф, **К.А. Балахонов, А.А. Федотов**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
К.С. Калашников, канд. техн. наук
(Воронежский государственный университет)

Kalashks@gmail.com

АЛГОРИТМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ OFDM-СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОЙ ПОДВОДНОЙ СВЯЗИ

На основе метода максимального правдоподобия предложен автокорреляционный алгоритм совместной оценки доплеровского расширения и задержки OFDM-сигнала в гидроакустическом канале, имеющий малую вычислительную сложность. При помощи имитационного моделирования получены оценки его точности. Исследовано влияние количества несущих частот на среднеквадратичное отклонение оценки доплеровского расширения.

Ключевые слова: системы подводной связи; гидроакустический канал; синхронизация; доплеровской эффект; мультиплексирование с ортогональным частотным разделением; OFDM.

The autocorrelation algorithm collaborative estimation of Doppler delay and extension OFDM-signal in hydro acoustic channel based on the maximum likelihood method, having a small computational complexity is proposed. With the help of simulation evaluate its accuracy are obtained. Influence of the number of carrier frequencies on rms deviation of a Doppler expansion evaluation was investigated.

Keywords: underwater communications systems; hydro acoustic channel; synchronization; Doppler Effect; multiplexing with orthogonal frequency division; OFDM.

Введение. Беспроводная подводная связь является стремительно развивающимся направлением научной и инженерной деятельности: активно применяется при разработке подводных автоматических аппаратов (робототехнических комплексов), донных систем сбора данных (сенсорных сетей) и т.д. Большое внимание при этом уделяется использованию техники ортогонального частотного мультиплексирования (orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)), позволяющей эффективно бороться с межсимвольной интерференцией (МСИ), вызванной многократными переотражениями сигнала.

Схемы синхронизации передатчика и приёмника являются важной частью систем беспроводной связи, от эффективности их работы критически зависит качество передачи данных. Сложность синхронизации в гидроакустическом канале обусловлена невозможностью пренебрежения масштабированием сигнала, вызванным доплеровским эффектом. Вопросы оценки этого масштабирования рассматриваются в работах [1—3]. Основным способом такой оценки, выполняемой, как правило, совместно с оценкой задержки сигнала, является двумерный поиск известной обучающей последовательности в принимаемом сигнале [1]. Недостатком алгоритмов, использующих такой подход, является их высокая вычислительная сложность. Уменьшить сложность схем синхронизации можно применением максимально правдоподобных автокорреляционных алгоритмов, выполняющих поиск повторяющихся отрезков сигнала [4, 5]. Один из таких алгоритмов рассматривается ниже.

Модель принимаемого сигнала. Сруктурная схема системы подводной связи, использующей OFDM, представлена на рис. 1. Поток комплексных амплитуд передаваемых символов $\dot{x}$ последовательно-параллельным преобразованием разбивается на блоки длиной N каждый. Обратным дискретным преобразованием Фурье (ОДПФ) размерностью $N_ф > N$ выполняется их модуляция на множество ортогональных частот. Для защиты от МСИ вводится защитный интервал (ЗИ), являющийся циклическим префиксом следующего за ним OFDM-блока.

Ключевым отличием схемы на рис. 1 от типовой схемы системы радиосвязи является то, что перенос сигнала на несущую частоту выполняется цифровыми методами в квадратурном модуляторе интерполяцией и

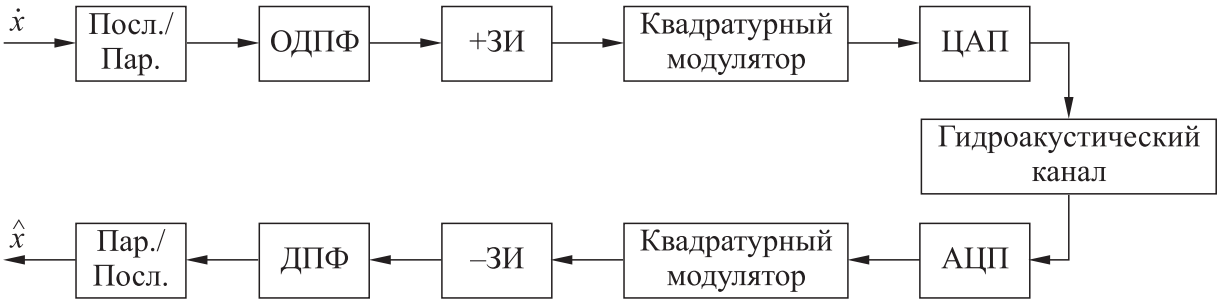

Рис. 1. Структурная схема системы акустической связи с OFDM

умножением на комплексную экспоненту. После цифроаналогового преобразования (ЦАП), прохождения гидроакустического канала и аналого-цифрового преобразования (АЦП) в приёмнике демодуляция сигнала выполняется в обратном порядке: квадратурным демодулятором выделяется комплексная огибающая сигнала, защитный интервал отбрасывается, и при помощи дискретного преобразования Фурье (ДПФ) формируются оценки комплексных амплитуд переданных символов $\hat{x}$, которые после параллельно-последовательного преобразования выдаются в схему принятия решений.

Математически передаваемый сигнал может быть записан как последовательность OFDM-символов длительностью T, представляемых суммой N гармоник (поднесущих). При этом каждый символ предваряется ЗИ длительностью $T_з$. Комплексные амплитуды m-го символа $\dot{s}_t(m, t)$ и сигнала в целом $\dot{s}_t(t)$ можно записать в виде

$$\dot{s}_t(m,t) = \sum_{l=1}^{N} \dot{x}_t(m,l)\exp(j2\pi f_l t); \quad t \in [-T_з; T);$$

$$\dot{s}_t(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \dot{s}_t\left(m, t - mT_s\right),$$

где $x_t(m, l)$ — комплексная амплитуда l-й гармоники в m-м символе; f_l — её частота; $T_s = T + T_з$ — длительность OFDM-символа с защитным интервалом.

Сигнал на несущей частоте f_0 определяется выражением

$$s_t(t) = \mathrm{Re}\{\dot{s}_t(t)\exp(j2\pi f_0 t)\}.$$

Одной из основных особенностей систем подводной связи является их широкополосность, вызванная критическим недостатком имеющейся полосы частот. Это приводит к тому, что моделирование доплеровского эффекта частотным сдвигом, как в системах радиосвязи, оказывается недостаточным, и требуется учёт масштабирования сигнала во времени. Принимаемый сигнал в этом случае может быть записан в виде

$$s_r(t) = s_t(t - \tau(t)) =$$
$$= \mathrm{Re}\{\dot{s}_t(t - \tau(t))\exp(j2\pi f_0(t - \tau(t)))\},$$

где $\tau(t)$ — задержка распространения сигнала, изменяющаяся с изменением расстояния между передатчиком и приёмником.

На приёмной стороне сигнал дискретизируется на несущей частоте. Имеющееся рассогласование между истинным и номинальным значением частоты дискретизации приводит к масштабированию сигнала, что эквивалентно доплеровскому эффекту. Поэтому далее рассогласование по частоте дискретизации не рассматривается.

Комплексная амплитуда принятого сигнала

$$\dot{s}_r(t) = \dot{s}_t(t - \tau(t))\exp(-j2\pi f_0 \tau(t)),$$

причём она известна в моменты времени $t = iT_д$, где $T_д$ — период дискретизации комплексной огибающей; i — целое.

Считая, что скорость сближения передатчика и приёмника v постоянна, задержка изменяется линейно со временем, получим

$$\tau(t) = \frac{v}{c}t + b;$$

$$s_r(t) = s_t\left(t - \frac{v}{c}t - b\right) = s_t\left(t/a - b\right),$$

где b — задержка распространения при $t = 0$; c — скорость звука в воде; $a = (1 - v/c)^{-1}$ — доплеровское расширение.

В этом случае комплексная амплитуда принятого сигнала

$$\dot{s}_r(iT_д) = \dot{s}_t(iT_д/a - b)\exp(-j2\pi(1 - a^{-1})f_0 iT_д + \varphi_0),$$
$$\varphi_0 = 2\pi f_0 b.$$

Алгоритм грубой синхронизации. За основу предлагаемого алгоритма грубой синхронизации взят автокорреляционный алгоритм, предложенный в работе [4] и широко применяемый в OFDM-системах. Алгоритм основан на использовании обучающих последовательностей в виде повторяющихся отрезков сигнала, и в рассматриваемом случае использует обучающую последовательность Муса [5], представляющую собой OFDM-символ, состоящий из двух одинаковых частей длительностью T.

Рассмотрим отрезок принятого сигнала $\dot{s}_r(t)$ длительностью $3T$. Расположение обучающей последовательности на этом отрезке показано на рис. 2. Запишем формулу для функции правдоподобия — плотности распределения вероятности этих отсчётов при заданных значениях a и b. При этом сделаем следующие предположения: сигнал распределён по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией σ_s^2; корреляция между отсчётами сигнала обусловлена только повтором отрезков сигнала.

Обозначим S_1 и S_2 отрезки времени, соответствующие двум половинам обучающей последовательности, отрезки $[b;\ b + aT)$ и $[b + aT;\ b + 2aT)$ соответственно, так как из-за доплеровского эффекта символы принимаемого сигнала удлиняются в a раз. Тогда функцию правдоподобия относительно величин a и b можно записать в в следующем виде:

$$\Lambda(a,b) = f\left(\mathbf{s}_{\bar{2}}\middle|a,b\right) f\left(\mathbf{s}_2\middle|\mathbf{s}_{\bar{2}},a,b\right),$$

где $\mathbf{s}_2$ — вектор отсчётов сигнала, находящихся внутри отрезка S_2; $\mathbf{s}_{\bar{2}}$ — вектор всех остальных отсчётов рассматриваемого временного интервала; $f(\cdot)$ — функция плотности распределения вероятности (ПРВ).

Считая, что дисперсия шума равна σ_n^2, а отсчёты $s_r(iT_д)$, $iT_д \notin S_2$ некоррелированы, запишем их ПРВ в виде

$$f\left(s_r\left(iT_д\right)\right) = \frac{1}{\pi\left(\sigma_s^2+\sigma_n^2\right)}\exp\left(\frac{-\left|s_r\left(iT_д\right)\right|^2}{\left(\sigma_s^2+\sigma_n^2\right)}\right),\quad i \notin S_2.$$

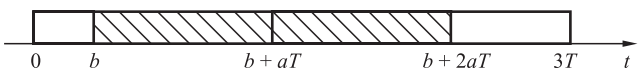

Рис. 2. Расположение обучающей последовательности на наблюдаемом отрезке времени

Для отсчётов $s_r(iT_д)$, $iT_д \in S_2$ можно записать условную ПРВ

$$f\left(s_r\left(iT_д\right)\middle|s_r\left(iT_д - aT\right)\right) = \\ = \frac{1}{\pi\sigma_n^2}\exp\left(\frac{-\left|\begin{array}{l}s_r\left(iT_д\right) - \rho s_r\left(iT_д - aT\right)\times\\ \times\exp\left(-j2\pi(a-1)f_0T\right)\end{array}\right|^2}{\sigma_n^2}\right),$$

$$i \in S_2,$$

где

$$\rho = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2+\sigma_n^2};$$

$$E\left[s_r\left(iT_д\right)s_r^*\left(iT_д - aT\right)\right] = \rho\exp\left(-j2\pi\left(1-a^{-1}\right)f_0aT\right).$$

Так как полоса исходного сигнала $s_r(t)$ не превышала $1/T_д$, будем считать, что значения отсчётов $s_r(iT_д - aT)$ при $iT_д \in S_2$ однозначно выражаются через отсчёты $s_r(iT_д)$, $iT_д \notin S_2$ при помощи интерполирующей функции $I\left(t,\mathbf{s}_{\bar{2}}\right)$:

$$s_r\left(iT_д - aT\right) = I\left(iT_д - aT,\mathbf{s}_{\bar{2}}\right).$$

Тогда

$$f\left(s_r\left(iT_д\right)\middle|\mathbf{s}_{\bar{2}}\right) = \\ = f\left(s_r\left(iT_д\right)\middle|s_r\left(iT_д - aT\right)\right), iT_д \in S_2,$$

а функция правдоподобия

$$\Lambda\left(a,b\right) = \\ = \prod_{iT_д\notin S_2} f\left(s_r\left(iT_д\right)\right)\prod_{iT_д\in S_2} f\left(s_r\left(iT_д\right)\middle|s_r\left(iT_д - aT\right)\right).$$

Прологарифмировав её и отбросив члены, не зависящие от наблюдаемых отсчётов, получим

$$L(a,b) = \sum_{i\notin S_2}\frac{-\left|s_r\left(iT_д\right)\right|^2}{\sigma_s^2+\sigma_n^2} + \\ + \sum_{i\in S_2}\frac{-\left|s_r\left(iT_д\right) - \rho s_r\left(iT_д - aT\right)\exp\left(-j2\pi(a-1)f_0T\right)\right|^2}{\left(1-\rho^2\right)\left(\sigma_s^2+\sigma_n^2\right)} = \\ = \sum_i\frac{-\left|s_r\left(iT_д\right)\right|^2}{\sigma_s^2+\sigma_n^2} + \sum_{i\in S_2}\frac{-\rho^2\left|s_r\left(iT_д\right)\right|^2 - \rho^2\left|s_r\left(iT_д - aT\right)\right|^2}{\left(1-\rho^2\right)\left(\sigma_s^2+\sigma_n^2\right)} + \\ + \sum_{i\in S_2}\frac{2\mathrm{Re}\left[\rho s_r\left(iT_д\right)s_r^*\left(iT_д - aT\right)\exp\left(j2\pi(a-1)f_0T\right)\right]}{\left(1-\rho^2\right)\left(\sigma_s^2+\sigma_n^2\right)}.$$

Вводя обозначения

$$R(a,b)=\sum_{iT_д\in S_2}\left[s_r\left(iT_д\right)s_r^*\left(iT_д-aT\right)\right];$$

$$E(a,b)=\sum_{iT_д\in S_2}\left[\left(\left|s_r\left(iT_д\right)\right|^2+\left|s_r\left(iT_д-aT\right)\right|^2\right)\right];$$

$$C=\frac{2\rho}{\left(1-\rho^2\right)\left(\sigma_s^2+\sigma_n^2\right)}$$

и опуская член $\sum_i\left|s_r\left(iT_д\right)\right|^2/\left(\sigma_s^2+\sigma_n^2\right)$, не зависящий от оцениваемых величин, получим

$$L(a,b)=C\sum_{iT_д\in S_2}\begin{bmatrix}-\frac{\rho}{2}E(a,b)+\\+\mathrm{Re}\left[R(a,b)\exp\left(j2\pi(a-1)f_0T\right)\right]\end{bmatrix}=$$

$$=C\left[\left|R(a,b)\right|\cos\begin{bmatrix}\arg\left(R(a,b)\right)-\\-2\pi(a-1)f_0T\end{bmatrix}-\frac{\rho}{2}E(a,b)\right].$$

При синтезе алгоритма синхронизации для систем радиосвязи пренебрежение масштабированием сигнала во времени позволяет разделить оценивание доплеровского сдвига и задержки. В этом случае искомые оценки [4]

$$\hat{b}=\underset{b}{\operatorname{argmax}}\left\{\left[\left|R(b)\right|-\frac{\rho}{2}E(b)\right]\right\};$$

$$\hat{a}=1-\frac{1}{2\pi f_0T}\arg(R(\hat{b})),$$

где argmax — аргумент функции, соответствующий её максимальному значению.

В случае систем акустической связи зависимости автокорреляционной функции $R(a, b)$ и энергии сигнала $E(a, b)$ от доплеровского расширения требуют выполнения двумерного поиска максимума $L(a, b)$ по a и b.

Упрощённый алгоритм оценки доплеровского расширения. Прямой двумерный поиск требует выполнения интерполяции сигнала и является вычислительно затратным даже при наложении ограничений на значения величин a и b. Поэтому для упрощения оценивания предлагается разбить его на два этапа: грубую синхронизацию и уточнение полученных оценок.

На этапе грубой синхронизации воспользуемся тем, что функция

$$L_{гр}(a,b)=\left[\left|R(a,b)\right|-\frac{\rho}{2}E(a,b)\right]$$

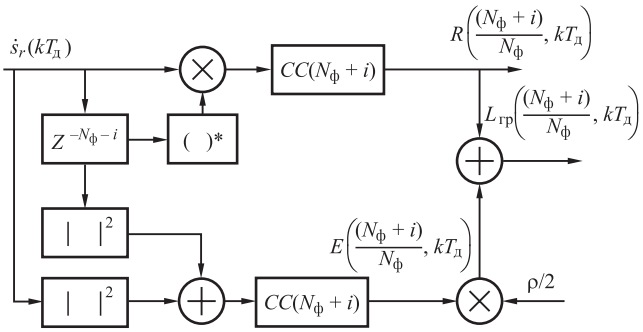

Рис. 3. Функциональная схема вычислителя функции правдоподобия:
Z^{-n} — задержка на n отсчётов; $CC(n)$ — скользящее усреднение по n отсчётам

имеет выраженный пик, ширина которого по координате a равна приближённо одному дискретному отсчёту, что позволяет выполнять поиск максимума $L_{гр}(a, b)$ в дискретном времени с шагом $T_д$ по задержке и шагом $1/N_ф$ по доплеровскому расширению без использования интерполяции сигнала. Вычисление функции правдоподобия при фиксированном значении $a = (N_ф + i)/N_ф$ может быть выполнено устройством, функциональная схема которого показана на рис. 3.

Для синхронизации используются несколько каналов, в каждом из которых находится такой вычислитель. Каналы настроены на диапазон ожидаемых значений доплеровского расширения. Синхронизация выполняется поиском канала с максимальным значением функции правдоподобия в течение времени наблюдения. Номер канала указывает на доплеровское рассеяние, а положение максимума во времени — на начало OFDM-символа.

Для уточнения полученной оценки доплеровского расширения, пренебрегая изменениями $R(a, b)$ и $E(a, b)$ в окрестности максимума, найдём экстремум функции

$$L_т(a,\hat{b})=\cos[\arg(R(a,\hat{b}))-2\pi af_0\left(a-1\right)T],$$

который достигается при

$$\begin{aligned}&\arg(R(a,b))+2\pi(a-1)f_0T=2\pi n;\\&a=1-\frac{1}{2\pi f_0T}\left[\arg(R(a,b))+2\pi n\right],\end{aligned}\qquad(1)$$

где n — целое.

Период неоднозначности полученной оценки равен $(f_0T)^{-1}$, причём, так как $f_0 > 1/T_д$, он меньше, чем ширина корреляционного пика $L_{гр}(a, b)$, и для получения искомой оценки требуется снять имеющуюся неоднозначность.

Для разрешения неоднозначности выполним ещё одно промежуточное измерение доплеровского расширения. При этом не будем требовать оптимальности промежуточной оценки, так как она носит вспомогательный характер.

Рассмотрим результат ДПФ двух частей используемой обучающей последовательности, лежащих на отрезках S_1 и S_2:

$$x_1(k) = \frac{1}{N_ф}\sum_{i=0}^{N_ф-1} s_r\left(m, \hat{b} + iT_д\right)\exp\left(-jki/N_ф\right);$$

$$x_2(k) = \frac{1}{N_ф}\sum_{i=0}^{N_ф-1} s_r\left(m, \hat{b} + \left(i + \hat{a}_{гр}N_ф\right)T_д\right)\exp\left(-jki/N_ф\right);$$

$$k = -(N-1)/2 \ldots (N-1)/2,$$

где $\hat{a}_{гр}N_ф$ — грубая (с точностью до целого числа отсчётов) оценка длительности половины обучающей последовательности после масштабирования.

Эти два отрезка сигнала идентичны с точностью до сдвига по фазе на $2\pi(1-a^{-1})f_0\hat{a}_{гр}T$ и смещения по времени на $\delta_a N_ф \notin (-0{,}5...0{,}5)$, причём

$$\delta_a = a - \hat{a}_{гр}.$$

Тогда можно записать

$$F(k) = x_{S2}(k)x^*_{S1}(k) = \\ = A(k)\exp\left(-j2\pi\left(\left(\hat{a}_{гр} - \hat{a}_{гр}/a\right)f_0T + k\delta_a/N_ф\right)\right), \quad (2)$$

где $A(k)$ — абсолютное значение полученных отсчётов $F(k)$, на которое влияют многолучевое распространение сигнала и имеющаяся межканальная интерференция.

Из выражения (2) видно, что в качестве промежуточной оценки δ_a может быть использован наклон фазы функции $F(k)$. Воспользуемся алгоритмом, близким к приведённому в работах [6, 7], а в качестве информативного параметра используется разность фаз функции $F(k)$, усреднённой по положительным и отрицательным частотам. Оценка δ_a будет иметь вид

$$\hat{\delta}_a = \frac{1}{\pi N}\arg\left\{\sum_{l=1}^{(N-1)/2} F(l)\sum_{(N-1)/2}^{-1} F^*(l)\right\}. \quad (3)$$

Итоговая оценка доплеровского расширения находится из выражения (1):

$$\hat{n} = \underset{n}{\operatorname{argmin}}\left|\frac{1}{2\pi f_0T}\left[\arg\left(R\left(\hat{a}_{гр}, \hat{b}\right)\right) + 2\pi n\right] - \hat{a}_{гр} + \delta_a\right|,$$

где argmin — значение аргумента функции, обеспечивающее её минимум.

Результаты имитационного моделирования. Для того чтобы продемонстрировать эффективность разработанного алгоритма, использованы метод математического моделирования, а также методика оценки результатов [8]. При моделировании рассматривалось функционирование алгоритмов в условиях канала с аддитивным белым гауссовским шумом при различном значении числа несущих. Использованные параметры OFDM-системы приведены в таблице.

Рассмотрим точность оценок, полученных с помощью описанных алгоритмов. На рис. 4 приведены графики среднеквадратического отклонения оценок (СКО) доплеровского расширения. СКО оценок, полученных с помощью формулы (1), показаны линиями *4—6*; а оценок, полученных с использованием формулы (3), — линиями *7—9*. Линиями *1—3* показана составляющая СКО оценок согласно формуле (1), обусловленная только аргумен-

Параметры моделируемой системы

Параметр	Значение		
Несущая частота f_0	12 кГц		
Частота дискретизации комплексной огибающей $1/T_д$	4 кГц		
Число несущих N	229	459	917
Размерность ДПФ $N_ф$	256	512	1024

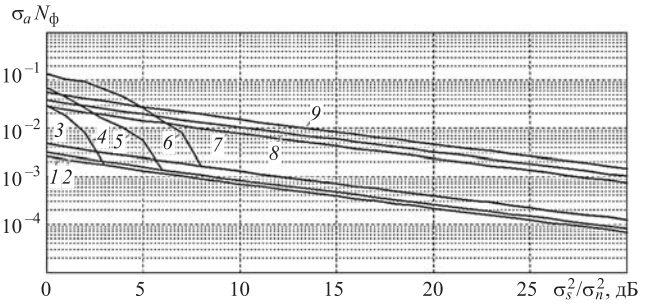

Рис. 4. Нормированное СКО оценки доплеровского расширения в зависимости от ОСШ

том автокорреляционной функции без учёта ошибок разрешения неопределённости. Значению $N_ф$ = 256 соответствуют линии *3*, *6* и *9*, значению $N_ф$ = 512 — *2*, *5* и *8*, а значению $N_ф$ = 1024 — *1*, *4* и *7*.

Из рис. 4 видно, что вспомогательная оценка (3) имеет СКО на порядок больше, чем СКО упрощённого алгоритма (1). Однако такой точности достаточно для правильного разрешения имеющейся неоднозначности.

При высоких значениях отношения сигнал/шум (ОСШ) точность оценивания доплеровского расширения обусловлена только аргументом автокорреляционной функции — графики *1—3* совпадают с графиками *4—6*. Порог ОСШ, при котором появляются ошибки разрешения неоднозначности, находится в диапазоне 3...7 дБ и увеличивается с уменьшением количества несущих, что обусловлено сокращением обучающей последовательности и, соответственно, снижением её энергии.

Заключение. Предложенные алгоритмы позволяют с удовлетворительной точностью оценить задержку и доплеровское расширение OFDM-сигнала, прошедшего через подводный акустический канал, и могут быть использованы при проектировании приёмных частей систем гидроакустичекой связи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда. Грант № 15-11-10022 «Статистические методы локализации местоположения и протяжённости области определения сигналов и изображений в пространстве их существования».

Библиографические ссылки

1. **Giunta G.** Fast estimators of time delay and Doppler stretch based on discrete-time methods // IEEE Transactions on Signal Processing, N.Y.: IEEE, 1998. Vol. 46, № 7. P. 1785.

2. **Mason S.F. et al.** Detection, Synchronization, and Doppler Scale Estimation with Multicarrier Waveforms in Underwater Acoustic Communication // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, N.Y.: IEEE, 2008. Vol. 26, № 9. P. 1638.

3. **Stojanovic M.** OFDM for underwater acoustic communications: adaptive synchronization and sparse channel estimation // IEEE International Conference on Accoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2008), N.Y.: IEEE, 2008. P. 5288.

4. **van de Beek, J.-J. et al.** Low-complex frame synchronization in OFDM systems // 1995 4th IEEE International Conference on Universal Personal Comm., N.Y.: IEEE, 1995. P. 982.

5. **Moose P.** A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction // IEEE Transactions on Communications, N.Y.: IEEE, 1994. Vol. 42. P. 2908. Oct. 1994.

6. **Калашников К.С. и др.** Синтез алгоритмов синхронизации OFDM-сигналов в частотной области // Электросвязь, 2009, № 11. С. 35.

7. **Калашников К.С., Шахтарин Б.И.** Синхронизация OFDM-сигналов во временной и частотной областях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Приборостроение", 2011, № 1. С. 18.

8. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами // Автоматизация и современные технологии, 2014, № 6. С. 40.

Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают:
межотраслевой научно-технический журнал "Автоматизация. Современные технологии"
успешно прошёл аккредитацию в ВАК для публикации работ
соискателей учёных степеней по отрасли науки:
05.00.00 — технические науки
и четырём группам специальностей:
05.02.00 — машиностроение и машиноведение;
05.07.00 — авиационная и ракетно-космическая техника;
05.11.00 — приборостроение, метрология
и информационно-измерительные приборы и системы;
05.13.00 — информатика, вычислительная техника и управление.
Напоминаем: статьи следует подавать в редакцию заблаговременно!
С правилами оформления статей можно ознакомиться на сайте mashin.ru

УДК 681.518.52

А.А. Тимофеев, А.А. Самохвалов, П.А. Толкачёв
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
tolkachevpa@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ С ФИЛЬТРОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Рассмотрены вопросы исследования частотных, динамических и спектральных характеристик систем импульсно-фазовой автоподстройки частоты. В качестве примера приведена система с импульсным частотно-фазовым детектором и фильтром нижних частот второго порядка. Определены критерии нахождения устойчивости таких систем, а также запаса устойчивости по амплитуде и фазе. Найдены оптимальные по запасу устойчивости параметры фильтра, входящего в состав синтезатора частоты. Проведено имитационное моделирование синтезатора частот в математическом пакете Matlab Simulink, в результате чего получены результаты, демонстрирующие изменение уровня напряжения на выходе фильтра в момент переключения коэффициента деления, а также спектр сигнала на краях диапазона переключения.

Ключевые слова: синтезатор частот; система импульсно-фазовой автоподстройки частоты с фильтром нижних частот второго порядка; частотные характеристики системы синтезаторов частоты; запас устойчивости системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты с фильтром нижних частот второго порядка.

The problems of research of frequency, dynamic and spectral characteristics of pulse-frequency phase-locked systems are considered. As an example, a pulsed system with a phase-frequency detector and the low pass filter of second order is shown. Criteria for a finding of the sustainability of such systems, as well as the sustainability of the stock in amplitude and phase are determined. The optimal stability margin of the filter parameters, putting in a component of the frequency synthesizer is found. Simulation modeling of frequency synthesizer in Matlab Simulink mathematical package is performed. The results obtained demonstrate the change in the voltage level at the output of the filter at the time of switching the division factor, and also at the edges of the spectrum band switching signal.

Keywords: frequency synthesizer; pulse-system phase-locked loop with a low pass filter of the second order; frequency synthesizer frequency characteristics of the system; stability margin of pulse-system phase-locked loop with a low pass filter of the second order.

Синтезаторы частот (СЧ) играют всё большую роль в областях телекоммуникации, радиолокации, навигации, радио- и телевещания и т.д. Поток публикаций, посвящённых различным аспектам исследования СЧ с импульсно-фазовой автоподстройкой частоты (ИФАПЧ), не только не иссякает, но и наоборот, имеет устойчивую тенденцию к росту.

В настоящее время вопросам теории нелинейных систем ИФАПЧ с импульсным частотно-фазовым детектором (ИЧФД) и фильтром 2-го порядка уделяется повышенное внимание, так как такие системы находят широкое применение. Поэтому спектральные и динамические характеристики данных систем анализируются достаточно внимательно. Однако динамика работы системы при таких исследованиях описывается либо достаточно сложными математическими выражениями, что затрудняет их наглядность [1], либо осуществляется с некоторыми ограничениями для режимов больших и малых отклонений от положения равновесия [2]. Такие ограничения могут несколько искажать картину переходных процессов в системе как при больших отклонениях от положения равновесия, так и в режиме устойчивости "в малом". Кроме того, в большинстве публикаций не рассматривается реальная динамика процесса установления равновесия системы при перестройке с одного края диапазона на другой. Такое рассмотрение процесса весьма важно, так как в этом случае наблюдается смещение рабочей точки по модуляционной характеристике управляемого генератора (УГ). При этом можно определить, выходит ли характеристика регулирования за пределы линейного участка дис-

криминационной характеристики ИЧФД, так как выход рабочей точки за пределы участка напряжений (0, ..., U_n) может привести к разрыву петли ИФАПЧ (U_n — напряжение питания выходных цепей широтно-импульсного частотно-фазового детектора ШИЧФД) и срыву синхронизации. Поэтому построение модели, наиболее близко отображающей динамику работы системы ИФАПЧ с фильтром 2-го порядка, является актуальной задачей.

Исследование системы ИФАПЧ с фильтром 2-го порядка. Обобщённая структура системы ИФАПЧ с фильтром 2-го порядка представлена на рис. 1. В качестве ИЧФД был выбран дискриминатор с тремя состояниями (+I, 0, −I) [3]. Именно уникальность нейтрального положения обеспечивает достоинства выбранной схемы.

Передаточная функция ФНЧ

$$H_f(p) = \frac{1}{pC_1}\frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}, \qquad (1)$$

где $T_1 = R(C_1 + C_2)$; $T_2 = RC_2$.

Такой фильтр следует считать фильтром 2-го порядка. Во многих работах для анализа динамических характеристик СЧ с ИФАПЧ исследовались характеристики бесфильтровых

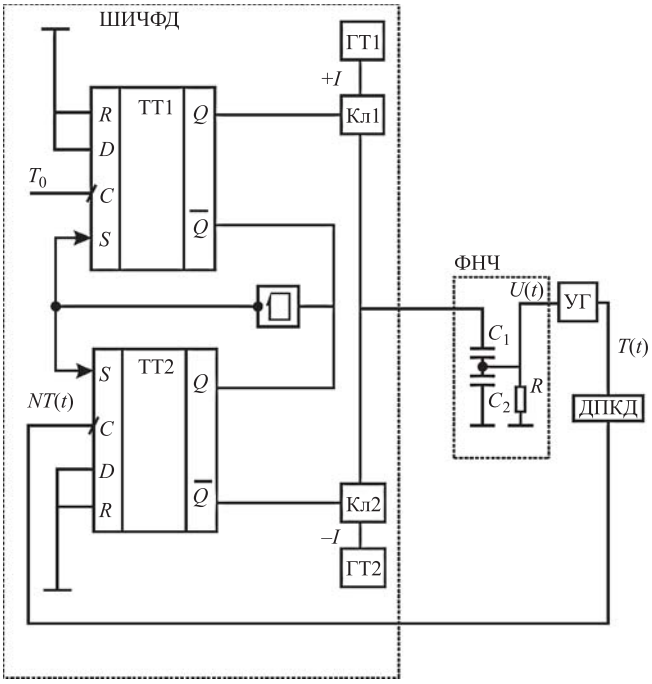

Рис. 1. Обобщённая структура ИФАПЧ:
ШИЧФД — широтно-импульсный частотно-фазовый детектор; ФНЧ — фильтр нижних частот; УГ — управляемый генератор; ДПКД — делитель с переменным коэффициентом деления; ГТ — генератор тока; Кл — ключ; ТТ — тактируемый триггер

линеаризованных систем, т.е. систем, в которых $T_1 = 0$ и $T_2 = 0$, тогда $H_f(p) = \frac{1}{pC_1}$. Одним из способов визуализации переходного процесса установления колебаний является графоаналитический метод, который позволяет рассмотреть динамику системы без фильтра. Рассмотрим работу подобной системы.

Введём обозначения: T_0 — период повторения опорного сигнала; $K_Г$ — коэффициент передачи УГ; N — коэффициент деления ДПКД; $K_Д$ — коэффициент передачи ИЧФД и ФНЧ. Пусть коэффициент передачи ДПКД изменяется с N_1 на N_2, тогда напряжение на фильтре

$$u_2 = u_1 + \Delta u_1, \qquad (2)$$

где $\Delta u_1 = K_Д(N_2 T_1 - T_0)$ — изменение напряжения на УГ в момент переключения.

При установившемся режиме

$$T_1 N_1 = T_2 N_2 = T_0,$$

поэтому

$$\Delta u_1 = T_0\left(\frac{N_2}{N_1} - 1\right). \qquad (3)$$

В дальнейшем процесс повторяется и разностное уравнение принимает вид

$$u_{n+1} = u_n + \Delta u_n, \qquad (4)$$

где $\Delta u_{n+1} = \Delta u_n(1 - K_0)$; $K_0 = K_Г K_Д N_2$ — коэффициент усиления разомкнутой системы.

Таким образом, из (4) следует, что

$$\Delta u_{n+1} = K_Д T_0\left(\frac{N_2}{N_1} - 1\right)(1 - K_0)^n. \qquad (5)$$

Динамические характеристики определяются устойчивостью ИФАПЧ и параметрами переходного процесса. Определим границы устойчивости "в малом". Для того чтобы система была устойчива "в малом", т.е. способна возвращаться в стационарный режим при малых отклонениях, необходимо выполнение условия $\lim_{n\to\infty} \Delta u_n = 0$. Тогда из (5) получим, что система устойчива при $K_0 \in [0, 2]$.

Коэффициент усиления

$$K_0 = T_0^2 \frac{SI}{C_1 N}, \qquad (6)$$

где S — крутизна характеристики УГ.

Для анализа устойчивости "в малом" непрерывных систем развивается ряд критериев: Рауса—Гурвица, Найквиста, Михайлова. Например, анализ устойчивости ИФАПЧ по критерию Рауса—Гурвица выполняется с помощью решения системы неравенств. Причём, если ФНЧ имеет порядок 0 (нет нелинейных элементов), то система содержит два неравенства, если же ФНЧ имеет порядок 2 (два нелинейных элемента), то количество неравенств возрастает до 5, а при дальнейшем росте порядка сложность условий резко возрастает.

В режимах, когда включается СЧ или происходит переключение коэффициентов деления, возможны достаточно большие отклонения от положения равновесия. Тогда для выяснения условий устойчивости ИФАПЧ "в целом" линейные приближения нельзя использовать, а должна быть проанализирована система нелинейных разностных уравнений с учётом алгоритмов функционирования дискриминаторов. Поскольку решение этих уравнений в аналитической форме выражается сложными формулами, то для их решения используют либо ЭВМ, либо приближённые методы анализа. Результаты изучения ИФАПЧ с ИЧФД и различными ФНЧ позволяют утверждать, что введение импульсного ЧД приводит к устойчивости системы "в целом", если она обладает устойчивостью "в малом".

Одной из основных характеристик СЧ является переходный процесс, возникающий при переключении коэффициента деления делителя ДПКД. Основным показателем переходного процесса является его длительность, часто измеряемая опорными колебаниями n, по истечении которых выполняется неравенство $|u_{n+1} - u_n| < \Delta u_n$, где Δu_n характеризует точность установления частоты [4]. Для оценки быстродействия с учётом (4) введём параметр $\gamma = |u_{n+1} - u_n|$, тогда в случае бесфильтровой линеаризованной системы получим

$$n = \frac{\ln\left(\gamma / \left[K_Д T_0 \left(\frac{N_2}{N_1} - 1\right)\right]\right)}{\ln(1 - K_0)} + 1.$$

Известно, что анализ переходного процесса системы с фильтром в частотном режиме связан с разложением передаточной функции по отношению к ошибке на элементарные дроби, нахождением их оригиналов во временной области и последующим анализом. При этом система предполагается линейной и непрерывной. Такой метод является не только приближённым, но и неточным. Следует отметить, что в фазовом режиме переходной процесс описывается более сложными аналитическими выражениями.

Запас устойчивости системы ИФАПЧ. Для исследования частотных характеристик воспользуемся результатами, приведёнными в работе [5]. Для режима малых отклонений от положения равновесия, когда система считается линейной, приведено аналитическое выражение передаточной функции разомкнутой системы по фазе, непрерывная часть которой при (1) имеет вид

$$Y(p) = KT_0 \frac{1}{p^2} \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}, \qquad (7)$$

где $K = SI/(C_1 N)$ — коэффициент усиления разомкнутой системы.

Применив z-преобразование к формуле (7), получим

$$Y(z) = K_0 \frac{z\left[z - d + \left(\overline{T}_1 - \overline{T}_2\right)(1 - d)(z - 1)\right]}{(z - 1)^2 (z - d)},$$

где $\overline{T}_1 = T_1/T_0$; $\overline{T}_2 = T_2/T_0$; $d = e^{-1/\overline{T}_2}$.

Применив ω-преобразование к формуле (7), получим

$$Y(\omega) = \frac{K_0}{4\omega^2} \frac{\left(1 - \omega^2\right)(1 + \omega\tau_1)}{1 + \omega\tau_2}. \qquad (8)$$

Эксплуатационные характеристики реальных устройств, как правило, требуют запасов устойчивости по заданным критериям. Основными показателями являются запасы по амплитуде и фазе. Необходимо определить, насколько далеко от границы устойчивости находится линеаризованная система автоподстройки.

Найдём функции, описывающие АЧХ и ФЧХ данной системы.

Заменив $\omega = i\upsilon$, где υ — псевдочастота, из выражения (8) получим АЧХ

$$\left|Y(i\upsilon)\right| = \frac{K_0\left(1 + \upsilon^2\right)}{4\upsilon^2 \sqrt{\left[1 + (\upsilon\tau_2)^2\right] / [1 + (\upsilon\tau_1)^2}} \qquad (9)$$

и ФЧХ

$$\varphi(i\upsilon) = -\pi + \mathrm{arctg}(\upsilon\tau_1) - \mathrm{arctg}(\upsilon\tau_2). \qquad (10)$$

Для того чтобы определить запас устойчивости по фазе, сначала необходимо найти значение ω_c, для которого выполняется равенство

$$|Y(i\omega_c)| = 1 \text{ или } \lg|Y(i\omega_c)| = 0,$$

а затем вычислить $\varphi(i\omega_c)$ в этой точке. Находим $\varphi(i\omega_c) = \varphi_p \approx -140°$, тогда $f_c = \omega_c/(2\pi) \approx 0{,}2\cdot10^6$ Гц. В данном случае это довольно типичная система, потому что частота среза f_c в 5 раз меньше частоты опорного генератора, которая совпадает с частотой сравнения. По теореме Котельникова необходимо выполнение неравенства $2f_c \leqslant f_0$. В данном случае $5f_c = f_0$.

Запас устойчивости по фазе γ_φ может быть найден как $\gamma_\varphi = \pi + \varphi(i\omega_c)$. Получаем $\gamma_\varphi = 180° - 140° = 40°$.

Рекомендуемый запас по фазе должен быть не менее 30°. Однако, учитывая, что для подавления частоты сравнения могут быть использованы режекторные фильтры, которые внесут дополнительный сдвиг фазы порядка 15...20°, необходимо обеспечить запас по фазе 45...50°.

Для того чтобы определить возможные области изменения параметров системы, при которых обеспечивается требуемый запас по фазе, необходимо решить систему

$$\begin{cases} |Y(i\omega_c)| = 1; \\ \operatorname{arctg}(\upsilon\tau_1) - \operatorname{arctg}(\upsilon\tau_2) > \gamma_\varphi, \end{cases}$$

где γ_φ — требуемый запас.

Геометрическим решением системы является пространственная область, зависящая от параметров $\overline{T}_1, \overline{T}_2$ и K_0.

Для того чтобы определить запас устойчивости по амплитуде γ_φ, сначала необходимо найти значение ω_1, для которого выполняется равенство

$$\varphi(i\omega_c) = -180°,$$

а затем вычислить $|Y(i\omega_1)|$ в этой точке. Получаем $|Y(i\omega_1)| = |Y|_A \approx -9$ дБ, где $f_1 = \omega_1/(2\pi) \approx 0{,}25\cdot10^6$ Гц. Таким образом, запас устойчивости по амплитуде составляет 9 дБ, что говорит о том, что система достаточно надёжна, так как в работе [6] даны рекомендации по обеспечению запаса по амплитуде порядка 10 дБ.

На практике для определения запасов устойчивости системы удобно использовать показатель колебательности M, который характеризует неравномерность АЧХ $|W(iw)|$ замкнутой системы. Согласно работе [6] рекомендуется выбирать $M = 1{,}1...1{,}7$.

Для непрерывной системы найдены выражения, позволяющие определить параметры синтезатора при заданных значениях M и $\overline{\omega}_c$:

$$\overline{T}_1 = \frac{M}{\overline{\omega}_c(M-1)}; \overline{T}_2 = \frac{M}{\overline{\omega}_c(M+1)}; K_0 = \overline{\omega}_c^2\frac{M-1}{M},$$

где $\overline{\omega}_c = 2\pi f_c/f_0$ — нормированная частота среза.

По этим формулам можно рассчитать параметры синтезатора:

$$\overline{T}_1 \approx 3{,}44; \overline{T}_2 \approx 0{,}59; K_0 \approx 0{,}29.$$

Таким образом, получены оптимальные по устойчивости и быстродействию параметры системы.

Рассчитаем параметры СЧ при условии, что ток заряда $I = 4$ мА, крутизна УГ $S = 10^7$ Гц/В, частота сравнения $f_0 = 10^6$ Гц и диапазон переключения коэффициента ДПКД $N = (16; 32)$. Параметры $\overline{T}_1, \overline{T}_2$ и K_0 выберем рассчитанные ранее. Определим параметры фильтра:

$$C_1 = T_0^2\frac{SI}{K_0N} = 8\,\text{нФ}; \quad C_2 = \frac{\overline{T}_2T_0}{R} = 1{,}66\,\text{нФ};$$

$$R = \frac{(\overline{T}_1 - \overline{T}_2)T_0}{C_1} = 356 \text{ Ом}.$$

Искомые параметры фильтра определены.

Моделирование СЧ с ФНЧ 2-го порядка. Одним из возможных методов анализа работы ИФАПЧ является имитационное моделирование, позволяющее оценить такие важные характеристики нелинейной системы, как переходный процесс и устойчивость, причём без каких-либо допущений [7]. С помощью модели можно проверить результаты расчётов, оценить точность приближений, а также вычислить параметры, анализ которых аналитическими методами затруднён.

Проведём моделирование СЧ согласно схеме, изображенной на рис. 2, в программной среде Simulink.

В качестве примера зададим параметры, рассчитанные ранее: $C_1 = 8$ нФ; $C_2 = 1{,}66$ нФ; $R = 356$ Ом; $R_2 = R_3 = 40$ кОм; $N = 2$; $S = 10^7$ Гц/В; $f_0 = 10^6$ Гц. Для исследования границ устойчивости примем $N = 2$, только тогда получим

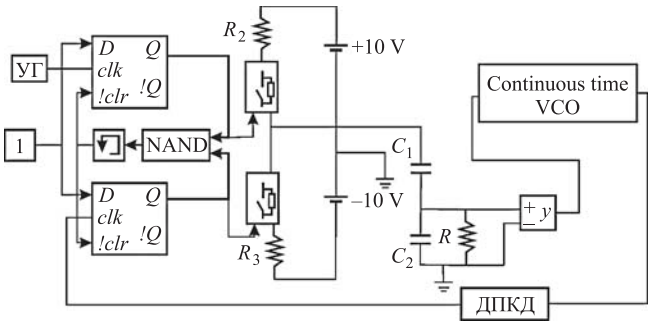

Рис. 2. Модель синтезатора частот в Simulink

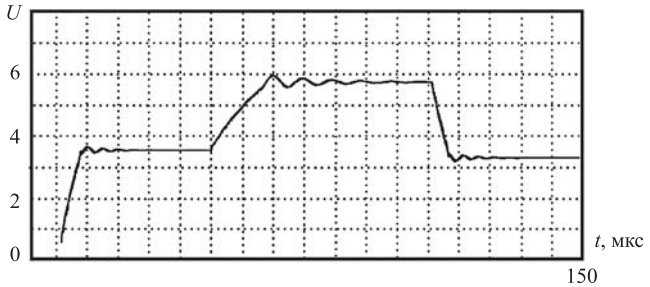

Рис. 3. Уровень напряжения с выхода ФНЧ при изменении ДПКД со значения N = 32 в значение N = 64 и обратно

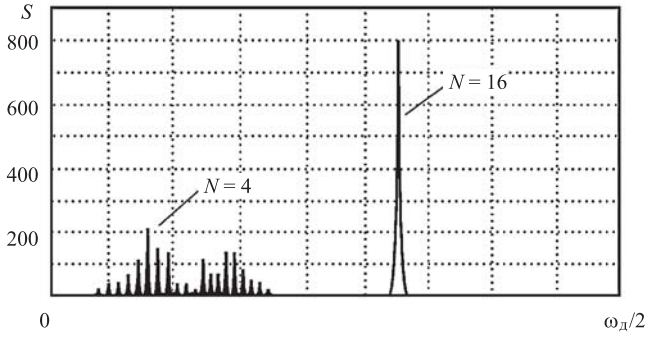

Рис. 4. Спектр генерируемого сигнала

расчётное значение $K_0 = 2$ по формуле (6) для линейного СЧ без фильтра (граница устойчивости). При моделировании можно убедиться, что система неустойчива, так как модель нелинейная и фильтр вносит свои изменения. Методом последовательных приближений находим, что система устойчива при $K_0 \in (0; 1{,}8)$. Оставим все параметры системы, кроме N, без изменения.

На рис. 3 показан процесс изменения напряжения на фильтре при изменении коэффициента деления ДПКД со значения $N = 32$ в значение $N = 64$ и обратно. Из эпюры напряжения видно, что переходные процессы установления напряжения отличаются по типу и имеют разную длительность.

На рис. 4 представлен спектр генерируемого сигнала, т.е. спектральная плотность мощности сигнала с выхода УГ при значениях коэффициента деления ДПКД $N = 4$ и $N = 16$. Исходные данные были получены по дискретному ряду отсчётов, снятых с УГ.

Временной ряд разбивался на реализации, и по ним строилась усреднённая периодограмма. Частота дискретизации в эксперименте намного превышает частоту сигнала с выхода УГ. По горизонтальной оси частота изменяется от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_д/2$, т.е. от 0 до частоты Найквиста. Из графика видно, что в устойчивом режиме сигнал является квазигармоническим, а на границе устойчивости переходит в широкополосный. Спектр широкополосного ЧМ сигнала представляет собой набор гармоник, амплитуды которых определяются с помощью функций Бесселя и зависят от индекса модуляции (в случае синтезатора от $K_Г$ — коэффициента передачи УГ). Расстояние между гармониками определяется частотой изменения напряжения на ФНЧ и зависит от параметров системы.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что моделирование позволяет избежать трудоёмких расчётов и является средством визуализации переходных процессов.

Библиографические ссылки

1. **Шахтарин Б.И.** Синтезаторы частот. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. С. 112—136.

2. **Шахтарин Б.И., Иванов А.А.** Сравнительный анализ цифровых систем синхронизации. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана // Сер. «Приборостроение». 2014. № 1. С. 24–38.

3. **Шахтарин Б.И., Федотов А.А.** Анализ синтезатора частот с петлей ФАП. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана // Сер. «Приборостроение». 2014. № 2. С. 72—84.

4. **Зарецкий М.М., Мовшович М.Е**. Синтезаторы частот с кольцом фазовой автоподстройки. М.: Энергия, 1974. С. 150—160.

5. **Прохладин Г.Н.** Моделирование шумовых характеристик синтезаторов частот на основе систем ИФАПЧ // Радиотехника. 2006. № 2. С. 36—47.

6. **Манасевич В.** Синтезаторы частот. Теория и проектирование. М.: Связь, 1979. С. 112—180.

7. **Noorfazila K., Said Al-Sarawi, Neil H.E.** Weste and Derek Abbot / A phase-Locked Loop Reference Spur Modelling using Simulink // International Conference on Electronic Devices "Systems and Applications", 2010. С. 12—32.

УДК 621.384.319

Н.М. Парфёнов, канд. техн. наук
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)),
С.П. Тимошенков, д-р техн. наук, **А.С. Тимошенков,** канд. техн. наук
(Московский институт электронной техники (национальный исследовательский университет))

sedennik@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТРАВЛЕНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ

Исследованы основные дестабилизирующие факторы: ударные и вибрационные нагрузки, повышенная влага, широкий диапазон температур. Эти требования предъявляются к параметрам датчиков физических величин и другим МЭМС-устройствам современной авиационно-космической техники. Показано, что для формирования датчиков в условиях возрастающей интеграции приборов и увеличения измерительных функций на одном чипе важнейшее значение имеет качественная и бездефектная морфология поверхности кремниевой пластины.

Ключевые слова: датчики физических величин; морфология поверхности; шероховатость.

The main destabilizing factors were studied: shock and vibration, high humidity, wide temperature range. These demands are made to the parameters of physical quantities sensors and other MEMS devices of modern aerospace technology. It is shown that the formation of the sensors, in a context of increasing integration of devices and increase measurement functions on a single chip, is essential quality and defect-free surface morphology of the silicon wafer.

Keywords: sensors of physical quantities; surface morphology; roughness.

Введение. Одной из основных проблем при формировании микроэлектромеханических систем (МЭМС)-устройств является получение зеркальной чистоты поверхности кремния, особенно при изготовлении сложно-рельефной структуры. Кроме того, наличие остаточных механических напряжений, нарушенного слоя как в кремниевых пластинах, так и после операций по утонению пластин усложняют задачу получения приборов с надёжными и стабильными параметрами.

В процессе изготовления датчиков на поверхности кремния можно обнаружить локальные дефекты в виде примесей или микронеоднородностей (шероховатостей). В зависимости от их характеристик могут возникнуть серьёзные причины, приводящие приборы в процессе эксплуатации в нерабочее состояние. Ниже рассматриваются приведённые выше проблемы, являющиеся актуальными.

Исследование морфологии поверхности кремния. Для улучшения морфологии поверхности кремния широко применяется травление. Шероховатость исходной кремниевой пластины обычно находится на уровне постоянной решётки (0,4 нм). Однако в процессе технологических операций, особенно после операций шлифовки и химико-механического полирования (ХМП), на поверхности кремниевой пластины можно наблюдать локальные дефекты в виде механических напряжений (шероховатостей).

Дефекты микрообработки поверхности способны искажать симметрию поля упругих напряжений и, следовательно, ухудшать точностные метрологические параметры датчиков.

Возникшая при изготовлении преобразователей шероховатость является критическим параметром, поскольку на поверхности кремниевой пластины не должны образовываться микронеровности.

В результате исследований с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) и конфокального микроскопа Nikon Eclipse с программным управлением на поверхности пластины ориентаций 100 и 111 была обнаружена шероховатость в виде множества пирамидальных образований [1]. Данные методы исследования позволяют наглядно представить трёхмерное изображение шероховатой поверхности.

На рис. 1. приведена топография нанокластеров стекла в приповерхностном слое мембраны после стравливания слоя стекловидного диэлектрика за пределами тензорамки.

Методы травления и контроля шероховатости поверхности. Исследования показали, что

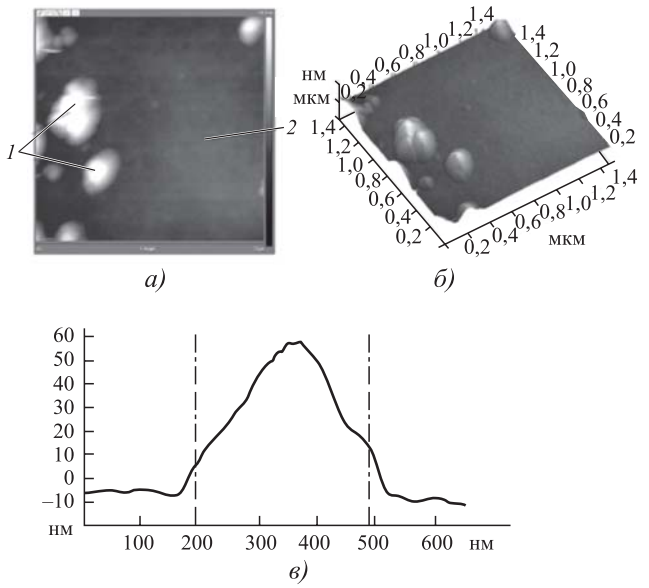

Рис. 1. Топография наночастиц стекла, образующих шероховатость (*а*), трёхмерное изображение (*б*), микропрофиль (*в*):
1 — наночастица стекла; *2* — локальная область

характеристики микромеханической структуры зависят от качества обработки поверхности кремния элементов МЭМС. Установлено, что при сложно-профильной структуре травления элементов преобразователя происходит неравномерное травление сторон [2].

Для уменьшения величины шероховатости, например, после проведения Bosch-процесса (методы химического травления или комбинированные режимы травления, использующие различные газовые, жидкостные или плазмохимические способы), применялись несколько технологических способов.

Благодаря относительно низкой токсичности и совместимости с технологией интегральных микросхем (ИМС) появился интерес исследователей к использованию щелочных растворов KOH.

Данная статья посвящена изучению особенностей анизотропного химического травления (АХТ) в растворах KOH разной концентрации с добавлением компонентов, влияющих на шероховатость поверхности.

К недостаткам АХТ следует отнести невысокую скорость травления. Однако скорость травления Si ориентации 100, особенно ориентации (111), может быть увеличена при травлении в установке с микроволновым источником на частотах 2,45 и 2,54 ГГц. При этом скорость травления увеличилась в 6 раз по сравнению с традиционным травлением [3—5].

Увеличение концентрации KOH и скорости травления способствовало уменьшению шероховатости поверхности кремния. Однако при длительном травлении и очень высокой концентрации щелочного раствора поверхность становилась более шероховатой. Это, видимо, связано с появлением пузырьков водорода, которые препятствуют поступлению к поверхности кремния следующей порции травителя. В результате удаления пузырьков водорода с поверхности кремния перемешиванием раствора шероховатость уменьшалась на порядок [6].

При травлении кремниевой пластины на глубину 200 мкм в локальной области была обнаружена шероховатость поверхности (рис. 2).

После травления исследование влияния морфологии поверхности на шероховатость проводилось с помощью прибора Alphastep 200, сканирующего зондового микроскопа ТМ-3000 и атомно-силового микроскопа. Величину шероховатости поверхности удалось снизить при температуре + 47 °С до величины *Ra* — 4 нм (базовая длина 200 мкм).

Исследования процессов анизотропного травления Si ориентации 110 в растворах KOH проводились на глубине 500 мкм и более. При этом наблюдалась деградация травления, обусловленная ростом кристаллов из-за выпадения в осадок кислородсодержащих соединений и усилением микронеоднородностей на поверхностях 111 и 110, которые удалось уменьшить увеличением температуры до 1300 °С.

В многослойной кремниевой структуре при травлении различных слоёв основное внимание уделялось выбору такого травителя, ко-

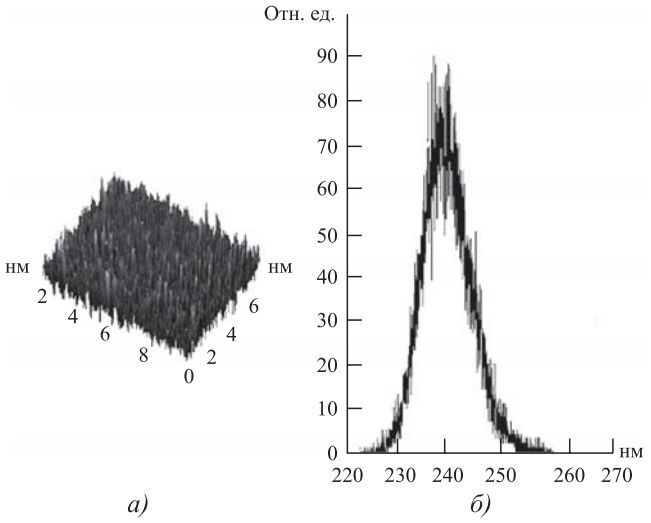

Рис. 2. Локальная область поверхности кремния (*а*) и гистограмма распределения неровностей после травления на глубину 200 мкм (*б*)

торый обеспечивал бы одинаковую скорость травления всех сформированных слоёв.

При несоблюдении этого условия на поверхности кремния наблюдалось образование "ёлочного" профиля. Поэтому для получения гладкой поверхности необходимо использовать изменённую вязкость раствора КОН травителя с добавлением глицерина.

Наряду с раствором КОН в технологии травления в последнее время применяется раствор гидрооксид тетраметиламониум (ТМАН). Результаты исследований показали, что режим травления в ТМАН зависит от исходного состояния поверхности кремния.

Однако при низкой концентрации ТМАН и высокой температуре травления на поверхности кремния образуются пирамидальные выступы или холмики, граничащие с плоскостью 111, в направлении которой скорость травления низкая [4].

Результаты исследований показали, что режим травления в ТМАН и окончательная структура Si (100) p-типа после травления зависят от исходного состояния поверхности кремния (гидрофильной или гидрофобной). Увеличение шероховатости после непродолжительного времени травления в ТМАН объясняется увеличением смачиваемости поверхности кремния по сравнению с исходным состоянием. Шероховатая поверхность наблюдалась также в случае обработки при высокой температуре. Это объясняется тем, что катионы ТМАН не обладают каталитическими свойствами [7].

Смачиваемость поверхности определялась контактным углом смачиваемости (КУС), как отношение гидрофильности к гидрофобности. Большой КУС свидетельствует о наличии гидрофобной поверхности, а малый — о гидрофильности. Также установлено, что увеличение шероховатости при травлении в ТМАН зависит от величины параметра смачиваемости поверхности образца.

Возникшая в результате технологического процесса шероховатость является критичным параметром при изготовлении мембран и других чувствительных элементов давления (ЧЭД), на которых не должны формироваться пирамиды и холмики. Для ограничения таких микроструктурных формирований на кремниевых мембранах в раствор ТМАН добавляли персульфат аммония.

Очистка поверхности Si от органических и других загрязнений является важнейшим этапом в производстве полупроводниковых приборов и составляет 30—40 % от всего технологического процесса. Это позволяет длительное время сохранять и транспортировать кремниевые пластины без окисления поверхности [6].

Перед жидкостным травлением или для удаления диоксида кремния используется раствор плавиковой кислоты (HF). Такая очистка приводит к адсорбции водорода на поверхности Si и является пассивирующим от окисления на воздухе, а также стабилизирующим и гидрофобным. При этом шероховатость поверхности — микроскопическая. Критерием чистоты поверхности является её смачиваемость.

В одной из работ [6] исследовались три способа очистки Si (100) p-типа (удаление SiO_2): а) в буферном HF(BF), б) в NH_4BF_4 и в) ТМАН (NBF). Результаты исследований сведены в таблицу.

Из данных таблицы следует, что при температуре травления +52 °С в зависимости от способа очистки и скорости травления шероховатость увеличивается. Оптимальным травителем для очистки поверхности кремния является BF, поскольку шероховатость поверхности, по сравнению с другими травителями, в 2 раза ниже.

Важнейшее значение при исследовании шероховатости поверхности кремния имеют методы контроля шероховатости. К сожалению, на данный момент нет единой методики контроля.

Создание современных изделий требует ужесточения качества контроля не только шероховатости поверхности, но и методов, контролирующих её, поскольку шероховатость может влиять на процесс изготовления приборов и стабильность работы готового изделия.

В работе [8] представлен метод автоматического контроля шероховатости поверхности подложек, используемых для изготовления

Влияние способа химической очистки поверхности Si (100) p-типа, температуры, скорости травления на шероховатость поверхности при анизотропном травлении в 5%-ном растворе ТМАН

Травители	Температура, °С	Шероховатость, нм	Скорость травления, мкм/ч
BF	52	146	4,1
NH_4BF_4	52	294	6,0
NBF	52	474	6,2

электронных приборов. Существует несколько методов контроля качества поверхности подложек. Однако у разработчиков отсутствует единый подход к вопросу оценки шероховатости. Разработанный метод контроля шероховатости [9] основан на интерференции, связанной с использованием обработки поверхности полутоновых изображений с пороговым разделением, который нуждается в совершенствовании. В связи с этим принято решение для оценки шероховатости поверхности создать математическую модель.

Исследования шероховатости поверхности подложек CdZnTe проводились методами конфокальной микроскопии, АСМ и рентгеновской рефлектометрией. В результате сравнения среднеквадратичного отклонения профиля шероховатости поверхности подложек установлено, что наиболее предпочтительными являются методы конфокальной микроскопии и АСМ, которые позволяют наряду с трёхмерным изображением наглядно представить результат обработки шероховатой поверхности.

Выводы. Таким образом, исследования показали, что величину шероховатости поверхности можно уменьшить при травлении раствором KOH анизотропным химическим травлением, увеличивая концентрации и скорости, что, в свою очередь, позволит снизить механические напряжения в изготавливаемых структурах.

При травлении раствором TMAH существенное значение имеет состояние поверхности, относительно высокая концентрация и низкая температура.

В результате проведённых исследований разработан технологический процесс АХТ и оптимизированы режимы травления, выбран состав и концентрация компонентов травления. Приведённые методы контроля параметров шероховатости поверхности, основанные на интерференции, на применении конфокальной микроскопии и АСМ, несмотря на определённые преимущества требуют дальнейшего совершенствования, вследствие неоднозначности полученных результатов.

Библиографические ссылки

1. **Соколов Л.В., Парфёнов Н.М.** Тезисы док. на междунар. науч.-техн. конф. «Исследование морфологии поверхностей объёмных микромеханических структур кремниевых сенсоров и МЭМС-методом конфокальной микроскопии». Геленджик. 19—24 сентября 2010.

2. **Бажанова Ю.Н., Парфёнов Н.М., Тимошенков А.С**. Исследование влияния режимов анизотропного травления на шероховатость поверхности элементов датчиков микроэлектромеханических систем // Тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. «Авиация и космонавтика». МАИ. 18—21 ноября 2014.

3. **Венгер Е.Ф., Литвин П.М., Матвеева Л.А. и др**. Влияние скорости осаждения на морфологию поверхности, внутренние механические напряжения, электрические и оптические свойства тонких плёнок Ge на GaAs (100). Тезисы док. на 5-й междунар. науч.-техн. конф. "Сенсорная электроника и микросистемная технология". г. Одесса, 4—8 июня 2012.

4. **Парфёнов Н.М.** Аналитические исследования современных способов микропрофилирования кремниевых пластин и пластин с КНИ-гетероструктурой // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 1. С. 8—14.

5. **Сичинский Э.В.** Особенности глубинного травления кремния через маску в реактивно-трансформаторной связанной плазме // Известия вузов. Электроника. 2003. № 1. С. 93—94.

6. **Scroder H., Ohermeier E.** A new model for Si (100) covex corner undercutting in anisotrope KOH etching // Journal of Micromechanies and Microengineering. 2000. V. 10. № 2. P. 163—170.

7. **Paranjapr M., Pandy A., Brida S., Zen M.** Dual-doped TMAN Silicon etchaf for microelectromechanical structures and systems applications // Journal Vaccum Scienie Technology. 2000. V. 18. № 3. P. 738—742.

8. **Невлюдов И.Ш.** Анализ методов контроля шероховатости подложек для изделий электронной техники // Журнал прикладной физики. 2014. С. 25—29.

9. **Бурлаков И.Д., Денисов И.А., Сизов А.Л. и др.** Исследование шероховатости поверхности подложек CdZnTe различными методами измерения нанометровой точности // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 80—84.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении,
а также непосредственно на сайте издательства
ООО «Инновационное машиностроение».

УДК 004.89

Ю.Н. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.
(Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва)
jkondr@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Рассматриваются технологии построения информационно-аналитических систем и платформы для их реализации от ведущих производителей. Формулируются взаимосвязанные задачи, решение которых необходимо для комплексного применения технологий при создании прикладных информационно-аналитических систем. Иллюстрируется решение таких задач при создании системы для анализа деятельности предприятий.

Ключевые слова: информационно-аналитическая система; хранилище данных; аналитическая обработка в реальном времени; интеллектуальный анализ данных; структура данных; анализ деятельности предприятий.

Technologies of construction of information-analytical systems and platforms for implementation from leading manufacturers are considered. Related problems are formulated. The solution to these problems is necessary for the integrated use of technology in creating applications of information and analytical systems. Solution of these problems is shown when creating a system for the analysis of business activities.

Keywords: information-analytical system; data store; real-time analytical analysis processing; data mining; data structure; analysis of enterprises.

Повышение эффективности управления в значительной степени базируется на мониторинге, анализе и прогнозировании деятельности предприятий. Для успешного решения этих задач требуются информационные системы, обеспечивающие как структуризацию и хранение больших объёмов информации, так и гибкую постановку и формализацию задач с формированием информационных представлений соответственно решаемой задаче. Создание таких информационных систем должно основываться на эффективных решениях с использованием современных аналитических технологий. Представлен обзор таких технологий и платформ для их реализации и приведён пример реализации комплексной информационно-аналитической системы для анализа деятельности предприятий.

В настоящее время для создания информационно-аналитических систем используются комплекс технологий, включающий хранилища данных, оперативная аналитическая обработка или online analytical processing (OLAP), получение знаний (Data Mining) [1, 2]. Комплексы программных средств, реализующие перечисленные технологии, получили название средств бизнес-аналитики (Business Intelligence (BI)) и реализованы ведущими производителями программного обеспечения [3].

Инвариантная информационная архитектура для комплексного применения технологий включает подсистему сбора и очистки информации об экономических процессах и объектах экономической деятельности, хранилище данных с обработанной и структурированной информацией и предметно-ориентированными аналитическими OLAP-кубами, подсистему формирования моделей и прогнозирования экономических показателей с возможностью реализации сценарных моделей изменяющейся внешней среды "что — если", подсистему формирования динамических отчётов и презентаций вариантов анализа, в том числе с использованием Web-интерфейса [4, 5].

Рассмотрим кратко технологии создания информационно-аналитических систем.

Хранилище данных — это предметно-ориентированное, привязанное ко времени и неизменяемое собрание данных для поддержки процесса принятия управляющих решений. Данные в хранилище поступают из оперативных систем или Online Transaction Processing (OLTP-систем), которые предназначены для автоматизации бизнес-процессов [1]. Храни-

лище данных может пополняться также за счёт внешних источников, например стандартных отчётов о деятельности предприятий.

Необходимую для принятия решений информацию обычно собирают из нескольких транзакционных баз данных различной структуры и содержания. Основная проблема при этом состоит в несогласованности и противоречивости этих баз-источников, отсутствии единого логического взгляда на корпоративные данные. Решением этой проблемы является создание хранилища данных. В основе концепции хранилищ данных лежит идея интеграции ранее разъединённых детализированных данных, содержащихся в исторических архивах, накапливаемых в традиционных системах транзакционной обработки и поступающих из внешних источников в единую базу данных, их предварительное согласование и, возможно, агрегация [6].

Создание хранилищ данных имеет следующие предпосылки:

позволяют избежать разрозненности данных, хранимых в различных СУБД;

способны выполнять сложные аналитические запросы, не замедляя работу транзакционных систем;

позволяют осуществить очистку и согласование данных;

позволяют анализировать данные оперативных систем, получить которые напрямую невозможно или крайне затруднительно.

Задача хранилища — предоставление исходных данных для анализа в одном месте и в единой структуре. Таким образом, создание хранилища предполагает реализацию единого интегрированного источника данных.

Хранилища данных, структура которых наилучшим способом соответствует проведению всестороннего анализа, являются источниками данных для систем OLAP-анализа и интеллектуальной обработки данных (Data Mining). Структура хранилища создаётся из соединения таблиц измерений и фактов и строится на основе канонических схем "звезда" или "снежинка" [1]. Схема "снежинка" отличается от схемы "звезда" наличием хотя бы одного измерения, содержащегося в нескольких связанных таблицах (консольных таблицах). Использование схемы "снежинка" может позволить уменьшить дисковое пространство, требуемое для размещения хранилища, но снижает эффективность выполнения аналитических запросов. В центре каждой схемы находится таблица фактов, содержащая ключевые показатели, по которым проводится анализ. Таблица фактов соединена с несколькими таблицами измерений. При этом первичные ключи таблиц измерений мигрируют в таблицу фактов в качестве внешних ключей.

OLAP-технологии — технологии оперативного анализа многомерных данных, накопленных в хранилище. Проведение OLAP-анализа требует создания многомерного массива данных, называемого OLAP-кубом. Куб создаётся на основе реляционной структуры таблицы фактов и таблиц измерений хранилища данных и является многомерной структурой данных, полученной для всех возможных сочетаний значений из таблиц измерений и таблицы фактов.

Существуют три альтернативных типа архитектуры OLAP:

многомерная (Multidimensional OLAP — MOLAP);

реляционная (Relational OLAP — ROLAP);

гибридная (Hybrid OLAP — HOLAP).

Выбор между той или иной архитектурой подразумевает компромисс между быстродействием, объёмом занимаемого дискового пространства, уровнем защиты данных, возможностями индексации и другими параметрами.

Программные средства, реализующие OLAP-технологии, имеют следующие основные характеристики:

развитые инструменты доступа к данным хранилища;

динамическое интерактивное манипулирование данными (вращения, консолидации или детализации);

наглядное визуальное отображение данных;

быстрота — анализ осуществляется в реальном режиме времени;

многомерное представление данных — одновременный анализ ряда показателей по нескольким измерениям.

Клиентские OLAP-средства представляют собой приложения, обеспечивающие доступ и анализ многомерных данных. Примерами таких средств могут являться программные продукты общего назначения (MS Excel) или специальные программные средства (Microsoft ProClarity или PerformancePoint).

Data Mining — собирательное название, используемое для обозначения совокупности методов обнаружения в данных, ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных и доступных интерпретации знаний, необходимых для принятия решений [1]. Методы Data Mining целесообразно применять только имея развитое хранилище данных (до-

статочно большой объём предварительно очищенных и преобразованных данных).

Совокупность методов Data Mining направлена на решение широкого круга задач (построение прогнозных и регрессионных моделей, классификация и кластеризация объектов, поиск ассоциативных правил и др.), для которых существует большой набор алгоритмов [1]. В частности, для анализа деятельности предприятий перспективны задачи прогнозирования, классификации и кластеризации, которые могут решаться в рассматриваемой информационно-аналитической системе.

Сегмент платформ бизнес-аналитики — один из наиболее быстро развивающихся сегментов рынка программного обеспечения. По данным работы [7] по состоянию на 2013 г. лидерами в области рынка платформ бизнес-аналитики являются компании SAP, Oracle, SAS Institute, IBM и Microsoft, которые обеспечивают примерно 70 % рынка.

Платформы бизнес-аналитики разделяются на два вида. К первому относятся системы запросов, отчётов и аналитики для конечных пользователей (end-user query, reporting and analysis — QRA), а ко второму — продвинутые аналитические системы (advanced analytics). К advanced analytics относятся средства Data Mining и программное обеспечение для статистического анализа. Указанная функциональность может быть реализована как в виде отдельных самостоятельных программных продуктов, так и в виде аналитических средств, предоставляемых разработчиками систем управления базами данных (СУБД). Пример — Microsoft SQL Server Analysis Services, который использовался при разработке рассматриваемой системы.

Программные платформы бизнес-аналитики приведённых выше компаний имеют схожую основную функциональность, поэтому выбор в пользу той или иной из них основывается на таких характеристиках, как: тип архитектуры, модульность, поддержка различных стандартов, поддержка экспорта/импорта данных из других корпоративных программных продуктов, наличие специфических пакетов статистического и интеллектуального анализа. Эту категорию продуктов представляют фирмы Microsoft, Oracle, SAP [3].

Приведём краткое описание указанных платформ бизнес-аналитики.

Инструментальные средства Oracle обеспечивают полное интегрированное решение для создания хранилищ данных и использования накопленной в нём информации. В качестве среды хранения информации в реляционных хранилищах и витринах данных используют сервер Oracle Database. Центральным инструментальным средством создания хранилищ и витрин данных является Oracle Warehouse Builder, построенный на базе современной архитектуры Common Warehouse Metadata. Данный пакет предназначен для описания структуры хранилищ данных, проектирования и создания процедур извлечения, согласования и загрузки данных, а также генерации метаданных для средств доступа, например таких, как Discoverer [6].

Средства анализа данных охватывают весь спектр аналитических задач и поставляются в виде двух редакций Oracle Business Intelligence Standard Edition и Oracle Business Intelligence Enterprise Edition. Стандартная редакция ориентирована на небольшие и средние организации. В этом случае для стандартной отчётности используется Reports, для генерации нерегламентированных отчётов и запросов — Discoverer, для сложного многомерного анализа — Discoverer OLAP, Spreadsheet Add-In, BI Beans и Jdeveloper, а для задач интеллектуального анализа данных — Oracle Data Mining. Для крупных корпоративных систем используется Oracle Business Intelligence Suite Enterprise Edition — интегрированная платформа для бизнес-анализа, включающая, кроме стандартных средств отчётности и нерегламентированных запросов, инструменты построения интерактивных информационных панелей, решения для анализа данных в офлайн режиме, средства уведомления в реальном режиме времени и др.

Компания SAP AG предлагает набор программных средств бизнес-аналитики под названием SAP Netweaver Business Warehouse (SAP NetWeaver BW), в состав которого входят средства для создания хранилищ данных, оперативного многомерного и интеллектуального анализа данных [8]. SAP Business Information Warehouse (SAP BW) — средство организации хранилища данных, бизнес-моделирования, управления данными из различных источников. SAP BW представляет собой компонент SAP Business Intelligence и позволяет осуществлять управление хранилищами данных, бизнес-моделирование, извлечение, преобразование и загрузку данных. Одним из преимуществ SAP BW является возможность интеграции с большинством существующих источников данных (Oracle; MaxDB; MS SQL

Server; IBM DB2), UDConnect, SAP API, плоские файлы, веб-сервисы и др.

Основным средством OLAP-анализа в рамках платформы SAP NetWeaver BW является SAP BusinessObjects WebI. Данный программный продукт обладает функциональностью, позволяющей создавать и отображать срезы данных в табличной и графической форме, создавать отчёты. Особенностью BusinessObjects WebI является возможность подключения к различным источникам данных, таким как реляционные и многомерные базы данных, плоские файлы (например, электронные таблицы Excel и др.). Развитием BusinessObjects WebI стало решение SAP BusinessObjects Analysis for OLAP, обеспечивающее большую гибкость и функциональность при работе с OLAP-кубами.

SAP BW имеет развитые средства Data Mining, позволяющие создавать модели для различных методов интеллектуального анализа, таких как кластеризация, деревья решений, ассоциативный анализ, классификация и др.

Рассматриваемая система реализована на наборе средств фирмы Microsoft. Microsoft включила в состав SQL Server набор служб, связанных с бизнес-анализом, получившим название Microsoft Analysis Services. Этот набор включает в себя службы интеграции (Integration Services) и службы анализа (Analysis Services). Analysis Services, в свою очередь, включают в себя набор средств для работы с OLAP и интеллектуальным анализом данных. В качестве среды разработки OLAP-решений и моделей Data Mining целесообразно использование среды Business Intelligence Development Studio.

Среда Business Intelligence Development Studio является основной средой для разработки бизнес-решений, в состав которых входят проекты служб Analysis Services, Integration Services и Reporting Services. Каждый тип проектов содержит шаблоны для создания объектов, необходимых для решений бизнес-аналитики, и предоставляет различные типы конструкторов, средств и мастеров для работы с такими объектами [9].

Business Intelligence Development Studio позволяет проектировать пакеты извлечения, преобразования и загрузки данных из внешних источников с использованием SQL Server Integration Services (SSIS). При помощи различных средств может быть произведена промежуточная трансформация и статистическая обработка данных источника.

В состав среды Business Intelligence Development Studio входит шаблон проектов служб Analysis Services для разработки функций оперативного и интеллектуального анализа данных. В состав этого типа проектов входят шаблоны для кубов, измерений, вычисляемых показателей, источников данных, их представлений, ролей, а также средства для работы с этими объектами. Для определения вычисляемых элементов могут быть использованы арифметические операции, различные функции агрегации и статистического анализа данных.

Business Intelligence Development Studio имеет в своём составе развитые средства Data Mining, предназначенные для создания, просмотра и использования моделей интеллектуального анализа данных. В распоряжении разработчиков имеется набор стандартных алгоритмов для решения указанных выше задач классификации, кластеризации, регрессии и т.д., а также специальный язык DMX (Data Mining Extensions), позволяющий создавать модели интеллектуального анализа данных и использовать их в MS SQL Server. DMX включает в себя инструкции языка определения данных (DDL), инструкции языка обработки данных (DML), а также функции и операторы.

SQL Server и Visual Studio вместе предоставляют глубокий уровень интеграции между базой данных и средой разработки приложений.

Приведённая выше Microsoft ProClarity Analytics — составная часть платформы Microsoft Business Intelligence, представляет собой набор развитых инструментов для прикладных бизнес-аналитиков. ProClarity Analytics — модульное решение, основным компонентом которого является сервер аналитики (Analytics Server), позволяющий осуществлять выборку, анализ и отображение данных хранилища различными способами.

Сервер бизнес-логики (Business Logic Server) — модуль для создания сложных вычислений и ключевых показателей эффективности (Key Performance Indicators, KPI).

Клиентская часть ProClarity имеет набор интерфейсов для создания и публикации представления данных. Основным достоинством клиентской части ProClarity является инструмент "дерево декомпозиции" (Decomposition Tree), обеспечивающий графическое отображение комплексной, многоуровневой, многомерной структуры OLAP-куба для облегчения навигации и проведения анализа.

Создание информационно-аналитических систем на базе перечисленных платформ требует решения следующих задач:

анализ возможных источников информации для наполнения хранилища данных, создания прикладных аналитических систем;

разработки средств доступа к выбранным источникам информации, её обработки (анализ и удаление противоречивых и дублирующих данных, очистка данных от аномальных значений, выбросов и пропущенных значений, переразметка и др.), ввода в хранилище данных;

разработки структуры хранилища данных, включая создание измерений, иерархий, хранимых и вычисляемых показателей (в том числе ключевых показателей эффективности), аналитических многомерных кубов, архитектур их хранения, интерфейса аналитиков, соответствующего задачам прикладного анализа и информации в хранилище;

разработки структур данных для реализации задач и методов Data Mining, включая преобразование структуры данных хранилища в требуемые структуры анализа и поддержку иерархических структур вариантов аналитических задач;

разработки средств эффективного хранения, обновления и использования созданных в хранилище данных прогнозных и факторных моделей для реализации прикладного анализа.

Рассмотрим пример проекта для анализа данных о финансово-хозяйственной деятельности предприятий. Такой анализ является актуальным и может включать классификационный анализ, анализ факторов эффективности деятельности, прогнозы развития и устойчивости, оценку необходимости контрольных мероприятий и аудита. Структура проекта представлена на рис. 1.

Источниками данных для реализации проекта являются электронные таблицы, содержащие стандартные бухгалтерские отчёты по одному предприятию за один год.

Основными сущностями хранилища данных являются предприятия, строки баланса, время и бухгалтерские отчёты. Предусмотрена возможность проведения анализа по территориальной принадлежности предприятий и их видам деятельности. Для этого в базу данных (БД) введены справочники (общероссийские классификатор административно-территориального деления (ОКАТО) и классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД)).

Атрибутами основных сущностей рассматриваемой предметной области, отражённых в схеме хранилища данных, являются:

предприятие (название, коды ОКАТО и ОКВЭД, форма собственности);

год сдачи отчётности (код, текстовое представление);

строка баланса (номера строки и формы баланса, текстовое описание);

тип капитала (код, текстовое описание);

отчёты по формам 1, 2 (год сдачи, предприятие, строка баланса, значение на начало периода, значение на конец периода, примечание);

отчёты по форме 3 (год сдачи, предприятие, строка баланса, тип капитала, значение составляющей капитала, примечание).

Произведена декомпозиция отношения Строка баланса на отношения Форма баланса и Раздел баланса, позволяющая построить иерархию строк, разделов и формы баланса. Тип собственности предприятия вынесен в отдельный справочник.

На рис. 2 представлена разработанная схема хранилища данных, которое строится по схеме "снежинка".

Реализован набор процедур для загрузки данных в хранилище.

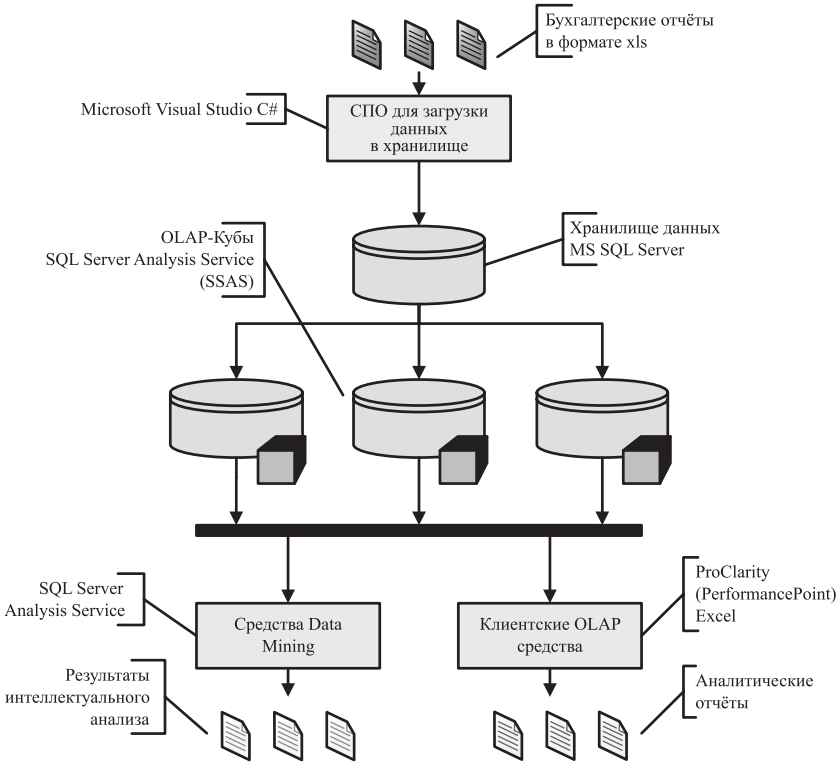

Рис. 1. Структура проекта для анализа финансово-хозяйственной деятельности предприятий на основе программных средств Microsoft (СПО — специальное программное обеспечение)

Таблицы Справочник ОКАТО и Справочник ОКВЭД заполняются при помощи скриптовых команд, адаптированных для работы в среде SQL Server Management Studio. Ввиду сложной структуры файлов с исходными данными (отчёты предприятия в формате Excel), затрудняющей использование утилит SSIS, для загрузки данных в хранилище таблиц измерений Предприятие, Строка баланса, а также таблицы фактов было разработано специальное программное обеспечение.

Созданное и заполненное хранилище данных используется в качестве источника данных для построения OLAP-кубов для целевого анализа предприятий. Примерами OLAP-кубов для целевого анализа являются:

бухгалтерский баланс + отчёты о прибылях и убытках (куб № 1);

отчёт об изменениях капитала (куб № 2).

Куб № 1 строится на основании форм 1 и 2 бухгалтерской отчётности и показан на рис. 3.

Куб № 2 строится на основании формы 3 и показан на рис. 4.

Оба куба имеют три общих измерения (время, предприятие, строка баланса). Кроме того, куб № 2 имеет четвёртое измерение — тип капитала, позволяющее осуществлять анализ по видам капитала (уставной, добавочный, резервный и суммарный капитал, а также нераспределённая прибыль). «Отчёты по формам 1 и 2», «Отчёты по форме 3» — таблицы фактов. «ОКАТО», «ОКВЭД», «Форма собственности», «Форма баланса», «Раздел баланса» — консольные таблицы. Используется приведённый выше тип архитектуры OLAP — MOLAP.

Как было сказано ранее, для качественного анализа деятельности экономических объектов необходимо наличие в хранилище данных вычисляемых ключевых показателей эффективности. В рассматриваемом проекте используется широкий набор показателей, характеризующих финансовую независимость, выручку, общую рентабельность, рентабельность продаж, оборачиваемость активов, фондоотдачу, уровни эффективности расходов. Индикаторные показатели определяются средствами языка MDX на основе вводимых и содержащихся в хранилище данных. Совокупность показателей позволяет проводить эффективный анализ хозяйственной деятельности. В табл. 1 приведены примеры используемых индикаторных показателей OLAP-кубов.

Приведённое хранилище данных наряду с OLAP-анализом может использоваться для более качественных исследований методами

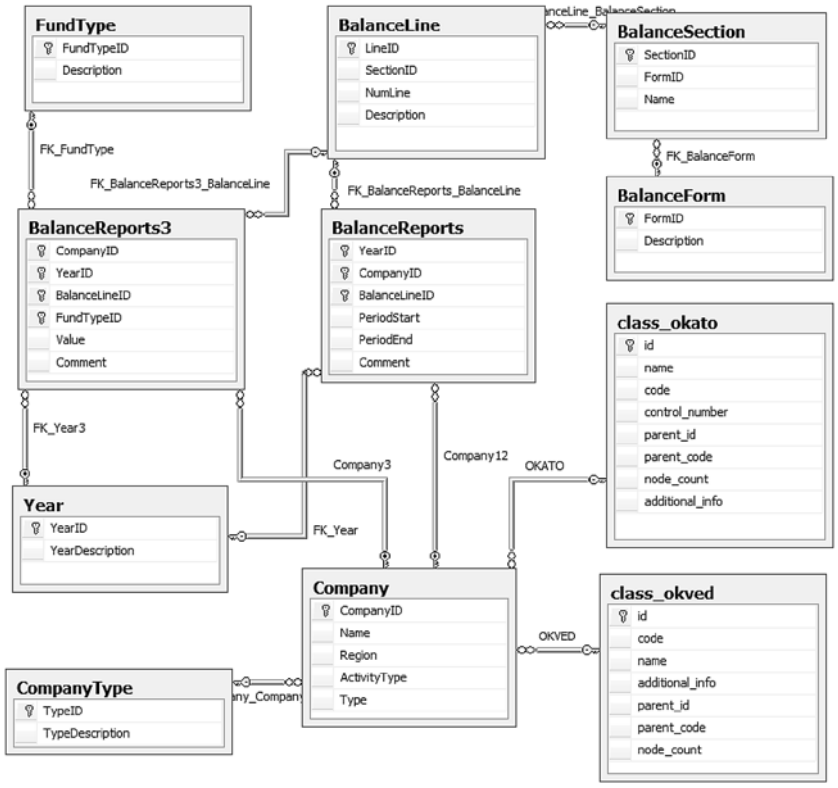

Рис. 2. Схема хранилища данных

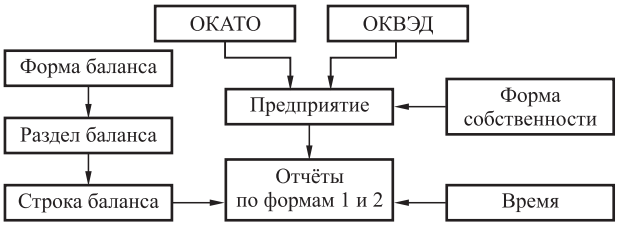

Рис. 3. OLAP-куб для анализа бухгалтерского баланса

Рис 4. OLAP-куб для анализа изменения капитала

Примеры используемых индикаторных показателей OLAP-кубов

Коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами	Определяется как отношение разницы собственных средств и внеоборотных активов к сумме оборотных активов
Коэффициент восстановления платёжеспособности	Фиксируется тренд коэффициента текущей ликвидности по значениям на начало и конец отчётного периода
Показатель финансовой независимости	Определяется как отношение собственных средств и статьи "Доходы будущих периодов" к общей величине пассива баланса
Коэффициент рентабельности	Определяется как отношение прибыли до налогообложения к совокупным доходам
Оценка общей рентабельности	Оценочное значение показателя (высокая / средняя/низкая/убыточная). От 21 % и выше — высокая, от 5 до 20 % — средняя, от 0 до 5 % — низкая, ниже 0 % — убыточная
Коэффициент рентабельности продаж	Определяется как отношение прибыли от продаж к величине выручки от реализации
Коэффициент фондоотдачи	Определяется как отношение выпущенной продукции к среднегодовой стоимости основных средств на начало года

Data Mining в следующих направлениях: формирование классификационных признаков предприятий, выявление взаимосвязи между отдельными показателями деятельности (неявные зависимости), построение прогнозных моделей (факторных и на основе временных рядов) показателей деятельности и др.

Применение методов Data Mining требует формирования соответствующих представлений для конкретных задач (выборка данных из хранилища и представление их в соответствующей задаче канонической форме). Например, для прогнозирования необходимо формирование временного ряда, где ключевыми значениями являются соответствующие временные метки. В частности, следует отметить, что иерархия измерения "Время" позволяет формировать различные прогнозные модели для детальных и агрегированных данных (например, месячные, квартальные, годовые прогнозные модели). Для проведения классификационного анализа ключевыми значениями будут ID-предприятия с возможными различными наборами показателей. Обобщая, можно сказать, что структура данных хранилища не соответствует структуре данных конкретных задач и методов Data Mining, требуя нетривиальных операций преобразования структур данных с использование языков SQL и DMX.

Приведём пример запроса для создания представления, соответствующего структуре данных задачи кластеризации, на основе рассмотренного хранилища данных:

Use EnterpriseIndicators;

SELECT CompanyID, Name, YearDescription, [110] AS ‘Нематериальные активы’,

[120] AS ‘Основные средства’, [130] AS’Незавершённое строительство’,

[135] AS ‘Доходные вложения в материальные ценности’,

[140] AS ‘Долгосрочные финансовые вложения’,

[145] AS ‘Отложенные налоговые активы’,

[150] AS ‘Прочие внеоборотные активы’,

[190] AS ‘Итого по разделу 1’,

[210] AS ‘Запасы’, [211] AS ‘в том числе сырье и материалы’,

[212] AS ‘животные на выращивание и откорме’,

[213] AS ‘затраты в НЗП’, [214] AS ‘готовая продукция и товары’,

[215] AS ‘товары отгруженные’, [216] AS ‘РБП’, [217] AS ‘прочие запасы и затраты’, [220] AS ‘НДС’, [230] AS ‘ДЗ долгосрочная’, [240] AS ‘ДЗ краткосрочная’,

[241] AS ‘покупатели и заказчики’,

[244] AS ‘задолженность участников по взносам в УК’,

[250] AS ‘Краткосрочные финансовые вложения’, [260] AS ‘Денежные средства’, [270] AS ‘Прочие оборотные активы’, [290] AS ‘Итого по разделу 2’,

[300] AS ‘Итого актив:’, [410] AS ‘Уставный капитал’,

[411] AS ‘Собственные акции, выкупленные у акционеров’, [420] AS ‘Добавочный капитал’, [421] AS ‘Имущество, полученное в хозяйственное ведение’, [430] AS ‘Резервный капитал’,

[460] AS ‘Целевое финансирование и поступления’, [470] AS ‘Нераспределённая прибыль’, [490] AS ‘Итого по разделу 3’, [510] AS ‘Займы и кредиты долгосрочные’,

[515] AS ‘Отложенные налоговые обязательства’,

[520] AS ‘Прочие долгосрочные обязательства’, [590] AS ‘Итого по разделу 4’,

[610] AS ‘Займы и кредиты краткосрочные’, [620] AS ‘КЗ краткосрочная’,

[621] AS ‘поставщики и подрядчики’, [622] AS ‘перед персоналом’,

[623] AS ‘перед внебюджетными фондами’, [624] AS ‘по налогам и сборам’,

[625] AS ‘прочие кредиторы’,

[630] AS ‘Задолженность перед участниками по выплате доходов’,

[640] AS ‘Доходы будущих периодов’,

[641] AS ‘Целевое бюджетное финансирование’,

[650] AS ‘Резервы предстоящих расходов’,

[660] AS ‘Прочие краткосрочные обязательства’, [690] AS ‘Итого по разделу 5’, [700] AS ‘Итого пассив:’, [910] AS ‘Арендованные основные средства’,

[911] AS ‘в том числе по лизингу’,

[920] AS ‘Товарно-материальные ценности, принятые на ответственное хранение’, [930] AS ‘Товары, принятые на комиссию’,

[940] AS ‘Списанная в убыток задолженность неплатёжеспособных дебиторов’, [950] AS ‘Обеспечения обязательств и платежей полученные’,

[960] AS ‘Обеспечения обязательств и платежей выданные’,

[970] AS ‘Износ жилищного фонда’,

[980] AS ‘Износ объектов внешнего благоустройства и других аналогичных объектов’,

[990] AS ‘Нематериальные активы, полученные в пользование’,

[991] AS ‘Основные средства, сданные в аренду’,

[992] AS ‘Бланки строгой отчётности’, [1000] AS ‘Материалы, принятые в переработку’

```
INTO ForDataMining
FROM
(SELECT BalanceReports.CompanyID, Company.Name, BalanceReports.YearID, Year.YearDescription, BalanceReports.BalanceLine,
BalanceReports.PeriodEnd
FROM BalanceReports INNER JOIN
BalanceLine ON BalanceReports.BalanceLine = BalanceLine.NumLine INNER JOIN
Company ON BalanceReports.CompanyID = Company.CompanyID INNER JOIN
Year ON BalanceReports.YearID = Year.YearID) p
PIVOT
(
sum (PeriodEnd)
FOR BalanceLine IN
([110],[120],[130],[135],[140],[145],[150],[190],[210],[211],[212],[213],[214],[215],
[216],[217],[220],[230],[240],[241],[244],[250],[260],[270],[290],[300],[410],[411],
[420],[421],[430],[460],[470],[490],[510],[515],[520],[590],[610],[620],[621],[622],
[623],[624],[625],[630],[640],[641],[650],[660],[690],[700],[910],[911],[920],[930],
[940],[950],[960],[970],[980],[990],[991],[992],[1000])
) AS pvt ORDER BY pvt.CompanyID;
```

Результат выполнения запроса приведён на рис. 5.

Формирование приведённого запроса для создания представления не может быть вы-

	CompanyID	YearDescripti...	Нематериальные акти...	Основные средст...	Незавершенное строительс...
28	22	2007	41	34155	11
29	23	2007	NULL	278411	6301492
30	24	2007	NULL	99409	NULL
31	25	2007	26	19679	NULL
32	26	2007	NULL	3949	646
33	27	2007	18	24316	121
34	27	2008	30	24351	NULL
35	28	2007	1429	2614033	482580
36	28	2008	1516	2485627	792620
37	29	2007	NULL	97650	NULL
38	30	2007	910	52729952	19618304
39	31	2007	12	101279	NULL
40	31	2008	9	101970	NULL
41	32	2007	NULL	14577714	135750
42	33	2007	34	121608	331
43	33	2008	30	184308	4396
44	34	2007	4	813783	19959
45	34	2008	3	1105973	36601

Рис. 5. Результат выполнения запроса для формирования структуры данных задачи кластеризации

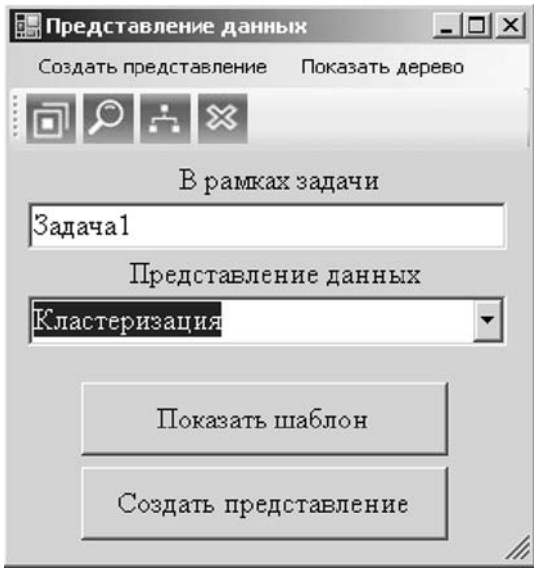

Рис. 6. Пример интерфейса Мастера для создания структуры данных задач и методов Data Mining на основе хранилища данных

полнено прикладными аналитиками в связи с необходимостью знания языка SQL и реляционной структуры хранилища данных. Целесообразно создание шаблонов представлений соответственно структурам задач и методов Data Mining, которые могут заполняться с использованием специальных Мастеров (Визардов) прикладными аналитиками. Такие шаблоны разработаны в рассматриваемой системе. Пример интерфейса показан на рис. 6.

Следует отметить, что MS SQL Server Analysis Services (SSAS), который используется в качестве платформы данного проекта, имеет набор средств для создания структур и моделей Data Mining, управления моделями и их использования. Эти средства реализуются клиентскими средствами (MS Excel) или в приложениях (на языке DMX). Поддерживается двухуровневая структура "структура анализа" — "модель" (для каждой канонической структуры можно создать несколько моделей). Однако такая структура недостаточна для отображения возможных вариантов аналитических исследований.

В рассматриваемом проекте реализована расширенная иерархическая структура хранения и обработки информации для задач и методов Data Mining. Структура имеет следующие уровни: прикладная задача, представление данных, выборка, наложенный фильтр и/или переразметка, структура анализа, модель, вариант алгоритма, параметры алгоритма. Такая структура более адекватна процессу решения аналитических задач и позволяет повысить эффективность их решения прикладными аналитиками. Имеется возможность сравнения качества создаваемых моделей и фиксации "лучшей" для дальнейшего использования при анализе деятельности предприятий.

Система позволяет проводить всесторонний анализ деятельности предприятий на основе комплексного применения аналитических технологий. Принципы реализации проекта и его компонент могут быть использованы при создании широкого круга информационных систем для анализа и прогнозирования деятельности экономических объектов.

Библиографические ссылки

1. **Барсегян А.А.** и др. Анализ данных и процессов. 3-е изд. СПб: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.

2. **Кондрашов Ю.Н.** Современные технологии интеллектуальной обработки информации: учеб. пособие. М.: Академия бюджета и казначейства, 2007. 162 с.

3. **Артемьев А.А.** Что такое Business Intelligence? // Открытые системы. № 4, 2003. С. 34—46.

4. **Кондрашов Ю.Н.** Инвариантная информационная архитектура для организации системных исследований в экономике. Материалы III Межд. науч.-практич. конф. «Системный анализ в экономике—2014». Т. 1. М.: ЦЭМИ РАН, 2015, С. 179—181.

5. **Кондрашов Ю.Н.** Архитектура информационных систем мониторинга, анализа и прогнозирования деятельности экономических объектов. Материалы межд. науч. конф. «Информационные технологии в финансово-экономической сфере: прошлое, настоящее, будущее». М: Изд-во ООО «1С-Паблишинг». 2013. С. 182—185.

6. **Хранилища** данных и аналитические системы // Технологии и инструментальные средства корпорации Oracle, 2007, 19 с.

7. **Magic** Quadrant for Business Intelligence and Analytics Platforms 2015 Gartner, Inc. http://www.gartner.com (дата обращения: 05.02.2016).

8. **SAP** BusinessObjects Web Intelligence Users Guide 2012 (дата обращения: 21.01.2016).

9. **Ларсон Б.** Разработка бизнес-аналитики в Microsoft SQL Server. СПб.: Питер. 2008, 684 с.