

Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Главный редактор

Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

- Бучаченко А.Л. — д.х.н., проф., ИПХФ РАН
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (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)
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»
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
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., 2А.

Тел.: (495) 661-38-80.

E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;

<http://www.mashin.ru>

4

2015

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 "Машиностроение"

Адрес издательства:

107076, Москва,

Стромынский пер., 4.

Тел.: (499) 268-38-58.

Факс: (499) 269-48-97.

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Усков А.А., Жукова А.Г. Оценка сложности восприятия IDEF-моделей 3

Ухова М.В., Мандрик А.В. Организация сбора, хранения и обработки информации на объектах электроэнергетики в соответствии со стандартом IEC 61850 7

Микаева С.А., Гальцова Е.М., Зимин Д.И. Оценка условий освещения, создаваемого светодиодными источниками излучения, по уровню зрительной работоспособности 11

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Долотовский И.В., Ленкова А.В. Оптимизация топливной системы энергетического комплекса газоперерабатывающих предприятий 15

Сутина Т.А., Родионов В.В., Семёнов П.К. Концептуальная модель автоматизированной системы управления картированием потока создания ценности 20

Богомолов А.В., Драган С.П. Автоматизированный мониторинг и технологии обеспечения акустической безопасности персонала. 25

Неусыпин К.А., Чан Нгок Хыонг. Формирование сигналов коррекции автономных инерциальных навигационных систем 30

Афанасьев А.Н., Хородов В.С. Разработка и моделирование распределённой системы проектирования VHDL-объектов 34

ЭКОНОМИКА

Варнавский А.Н., Миронов В.В. Моделирование зависимости "цена/качество" от параметров трудовой деятельности оператора человеко-машинной системы 41

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

Uskov A.A., Zhukova A.G. Complexity perception valuation of the IDEF-models 3

Ukhova M.V., Mandrik A.V. Organization of the information collection, storage and processing on power industry objects in accordance with standard IEC 61850 7

Mikaeva S.A., Galtsova E.M., Zimin D.I. Light condition valuation created by LED radiation in accordance with visual efficiency 11

MODERN TECHNOLOGIES

Dolotovskiy I.V., Lenkova A.V. Fuel system optimization of the gas processing plants energy complex. 15

Suetina T.A., Rodionov V.V., Semenov P.K. Conceptual model of the automatic control system for the valuable creation flow mapping. 20

Bogomolov A.V., Dragan S.P. Automatic monitoring and technology of the personnel acoustic safety ensuring 25

Neusypin K.A., Chan Ngok Khyong. Correction signals forming of the autonomous inertia navigation systems 30

Afanasev A.N., Khorodov V.S. Development and modeling of the VHDL-object designing distributed system 34

ECONOMIC

Varnavskiy A.N., Mironov V.V. Modeling of the dependence "price/quality" from the operator labor activity parameters of the man-machine system 41

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

Сдано в набор 02.02.2015.

Подписано в печать 24.03.2015.

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 «Авансед солюшнз».

119071, г. Москва, Ленинградский 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



УДК 004.94

А.А. Усков, д-р техн. наук, проф., А.Г. Жукова
(Российский университет кооперации, г. Мытищи)

prof.uskov@gmail.com

ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ ВОСПРИЯТИЯ IDEF-МОДЕЛЕЙ

Предложен подход к оценке сложности IDEF-моделей, основанный на эмпирических закономерностях обработки информации человеком. Введён в рассмотрение коэффициент сложности восприятия IDEF-моделей и методика его определения.

Ключевые слова: IDEF-модель; SADT-модель; CASE-технология; визуальная модель; сложность восприятия.

An approach to complexity valuation of the IDEF-models based on empirical regularities of human information processing is proposed. Complexity perception coefficient of the IDEF-models and its determination methodology are introduced for consideration.

Key words: IDEF-model; SADT-model; CASE-technology; visual model; the perception.

Введение. Методологии построения визуальных моделей семейства IDEF (Integrated Computer-Aided Manufacturing) широко используются в CASE-средствах при моделировании и реинжиниринге технологических и бизнес-процессов [1–3].

Наиболее известными и востребованными методологиями семейства IDEF являются [2, 3]:

IDEF0 (SADT) — методология функционального моделирования;

DFD — методология диаграмм потоков данных;

IDEF3 — методология моделирования процессов.

Все перечисленные методологии используют принцип иерархического группирования моделей: диаграмма верхнего уровня содержит общее описание системы, которое затем детализуется на диаграммах декомпозиции.

Для одного и того же сложного объекта или процесса может быть построено большое количество различных вариантов IDEF-моделей. Выбор того или иного варианта определяется субъективным мнением разработчика модели. Поэтому полезным представляется введение объективных критериев, которые бы позволили сравнивать различные варианты построения моделей, что даст возможность останавливаться на наилучшем варианте.

Ниже предлагается критерий — минимум коэффициента сложности восприятия (КСВ) визуальной модели, основанный на эмпирических закономерностях восприятия инфор-

мации человеком. Описана методика определения КСВ на основе матриц структуры и связей для конкретных IDEF-моделей.

Коэффициент сложности восприятия IDEF-моделей. Введём в рассмотрение КСВ визуальных моделей положительный действительный показатель, значение которого тем больше, чем большую сложность для восприятия человеком представляет модель.

Для определения КСВ примем следующие допущения:

изучение IDEF-модели пользователем (человеком) производится последовательно: блоки диаграммы верхнего уровня, связи (входы и выходы блоков) диаграммы верхнего уровня, переход на следующий уровень декомпозиции, изучение блоков и связей диаграмм данного уровня, переход на следующий уровень декомпозиции и т.д.;

на каждом шаге изучения модели информация усваивается небольшими порциями в кратковременной памяти, после чего переходит в долговременную [4, 5];

объём кратковременной памяти человека ограничен (кошелек Миллера) [4, 5]. Имеется связь между числом информационных единиц, сохраняемых в кратковременной памяти, и энергетическими затратами на запоминание (табл. 1) [5].

Достаточно точной аппроксимацией зависимости $Q(n)$ является функция:

$$Q(n) = \exp(0,4n) - 1; \quad (1)$$

Таблица 1

Связь между числом информационных единиц и энергетическими затратами на запоминание $Q(n)$

n (число информационных единиц)	3	7	10	13	15
Q	1	15	50	200	400

Таблица 2

Коэффициенты сложности восприятия для элементов модели

Описание элемента	Число информационных единиц	КСВ согласно формуле (1)
Блок на контекстной диаграмме	1	0,492
Связи блока A0	8	23,533
Блоки на диаграмме декомпозиции A0	3	2,320
Связи блока A1	5	6,389
Связи блока A2	4	3,953
Связи блока A3	5	6,389
Суммарный КСВ, QS		43,076

под сложностью восприятия визуальной модели будет пониматься среднее время, необходимое на запоминание модели человеком. Предположим, что время запоминания прямо пропорционально энергетическим затратам на запоминание, т.е. энергетические затраты в относительных единицах на хранение информационного объекта в кратковременной памяти можно принять за КСВ этого информационного объекта;

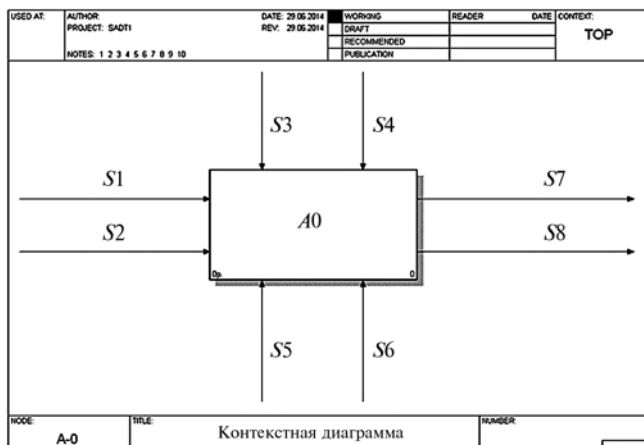


Рис. 1. Контекстная диаграмма: A0 — функциональный блок; S1—S8 — интерфейсные дуги

общий КСВ IDEF-модели определяется как сумма КСВ отдельных элементов модели — информационных блоков, содержащих информацию о наименованиях блоков каждой диаграммы и связей каждого блока:

$$QS = \sum_{i=1}^M Q_i, \quad Q_i = \exp(0,4n_i) - 1, \quad (2)$$

где M — общее число информационных объектов; n_i — размер i -го информационного объекта.

Рассмотрим пример расчёта КСВ функциональной модели IDEF0 (SADT). Для моделей DFD и IDEF3 процедура определения КСВ не будет содержать принципиальных отличий.

Имеется модель с диаграммой верхнего уровня (контекстной диаграммой), приведённой на рис. 1, и диаграммой декомпозиции (рис. 2).

Данные для расчёта КСВ согласно формулам (2) приведены в табл. 2.

Таким образом, согласно данным, приведённым в табл. 2, коэффициент сложности восприятия для рассматриваемой модели $QS = 43,076$.

Матричная форма расчёта коэффициента сложности восприятия IDEF-моделей. Для реализации автоматического расчёта КСВ моделей в CASE-средствах представим IDEF-модель в виде многомерных массивов данных (многомерных матриц) [6, 7]. Как и ранее, без потери общности, все выкладки будут приведены на примере методологии IDEF0 (SADT).

Рассмотрим модель со структурой иерархии блоков (деревом узлов), приведённой на рис. 3.

На рис. 4 приведены диаграммы декомпозиции 2-го уровня, а на рис. 5 — 3-го уровня.

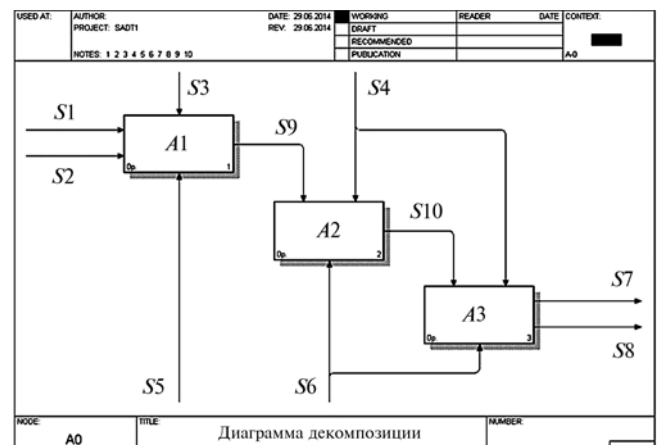


Рис. 2. Диаграмма декомпозиции уровня 1: A1—A3 — функциональные блоки; S1—S10 — интерфейсные дуги

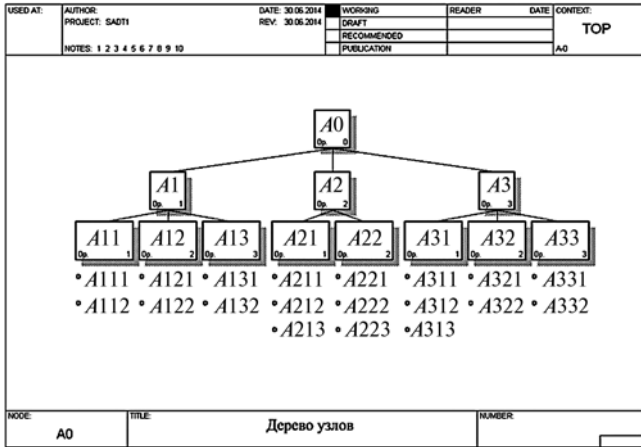


Рис. 3. Диаграмма дерева узлов:
A0—A313 — функциональные блоки

Таблица 3

Фрагмент элементов массива связей В

Блок	Элемент массива В	Значение
A0	V_{000}	8
A1	V_{100}	5
A2	V_{200}	4
A3	V_{300}	5
A11	V_{110}	5
A12	V_{120}	4
A13	V_{130}	4
...

Ведём в рассмотрение многомерный массив (матрицу) связей модели В. Размерность данного массива соответствует числу уровней декомпозиции модели. Элементы массива нумеруются 0, 1, 2,

Элемент массива связей $V_{i_0 i_1 i_2 \dots i_n}$ равен числу связей для блока модели $A_{i_0 i_1 i_2 \dots i_n}$ (если блок A имеет более короткую последовательность индексов, то справа дополняются нули, если

блок с такими индексами отсутствует, значение элемента массива принимается равным 0).

Для рассматриваемой модели фрагмент значений элементов массива связей В приведён в табл. 3.

Приведём полностью массив связей модели, используя матрицы двумерных сечений [6, 7]:

$$V_{i_0 i_1 0} = \begin{bmatrix} 8 & 5 & 4 & 5 \\ 0 & 5 & 4 & 4 \\ 0 & 3 & 4 & 0 \\ 0 & 3 & 5 & 4 \end{bmatrix}; V_{i_0 i_1 1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 4 & 4 \\ 0 & 3 & 3 & 0 \\ 0 & 4 & 5 & 4 \end{bmatrix};$$

$$V_{i_0 i_1 2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 3 \\ 0 & 3 & 5 & 0 \\ 0 & 5 & 4 & 3 \end{bmatrix}; V_{i_0 i_1 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 4 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Перейдём к рассмотрению массива структуры модели С. Размерность данного массива на единицу меньше, чем число уровней декомпозиции. Нумерация индексов элементов массива начинается с единицы: 1, 2, 3...

Элемент массива структуры $C_{i_1 i_2 \dots i_n}$ равен числу блоков на диаграммах нижнего уровня $A_{i_1 i_2 \dots i_n}$.

Для рассматриваемой модели с деревом узлов, показанным на рис. 3, массив структуры имеет вид:

$$C = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 0 \\ 3 & 2 & 2 \end{bmatrix}.$$

Согласно методологии IDEF [1—3] любой блок модели должен иметь связи, и соответствующий ему элемент массива связей будет ненулевым. Таким образом, массив структуры модели можно определить на основе массива связей модели.



Рис. 4. Диаграмма декомпозиции уровня 2:
A11—A33 — функциональные блоки; S1—S15 — интерфейсные дуги

Массив структуры можно определить из массива связей следующим образом:

$$C = zn(\mathbf{B}_{i_1 i_2 \dots i_n 1}, \mathbf{B}_{i_1 i_2 \dots i_n 2}, \mathbf{B}_{i_1 i_2 \dots i_n 3}, \dots),$$

где $i_1, i_2, \dots, i_n \in \{1, 2, 3, \dots\}$, $zn(\cdot)$ — функция, возвращающая массив той же размерности, что и размерности массивов аргументов, значения элементов возвращаемого массива — число ненулевых элементов в массивах-аргументах с теми же индексами, что и возвращаемый элемент.

Рассмотрим расчёт КСВ модели на основе заданных массивов структуры и связей.

Для простоты остановимся на модели с тремя уровнями иерархии.

КСВ для структуры Q_{st} — суммарный КСВ для блоков всех диаграмм.

Для диаграммы верхнего уровня с учётом (2):

$$Q_0 = Q(1). \tag{3}$$

Для диаграммы декомпозиции первого уровня с учётом (2):

$$Q_1 = Q(n_1) = Q(\text{length}(\mathbf{C})), \tag{4}$$

где n_1 — число блоков на диаграмме декомпозиции первого уровня; $\text{length}(\mathbf{C})$ — число строк матрицы \mathbf{C} .

Для диаграмм декомпозиции второго уровня с учётом (2):

$$Q_2 = \sum_{i_1=1}^{n_1} Q(n_{2i_1}) = \text{sum}(Q(zn(\mathbf{C}))), \tag{5}$$

где n_1 — число диаграмм на втором уровне декомпозиции; n_{2i_1} — число блоков на диаграмме A_{i_1} второго уровня декомпозиции; $zn(\mathbf{C})$ — функция, возвращающая вектор с числом ненулевых элементов в строках матрицы \mathbf{C} (точка после \mathbf{C}) означает покомпонентное вычисление функции.

Для диаграмм декомпозиции третьего уровня с учётом (2):

$$Q_3 = \sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} Q(C_{i_1, i_2}) = \text{sum}(Q(\mathbf{C})), \tag{6}$$

где C_{i_1, i_2} — число блоков на диаграммах A_{i_1, i_2} .

Общий КСВ модели определяется суммой Q_0 (3), Q_1 (4), Q_2 (5), Q_3 (6):

$$Q_s = Q(1) + \text{sum}(Q(zn(\mathbf{C}))) + \text{sum}(Q(\mathbf{C})). \tag{7}$$

КСВ для связей Q_{sv} — суммарный коэффициент сложности восприятия связей всех блоков запишем в виде:

$$Q_{sv} = \text{sum}(Q(\mathbf{B})). \tag{8}$$

Общий КСВ модели:

$$Q_s = Q_{st} + Q_{sv} \tag{9}$$

Для рассматриваемого примера при подстановке численных значений в формулы (7)—(9) получим $Q_{st} = 21,766$, $Q_{sv} = 82,839$, $Q_s = 104,605$.

Заключение. Предложенный подход к оценке сложности восприятия IDEF-моделей может применяться

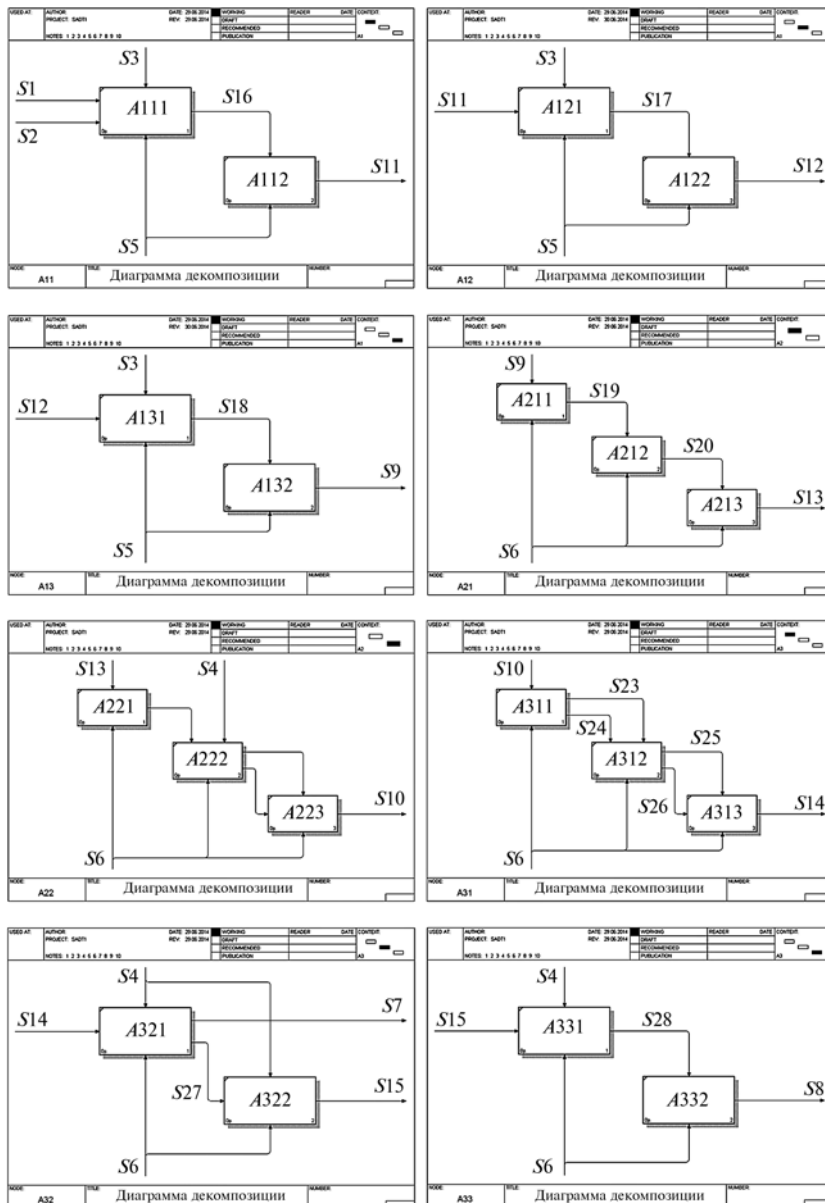


Рис. 5. Диаграммы декомпозиции уровня 3: A111—A332 — функциональные блоки; S1—S28 — интерфейсные дуги

как при непосредственной реализации моделей, так и CASE-средств, их использующих [8]. На основе положений, приведённых выше, разработаны алгоритмы и реализующие их программные приложения [9], которые позволяют в процессе взаимодействия с пользователем в диалоговом режиме строить оптимальные, с точки зрения сложности восприятия, иерархические визуальные IDEF-модели.

Библиографические ссылки

1. **Sommerville I.** Software Engineering (9th Edition). Boston — Columbus — Indianapolis — New York: Addison-Wesley, 2011. 790 p.
2. **Вендров А.М.** Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 2006. 544 с.

3. **Черемных С.В., Семёнов И.О., Ручкин В.С.** Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум. М.: Финансы и статистика, 2006. 192 с.
4. **Саймон Г.** Науки об искусственном. М.: Едиториал УРСС, 2004. 144 с.
5. **Bick C., Rabinovich M.I.** Dynamical Origin of the Effective Storage Capacity in the Brain's Working Memory // Physical Review Letters. 2009. 103. 218101.
6. **Крон Г.** Тензорный анализ сетей. М.: Сов. радио, 1978. 720 с.
7. **Соколов Н.П.** Введение в теорию многомерных матриц. Киев: Наукова думка, 1972. 177 с.
8. **Усков А.А., Жукова А.Г.** Матричное представление иерархических визуальных моделей для CASE-средств // Информационные технологии. 2014. № 11. С. 36—39.
9. **Усков А.А., Жукова А.Г., Кондратова Н.В.** Программный модуль "Оценка коэффициента сложности восприятия визуальных моделей" / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) № 2014618234 от 13.08.2014.

УДК 621.311.1

М.В. Ухова, А.В. Мандрик, канд. техн. наук
(ООО "Системы телемеханики" г. Протвино Московской области)
maria-pochta@mail.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ СБОРА, ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В СООТВЕТСТВИИ СО СТАНДАРТОМ IEC 61850

Разработано серверное программное обеспечение в соответствии с требованиями стандарта IEC 61850. Особое внимание уделено архитектуре программного обеспечения и организации хранения данных. Приведены результаты испытаний.

Ключевые слова: IEC61850; цифровая подстанция; сервер; архитектура.

The server software in accordance with the requirements of IEC 61850 is developed. Special attention is paid to software architecture and data warehousing. The tests results are adduced.

Key words: IEC61850; digital substation; server architecture.

На протяжении последних десятилетий во многих странах разрабатываются и успешно внедряются системы автоматизации электрических подстанций. Однако процесс построения интегрированных систем в данной области замедлялся отсутствием унифицированных протоколов обмена данными. Каждый производитель разрабатывал собственный комплекс программных либо программно-аппаратных средств. Для информационного обмена применялось множество отраслевых протоколов (Гранит, ТМ-120, АИСТ, РПТ-80, МТК-1 и т.д.).

Первым весомым вкладом в решение проблемы унификации стало внедрение базового набора протоколов, определённых в стандарте IEC 60870-5 (101, 104), что позволило стандартизировать информационные потоки между территориально-распределёнными объектами энергосистемы.

Следующий шаг — процесс унификации систем связи внутри подстанции. Его результатом явилась первая редакция стандарта IEC 61850, опубликованная в 2003 г. Вслед за появлением стандарта началась разработка

оборудования для цифровых подстанций на основе данного стандарта. Немаловажной задачей в этом направлении является концентрация собранной информации и обеспечение её долговременного хранения на сервере.

Стандарт IEC 61850 определяет требования к построению систем управления и мониторинга электрических сетей от уровня сбора до отображения, методику тестирования, технологию передачи данных и является основой построения цифровой подстанции. Основной особенностью и отличием стандарта IEC 61850 от других стандартов является то, что в нём регламентируются не только вопросы передачи информации между отдельными устройствами, но и вопросы формализации описания схем подстанции, схем защиты, автоматики и измерений, конфигурации устройств [1].

Первая глава стандарта кратко описывает основные принципы: трёхуровневую архитектуру энергетической системы, связь между несколькими подстанциями, перечень интерфейсов и их назначение, объектную модель, концепцию моделирования данных, правила описания конфигурации. Во второй главе приведены основные термины и определения. Третья глава определяет требования к физическому оборудованию: условия работы, надёжность, совместимость оборудования и т. д. Четвёртая — описывает системный инжиниринг и управление проектами. В данном разделе определены участники проекта и этапы его выполнения, распределение функций между программными и аппаратными средствами системы.

Пятая глава стандарта конкретизирует трёхуровневую иерархию системы, логические узлы объектной модели, их назначение, классификацию и взаимодействие. Важным требованием стандарта является быстродействие и производительность энергосистемы. Время передачи сигнала складывается из кодирования, передачи по сети и декодирования. Стандартом нормируются допустимые временные задержки по видам сигналов. Шестая глава содержит описание формата файлов для конфигурации устройств. Конфигурация обеспечивает обмен данными между устройствами. Для создания конфигурационных файлов определён язык SCL и чёткие правила создания конфигурационных файлов. Стандарт предполагает автоматизированную возможность конфигурирования.

Седьмая глава стандарта посвящена структуре коммуникаций. В разделе описывается методика и принципы передачи данных, их мо-

делирование. Приведены схемы классов с описанием возможных классов данных и их атрибутов. В соответствии со стандартом передача данных осуществляется по технологии клиент—сервер. Сервисы передачи данных и структура коммуникаций приведены в общем виде. В главе восемь более подробно описываются методы обмена данными в системе. Протокол MMS характеризуется относительно большими временными задержками и используется для не критичных задач, таких как сбор телесигнализации и телеизмерения, команд телеуправления, отправки отчётов. Протокол GOOSE работает с гораздо меньшими временными задержками и применяется для передачи таких важных команд, как включение/отключение выключателя. В главе девять описывается передача мгновенных значений, которые применяются, например, для передачи измерений трансформаторов тока и напряжения. В данной главе уделяется внимание резервированию. В главе десять дано описание методики тестирования работоспособности системы и предмет соответствия всем требованиям стандарта.

Переход на цифровые технологии в автоматизированных системах управления энергетикой начался более пятнадцати лет назад и перешёл в стадию практических разработок.

Внедрение в российскую электроэнергетическую отрасль методик, технологий и устройств, опирающихся на стандарт IEC 61850, обусловлено нормативными документами ФСК ЕЭС. Например, приложением к распоряжению ОАО "ФСК ЕЭС" от 28.04.2012 № 286р "Рекомендации по применению основных структурных схем и требования к организации и функциям АСУ ТП подстанций 110—750 кВ с учётом функциональной достаточности и надёжности".

Известные производители аппаратуры релейной защиты и автоматики (РЗА), такие как АBB, SIEMENS, ALSTOM, GE, SEL, ЭКРА, ИЦ "Бреслер" уже декларируют поддержку стандарта IEC 61850.

Каждый производитель оборудования предлагает свои собственные решения по сбору и обработке данных. Но, к сожалению, на рынке практически отсутствуют надёжные готовые решения для подстанций, удовлетворяющих стандарту IEC 61850. Во всём мире разрабатывается оборудование и программное обеспечение для цифровых подстанций.

Характерной чертой цифровой подстанции является использование микропроцессорного оборудования и передача цифровых сигналов.

Разработка цифровой подстанции на основе стандарта IEC 61850 позволяет унифицировать передачу данных, конфигурирование и использовать приборы различных производителей. Переход на цифровые сигналы позволит сократить кабельное хозяйство, повысить уровень точности измерений, даст возможность отслеживания состояния каналов связи и диагностики всей системы на расстоянии, повысит уровень информационной безопасности. При дальнейшем развитии возможен переход к интеллектуальным (необслуживаемым) подстанциям.

Отечественным аналогом таких систем является разрабатываемая в компании ООО "Систел" (г. Протвино Московской области) система сбора данных для цифровых подстанций, которая заменяет три используемые ранее: управления и контроля работы релейной защиты и автоматики, телемеханики, учёта. Сервер цифровой подстанции разрабатывается в соответствии с требованиями стандарта IEC 61850. При этом может являться "шлюзом" для преобразования данных, полученных от приборов, работающих по более ранним протоколам, в формат предусмотренный IEC 61850. Это позволяет при переходе на цифровую подстанцию не заменять одновременно все микропроцессорные устройства контроля и управления подстанцией.

Сервер цифровой подстанции выполняет следующие задачи:

- информационный обмен с интеллектуальными электронными устройствами (IED);

- информационный обмен с унаследованными устройствами телемеханики;

- сбор информации об аварийных срабатываниях с устройств релейной защиты и автоматики (осциллограммы);

- сбор профилей потребления ресурсов с приборов учёта (электричество, газ, вода);

- обеспечение долговременного хранения информации;

- ретрансляция оперативной и учётной информации, аварийных осциллограмм;

- информационный обмен с автоматизированным рабочим местом.

Сервер содержит пять подсистем, отвечающих за обмен данными с различными устройствами, обработку и архивирование данных, объектную архитектуру адресации данных и передачу данных на рабочее место диспетчера. Архитектура сервера представлена на рис. 1.

Сервер цифровой подстанции осуществляет сбор данных с устройств различных

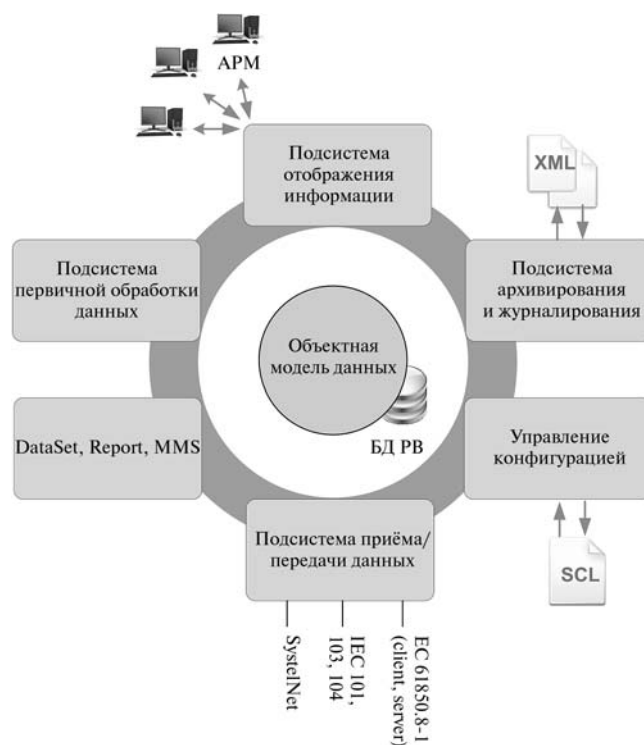


Рис. 1. Архитектура сервера сбора данных

производителей, поддерживающих стандарт IEC 61850, таких как Alstom, ДПМ 121 и разработанных компанией "Систел" приборов УИП 12 (устройство измерения параметров), ПКЭ (показатель качества электроэнергии), РАС (регистратор аварийных событий). Для хранения оперативных данных используется иерархическая структура данных в соответствии с требованиями IEC 61850. В стандарте описание данной модели начинается с описания объектов данных, логических узлов и устройств. Логические и физические устройства отличаются тем, что физическое устройство может содержать несколько логических. Логические устройства объединяют в себе несколько логических узлов — наименьший элемент модели, способный осуществлять обмен данными. Типы логических узлов в соответствии с их функционалом определяются стандартом. Объектная модель позволяет моделировать различные системы. Модель данных, используемая в стандарте, подробно описана в работе [2]. Здесь говорится о том, что стандарт даёт инструменты для реализации связей и обмена данными между узлами системы любой сложности и оставляет свободным выбор функционала логических устройств и метода их распределения. Адресация данных, использованная в программном обеспечении сервера, приведена на рис. 2.

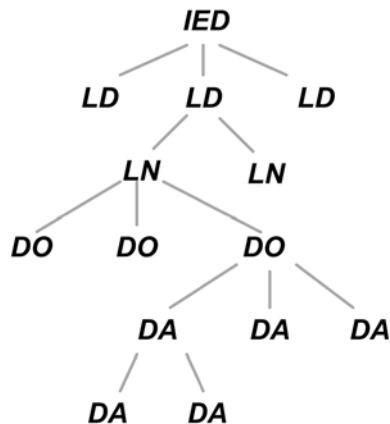


Рис. 2. Адресация данных:

IED — интеллектуальное электромагнитное устройство; *LD* — логическое устройство; *LN* — логический узел; *DO* — объект данных; *DA* — атрибут данных



Рис. 3. Адресация в виде строки:

LD — логическое устройство; *LN* — логический узел; *DO* — объект данных; *DA* — атрибут данных



Рис. 4. Модель стенда

При переходе сигнала между уровнями адресация трансформируется в строку (рис. 3).

Кроме оперативного хранения данных на сервере организовано и архивное хранение. Созданы соответствующие разделы для ведения профилей потребления электроэнергии, диспетчерской ведомости и осциллограмм. При работе с данными, получаемыми от интеллектуальных устройств, сервер запрашивает не только текущие срезы данных, но и недостающие за более раннее время. Глубина хранения архивов и периодичность опроса соответствуют типам данных.

Программное обеспечение сервера цифровой подстанции позволяет:

регистрировать и анализировать аварийные события;

контролировать работу и удалённо управлять режимами работы терминалов релейной защиты, что позволяет обеспечить надлежащий уровень защиты высоковольтных линий, электрических машин, аппаратов, а также своевременно выявлять места аварий;

контролировать и удалённо управлять устройствами противоаварийной автоматики. При возникновении аварийных ситуаций возможно предотвратить или локализовать аварийные ситуации;

анализировать поведение системы в различных ситуациях;

осуществлять технический контроль и коммерческий учёт электроэнергии, контролировать потоки мощности, рассчитывать уровень нагрузки электросети, оперативно вычислять локальные балансы;

осуществлять сбор телемеханических данных в реальном времени с точностью до 1 мс, их обработку и архивное хранение;

поддерживать информационный обмен с центрами управления энергосети;

контролировать и диагностировать функционирование оборудования подстанции и автоматизированной системы управления технологических процессов подстанции;

управлять коммутационным оборудованием электросети;

передавать информацию на автоматизированное рабочее место, информировать диспетчера об аварийных событиях.

В процессе разработки программного обеспечения цифровой подстанции создан стенд для тестирования программного комплекса (рис. 4). Разработанное в соответствии со стандартом IEC 61850 серверное программное обеспечение для сбора, обработки и хранения данных успешно прошло испытания на стенде. Испытания показали, что серверное программное обеспечение при функционировании на промышленном компьютере (Intel Quad Core-i5 2400 3,1 ГГц, 8 Гб DDR3) может одновременно обеспечивать работу с 500 интеллектуальными устройствами, при функционировании на промышленном контроллере (Sitra AM3359AZCZ100 1 GHz, 512 Мб DDR3L) с 10 устройствами.

Описанный сервер цифровой подстанции вошёл в Цифровой информационно-измерительный комплекс (ЦИИК), соответствующий требованиям стандарта IEC 61850. ЦИИК реализован в рамках проекта ООО "СИСТЕЛ" совместно с ФГУП "РФЯЦ-ВНИИТФ им. Академика Е. И. Забавкина" (г. Снежинск Челябин-



Рис. 5. Стойка ЦИИК

ской области). Фотография стойки, входящей в данный комплекс, изображена на рис. 5.

В составе ЦИИК используются программно-аппаратные средства уровня подстанции, интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ) с цифровым выходом согласно IEC 61850-9-2. Базовым элементом является первичный измерительный преобразователь тока и напряжения NXVCT-230 (оптический трансформатор).

ЦИИК с ноября 2012 г. функционирует в опытном режиме на действующей подстанции ГПП-4 ПС 110/10 кВ "Сосновая" (г. Снежинск Челябинской области).

В настоящее время ЦИИК обеспечивает решение задач учёта электроэнергии, контроля показателей качества электроэнергии, телемеханики, регистрации аварийных событий.

Библиографические ссылки

1. Горелик Т.Г., Кириенко О.В. Автоматизация энергообъектов с использованием технологии "Цифровая подстанция". Первый Российский прототип // Релейная защита и автоматизация. Чебоксары: Рекламно-издательский центр содействия развитию релейной защиты автоматики и управления в электроэнергетике, 2012. № 1. С. 86—89.

2. Christoph Brunner The semantic data model // PAC-World [Электронный ресурс]. URL: http://www.pacw.org/no-cache/issue/june_2013_issue/iec_61850_update/the_semantic_data_model.html (дата обращения 09.04.2014).

УДК 921.327.534

С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф.

(Московский государственный университет приборостроения и информатики),

Е.М. Гальцова, Д.И. Зимин

(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск)

mikaeva@npo.lit.ru

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ОСВЕЩЕНИЯ, СОЗДАВАЕМОГО СВЕТОДИОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ, ПО УРОВНЮ ЗРИТЕЛЬНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Представлены результаты исследования условий освещения, создаваемого светодиодными источниками излучения. Оценка световой среды, создаваемой осветительной установкой со светодиодами, проводилась по уровню зрительной работоспособности. Определены наиболее благоприятные условия освещения для объектов III разряда зрительной работы СП52.13330.2011.

Ключевые слова: осветительная установка; освещённость; светодиоды; угловой размер; зрительная работоспособность; время зрительной работы.

The results of the lighting conditions study created by the LED light sources are introduced. Light environment valuation, created by lighting system with LED, conducted in accordance with visual efficiency. The most favorable lighting conditions for III category objects of the visual work SP52.13330.2011 are defined.

Key words: lighting facility; illumination; LEDs; angular size; visual efficiency; visual work time.

Создание комфортных условий освещения при напряжённых зрительных работах (ЗР) является одной из актуальных проблем освещения и изучения влияния параметров световой среды на функциональное состояние органа зрения.

На современном рынке светотехнической продукции имеется широкий ассортимент источников света, позволяющий создавать энергоэкономичные осветительные установки. В настоящее время одним из перспективных источников излучения являются светоизлучающие диоды, обладающие высоким сроком службы (более 50 000 ч), низким энергопотреблением, отсутствием токсичной ртути, высокой световой отдачей (свыше 100 лм/Вт) и рядом других преимуществ.

Изучение светоцветовой среды, её воздействие на орган зрения, возможность применения светоизлучающих диодов для внутреннего освещения без ущерба для здоровья человека являются актуальной задачей и приводят к необходимости проведения исследований в этой области.

Одной из комплексных характеристик, оценивающих влияние условий освещения на человека, является зрительная работоспособность, использующаяся для оценки способности человека заметить, опознать и обработать деталь, попавшую в поле зрения, основываясь на скорости, точности и качестве восприятия. Зрительная работоспособность одновременно зависит от собственных характеристик выполняемого задания (размера, формы, положения, цвета, коэффициента отражения деталей и фона) и способности восприятия, на которую влияют условия освещения [1, 2].

Кроме того, на зрительную работоспособность влияют блескость, неравномерность освещённости, помехи, рассеивающие внимание, природа заднего плана и, в более общем смысле, организация рабочего пространства. Снижение зрительной работоспособности может возникнуть после продолжительной работы в плохих условиях освещения (низкая освещённость, недостаточная равномерность освещения, дискомфортная блескость) и привести к ухудшению качества выполняемой работы, её производительности и повышению ошибок.

Для оценки условий освещения, создаваемого светодиодами, проведены исследования зрительной работоспособности в зависимости от уровня освещённости рабочей поверхности [3, 4]. Экспериментальная установка — адаптационная камера размером $1,3 \times 0,65 \times 0,70$ м, внутренняя поверхность которой покрыта белым диффузно-отражающим материалом с

коэффициентом отражения 0,8. Для освещения использовался световой прибор, расположенный над объектом наблюдения на высоте 0,5 м над рабочей поверхностью. В качестве источника излучения применялись светоизлучающие диоды высокой интенсивности типа У-337. Выходное отверстие светового прибора перекрыто рассеивателем. Уровень освещённости рабочей поверхности изменялся от 100 до 1000 лк регулированием напряжения источника питания. Неравномерность освещения поверхности не превышала $\pm 10\%$. Освещённость измерялась люксметром "ТКА—Люкс", имеющего предел допустимого значения относительной погрешности $\pm 6\%$.

Эксперимент проводился в затемнённой комнате $2,0 \times 2,5 \times 3,6$ м. Коэффициенты отражения потолка, стен и пола соответственно равны 0,7; 0,5; 0,3. Наблюдаемый располагался за рабочим столом, коэффициент отражения которого равен 0,8. В эксперименте участвовали 10 наблюдаемых в возрасте 21—24 года, имеющих нормальное и скорректированное к нормальному зрение. В каждой серии опытов измерения проводились по пять раз в день в течение 4 дней.

Работоспособность зрительного анализатора определялась с использованием колец Ландольта, имеющих разрыв в одном из четырёх направлений; угловой размер тест-объектов составлял $\alpha = 4'$, при отрицательном контрасте $k = 0,9$, что соответствует III разряду зрительных работ по СП 52 — 13330 — 2011. Общее число рассматриваемых символов составляет 100 и 300 шт. Наблюдение проводилось с расстояния 350 мм.

Зрительная задача заключается в нахождении (в представленной таблице) и вычеркивании колец с определённым направлением разрыва. С помощью секундомера фиксировалось время выполнения задания и определялось количество допущенных ошибок отдельно по видам (пропущенные кольца и ошибочно вычеркнутые). Так как количество ошибочно вычеркнутых колец обычно составляет не более 1—2, то они не учитывались при расчёте зрительной работоспособности.

В начале эксперимента измерялось время только механической работы $t_{100}(t_{300})$ — время, за которое каждый испытуемый вычеркивает 100 (300) символов. Образец тест-объекта с кольцами Ландольта представлен на рис. 1.

Порядок проведения эксперимента следующий: после предварительной адаптации каждого наблюдаемого к заданным условиям

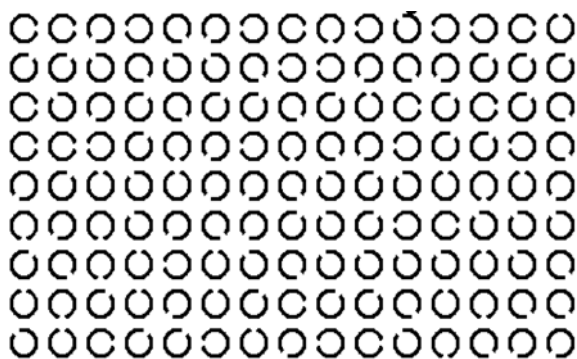


Рис. 1. Кольца Ландольта

освещения в течение 15 мин измерялась работоспособность с тест-объектами, содержащими 100 и 300 символов, затем выполнялась двухчасовая зрительная работа, по окончании которой проводилось повторное измерение работоспособности. Результаты обрабатывались с использованием пакета статистического анализа и прогнозирования.

Быстрота различения колец Ландольта оценивается величиной, обратной среднему времени различения каждого тест-объекта таблицы. Вероятность правильного опознавания формы колец — отношение числа правильно вычеркнутых колец к их общему числу с заданным направлением разрыва:

$$O_n = \frac{q_1}{ct_{зр}}, \quad (1)$$

где q_1 — количество правильно опознанных колец Ландольта за время опыта; c — постоянная доля колец с определённой ориентацией из общего количества колец; $t_{зр}$ — время выполнения зрительной работы.

В свою очередь

$$t_{зр} = t_{об} - t_{мр}, \quad (2)$$

где $t_{об}$ — время опознавания колец Ландольта; $t_{мр}$ — время механической работы.

Соответственно,

$$\begin{aligned} t_{мр1} &= t_{100}q_1; \\ t_{мр2} &= t_{300}q_1; \end{aligned} \quad (3)$$

$$r_n = \frac{1}{O_n}. \quad (4)$$

Показатель, характеризующий зависимость общего количества символов к времени, затраченному на их зачёркивание

$$t_\alpha = \frac{t_0}{N}, \quad (5)$$

где t_0 — время, затраченное на зачёркивание символов тест-объекта; N — общее количество символов.

Исследование зрительной работоспособности в зависимости от уровня освещённости

рабочей поверхности проводилось в диапазоне от 100 до 1000 лк при использовании тест-объекта из 100 и 300 символов.

Экспериментально установлено, что для тест-объекта с угловым размером $\alpha = 4'$ при уровне освещённости 700 лк зрительная работоспособность характеризуется наименьшим количеством ошибок. Дальнейшее увеличение уровня освещённости не снижает количество ошибок, т.е. характеризуется её стабильностью. Таким образом, для выполнения указанного вида ЗР данный уровень освещённости рабочей поверхности можно определить как оптимальный по минимальному количеству ошибок за время проведения эксперимента.

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы. Уровень освещённости рабочей поверхности влияет на зрительную работоспособность. При повышении E от 100 до 1000 лк количество ошибок (O_n), характеризующих работу с тест-объектом $N = 300$ символов, снижается в 1,18 раза после двух часов ЗР, зрительная работоспособность (r_n) при этом возрастает в 1,26 раза.

При уровне освещённости в 600 лк зрительная работоспособность с учётом ошибок характеризуется стабильностью. Дальнейшее увеличение освещённости рабочей поверхности незначительно сказывается на степени зрительной работоспособности, поэтому это увеличение следует определить как оптимальное и рекомендуемое для данного вида ЗР.

Вторым параметром, определяющим работоспособность и оценивающим уровень реакции органа зрения на светодиодное освещение, было время ЗР, рассчитанное по формуле (2).

Данный параметр оценивался до начала, после одного и двух часов выполнения ЗР с двумя вариантами тест-объектов, содержащих 100 и 300 символов.

По результатам эксперимента построены зависимости $t_{зр} = f(E)$ для тест-объектов с 100 и 300 символами до начала, после одного и двух часов ЗР (рис. 2, 3). Изменение времени ЗР при различных уровнях освещённости рабочей поверхности (см. рис. 2, 3) имеет одинаковый качественный характер. С ростом уровня освещённости до 600 лк $t_{зр}$ увеличивается (для 100 символов):

в 1,66 раза до начала ЗР;

в 1,79 раза после одного часа ЗР;

в 1,91 раза после двух часов ЗР.

До начала выполнения работы $t_{зр}$ в 1,1 раза меньше, чем после одного часа работы, и в 1,2 раза меньше после двух часов.

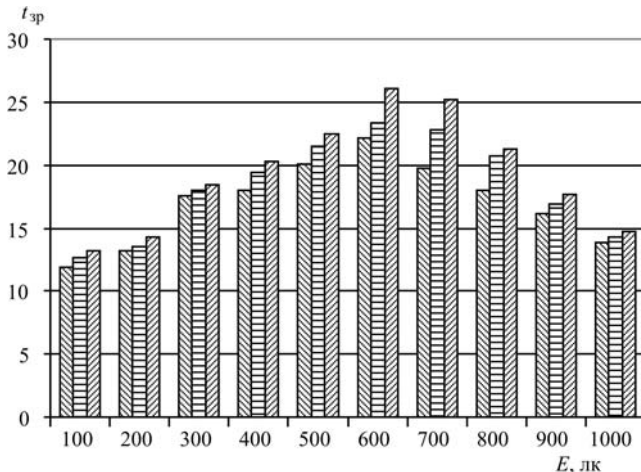


Рис. 2. Зависимость времени зрительной работы от уровня освещённости рабочей поверхности ($N = 100$ символов):
 ▨ до работы; ▩ после 1 часа работы; ▪ после 2 часов работы

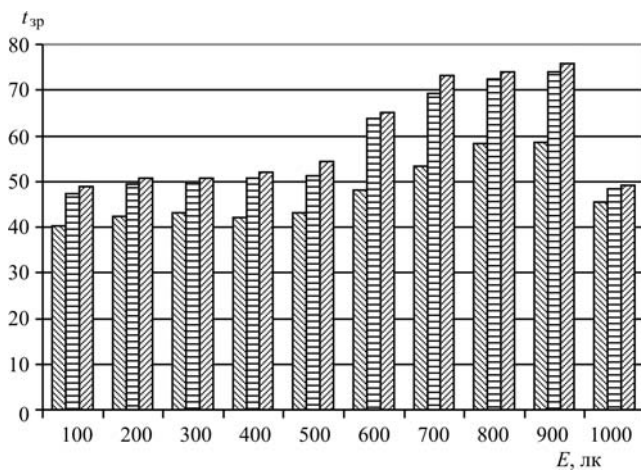


Рис. 3. Зависимость времени зрительной работы от уровня освещённости рабочей поверхности ($N = 300$ символов):
 ▨ до работы; ▩ после 1 часа работы; ▪ после 2 часов работы

Аналогично для тест-объектов из 300 символов (см. рис. 3) также отмечается рост времени ЗР при изменении уровня освещённости рабочей поверхности:

в 1,42 раза после первого часа ЗР;

в 1,54 раза после второго часа ЗР.

До начала выполнения работы $t_{зр}$ в 1,24 раза меньше, чем после второго часа работы.

Проведённый сравнительный анализ изменения зрительной работоспособности в условиях изменения уровня освещённости рабочей поверхности показал примерно одинаковые показатели для двух вариантов диффузных тест-объектов, содержащих 100 и 300 символов: при увеличении освещённости от 100 до 1000 лк наблюдалось снижение общего количества допущенных ошибок и увеличение зрительной работоспособности.

Результаты исследований позволяют рекомендовать применение светодиодов в систе-

мах общего освещения в помещениях, для которых характерно выполнение работ со зрительной и умственной нагрузкой, требующих напряжения нервной системы, и организма в целом, т.е. в производственных, административных и общественных зданиях различного целевого назначения.

Выводы. При работе с исследуемыми тест-объектами увеличение уровня освещённости от 100 до 1000 лк приводит к росту зрительной работоспособности в 1,6 раза, что объясняется снижением количества допущенных ошибок.

Изменение времени ЗР при различных уровнях освещённости рабочей поверхности имеет одинаковый качественный характер — с ростом освещённости время ЗР увеличивается в среднем в 1,75 раза при различной продолжительности выполнения работы.

В исследуемых вариантах освещения работоспособность органа зрения более чувствительна к изменению уровня освещённости рабочей поверхности по сравнению с продолжительностью ЗР.

Определены наиболее благоприятные уровни освещённости рабочей поверхности, обеспечивающие повышение работоспособности и наименьшее количество ошибок: для тест-объекта из 100 символов — 700 лк, из 300 символов — 600 лк.

Результаты исследований позволяют рекомендовать применение светодиодов в системах общего освещения в помещениях, для которых характерно выполнение работ со зрительной и умственной нагрузкой.

Библиографические ссылки

1. **Абрамова Л.В., Михайлова Е.М.** Зрительная работоспособность как критерий эффективности осветительной установки / Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: сб. науч. тр. X Междунар. науч.-техн. конф., Саранск, 2012 г. / Саранск: СВМО, 2012. С. 90—92.

2. **Гальцова Е.М., Войнова О.С.** Методы оценки зрительной работоспособности в установках со светодиодами / Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-техн. конф. в рамках II Всероссийского светотехнического форума с междунар. участием, Саранск, 3—4 декабря 2013 г. / Саранск: 2013. С. 91—95.

3. **Абрамова Л.В., Михайлова Е.М.** Определение оптимальных условий освещения объектов светодиодами установками // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. № 1—2. С. 102—106.

4. **Микаева С.А., Абрамова Л.В., Михайлова Е.М.** Оценка условий освещения, создаваемого светодиодными источниками излучения // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 9. С. 24—27.



УДК 620.92.001:658.26

И.В. Долотовский, канд. техн. наук, **А.В. Ленькова**, канд. техн. наук
(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.)
lenkova_av@rambler.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Предложена методика оптимизации топливной системы энергетического комплекса газо-перерабатывающих предприятий, включающая разработку рационального топливно-энергетического баланса с вовлечением горючих технологических газов в процессы выработки тепловой, электрической энергии, холода. Приведены примеры управления режимами топливопотребления в зависимости от технологических факторов и технические решения по созданию эффективных топливных систем.

Ключевые слова: топливно-энергетические ресурсы; газоперерабатывающее предприятие; горючие отходы; оптимизация; математическое моделирование.

Fuel system optimization methodology of the gas processing plants energy complex, including the development of rational fuel-energy balance with involving combustible technological gases in making processes of the heat, electricity, cold is proposed. The modes control examples of the fuel consumption, depending on technological factors, and technical decision for the creation of effective fuel systems are adduced.

Key words: fuel and energy resources; gas processing enterprice; combustible waste; optimization; mathematical modelling.

Введение. Потребление топливного газа в технологических и энергетических огнетехнических агрегатах предприятий переработки газа и газового конденсата (ГПП), зависящее от схемы технологического процесса, мощности установок, режимов их эксплуатации, степени утилизации горючих отходов (ГО), технического состояния оборудования, климатических условий региона и других факторов, достигает 17–94 м³ на 1000 м³ переработанного газа с тенденцией увеличения за последние годы. Особенностью топливной системы ГПП является её взаимосвязь с технологической системой (ТС) и энергетическим комплексом (ЭК) в непрерывном технологическом процессе, так как в качестве топлива используются, в основном, технологические газы производств и низкопотенциальные газовые выбросы — некондиционные газовые смеси переменного состава. Поэтому основное направление оптимизации топливной системы для повышения её эффективности связано с максимальным использованием технологических газов собственного производства и ГО в технологических процессах, что позволит снизить потребление товарного газа в качестве топлива огнетехнических агрегатов, а также для выра-

ботки тепловой, электрической энергии, хладоносителей в собственных установках ЭК с уменьшением топливопотребления во внешних энергогенерирующих источниках. Топливная система ЭК ГПП оптимизируется поэтапно [1]: структурирование объекта, задач и методов исследования; выбор и обоснование критериев и показателей эффективности; разработка моделей, программ и алгоритмов для структурной и параметрической оптимизации; синтез оптимальной топливной системы и проработка технических решений по повышению её эффективности для ГПП с соответствующей технологической топологией.

Структура топливной системы. Построение структуры топливной системы ГПП является первым аспектом решения поставленной задачи и базируется на декомпозиционно-агрегативном подходе и блочно-иерархическом принципе анализа сложных систем. В общем виде энерготехнологическая схема многопрофильного ГПП, перерабатывающего гетерогенное углеводородное сырьё (УВС) — газ и газовый конденсат, приведена на рис. 1. Матричная модель, отражающая в определённой мере взаимосвязи газовых потоков и отдельных производств ТС и ЭК, приведена в таблице.

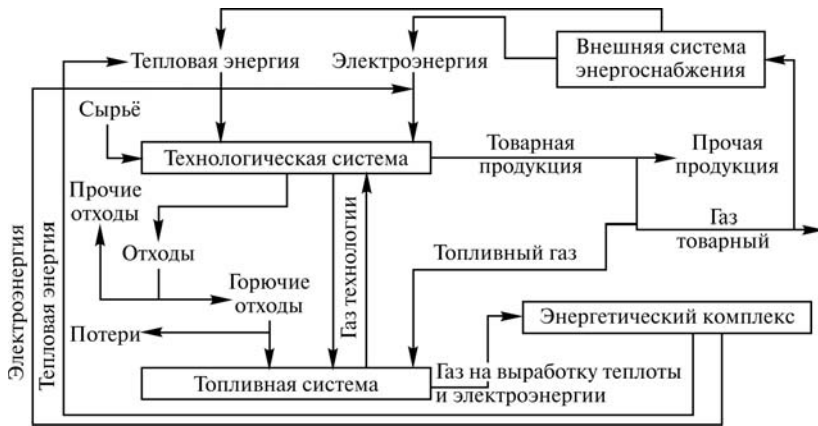


Рис. 1. Схема взаимосвязей топливной системы с ТС, ЭК ГПП и внешней системой энергоснабжения

Задача оптимизации топливной системы ЭК ГПП в общем виде формулируется как задача рационализации энерготехнологического баланса (ЭТБ) с максимальным использованием собственных энергетических ресурсов и ГО. Для разработки ЭТБ и расчёта основных показателей эффективности топливной системы ЭК в соответствии с её структурой и матрицей газовых потоков использованы топологические модели. Так, для ГПП с конверсией УВС в ТС, рециркуляцией полупродуктов, выработкой тепловой и электрической энергии во внутрипроизводственных системах ЭК разработан информационный граф ЭТБ (рис. 2).

Коэффициенты преобразования графа соответствуют следующим материальным и энергетическим потокам: $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ — технологическим; $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ и $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$ — топливным; $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ и δ — тепловым.

Математическое описание генерации и потребления топлива в зависимости от меняющихся технологических, климатических, экологических и экономических факторов в общем виде представлено следующими уравнениями:

выработка товарного газа (V_T) и технологических горючих газов ($V_{ГО}$) в ТС:

$$V_{ТГГ} = \sum_{j=1}^n (V_{Tj} + V_{ГОj}) = \sum_{j=1}^n \lambda_j V_j (k_{кгф}), \quad (1)$$

потребление топлива (товарный газ и технологические горючие газы) в аппаратах ТС:

$$B_{ТС} = \sum_{j=1}^n (b_j + \beta_j) V_{ТГГ}, \quad (2)$$

потребление топлива в собственном источнике тепловой и электрической энергии — ЭСН на выработку пара:

$$B_{ЭСН} = \sum_{j=1}^n (b_j + \beta_j) V_j (k_{кгф}), \quad (3)$$

Матрица взаимосвязи газовых потоков и производств ТС и ЭК

Газовые потоки	Производства технологической подсистемы и энергетического комплекса										
	Стабилизация конденсата	Переработка конденсата	Очистка и компримирование углеводородных газов	Очистка сырьевого газа	Осушка и отбензинивание газа	Производство побочной технологической продукции	Обработка и утилизация стоков	Сжигание промтоходов	Факельные системы	Производство тепловой энергии (пара)	Производство электроэнергии
Углеводородные газы стабилизации и дегазации	1/2	1/2	1/2	1/2	2	—	—	—	—	—	—
Газ товарный	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—
Газ товарный редуцированный	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Водородосодержащий газ	—	1/2	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. 1 — генерация энергоресурса; 2 — потребление энергоресурса

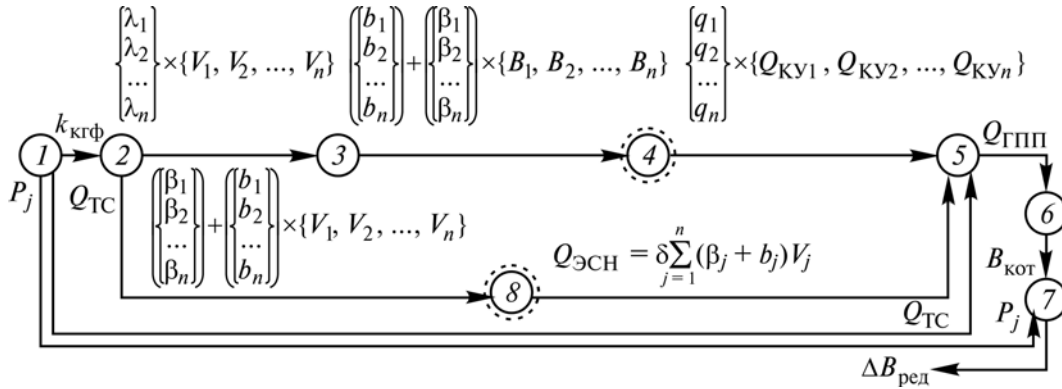


Рис. 2. Информационный граф расчёта ЭТБ ГПП и топливопотребления внешнего источника теплоснабжения:
вершины: 1 — исходные данные; 2 — материальный баланс; 3 — топливный баланс элементов ТС и ЭК ГПП; 4 — тепловой баланс системы утилизации вторичных энергоресурсов (ВЭР) ТС и ЭК; 5 — тепловой баланс ГПП; 6 — тепловой и топливный баланс котельной; 7 — энергетический баланс системы редуцирования пара; 8 — тепловой и топливный баланс электростанции собственных нужд (ЭСН) ЭК ГПП;
исходные данные и переменные: $Q_{ТС}$, P_j — тепловое потребление элементов ТС и давление пара на соответствующем уровне ЭК; $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ — технологические и топливные потоки; $k_{кгф}$ — конденсатно-газовый фактор; $\{Q_{КУ1}, Q_{КУ2}, \dots, Q_{КУn}\}$, $Q_{ЭСН}$, $Q_{ГПП}$ — теплопроизводительность котлов-утилизаторов (КУ), тепловая выработка ЭСН и тепловое потребление ГПП от котельной; $B_{кот}$ — потребление топлива в котельной; $\Delta B_{ред}$ — потери топлива от редуцирования пара высокого давления в котельной до давления P_j

выработка тепловой энергии за счёт утилизации теплоты в котлах-утилизаторах ТС:

$$Q_{ВЭР} = \sum_{j=1}^n q_j Q_{КУj} (B_{ТС}), \quad (4)$$

тепловое потребление ГПП от внешнего источника — котельной:

$$Q_{ГПП} = Q_{ТС} - Q_{ВЭР} - Q_{ЭСН}, \quad (5)$$

потребление топлива в котельной на выработку теплоты для ГПП и собственные нужды:

$$B_{кот} = \frac{Q_{ГПП}}{Q_H^P \eta_{кот} \eta_{сн}}, \quad (6)$$

где Q_H^P — теплота сгорания потребляемого котельной топливного газа; $\eta_{кот}$ — среднее значение КПД котельных агрегатов внешнего источника; $\eta_{сн}$ — коэффициент, учитывающий затраты теплоты в котельной на собственные нужды.

Идеальным вариантом структуры и режимов эксплуатации топливной системы ЭК и ТС ГПП является вариант отсутствия внешнего теплопотребления, когда уравнение (5) имеет вид равенства $Q_{ТС} = Q_{ВЭР} + Q_{ЭСН}$. Этот вариант реализуется за счёт утилизации ГО в ЭСН.

В математических моделях установок утилизации ГО систем генерации тепловой, электрической энергии и искусственного холода ЭК ГПП необходим максимальный учёт техно-

логических и режимных факторов. Покажем это на примере топливной системы с утилизацией жидких ГО в энерготехнологической установке с выработкой тепловой энергии в КУ и холода в абсорбционном преобразователе теплоты (АПТ), принципиальная схема которой приведена на рис. 3.

На количество дополнительного топлива, подаваемого из сети товарного газа, влияют следующие факторы: расход горючих отходов $G_{ГО}$ и их теплота сгорания $Q_{H_{го}}^P$; теплота сгорания топливного газа Q_H^P ; холодопроизводительность АПТ (тепловая нагрузка испарителя) Q_0 ; тепловая нагрузка потребителя теплоты Q_P ; температуры в АПТ — высшая (в генераторе) T_g , низшая (в испарителе) T_0 , средняя (охлаждающей среды в конденсаторе и абсорбере) T_c ; коэффициенты сохранения теплоты —

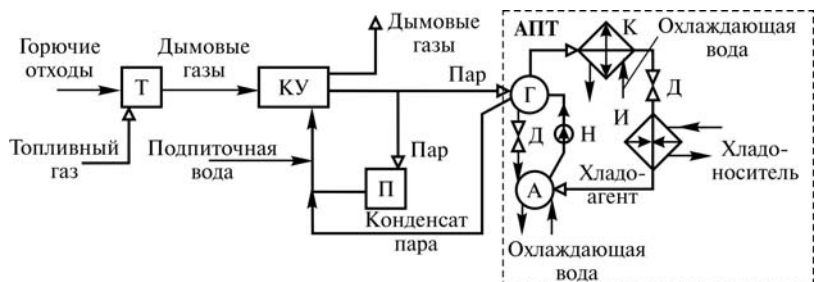


Рис. 3. Схема установки утилизации ГО с выработкой тепловой энергии и холода:
 Т — циклонный предтопок; КУ — котел-утилизатор; П — потребитель теплоты ТС; А, Г — абсорбционный и генераторный блоки АПТ; К — конденсатор; Д — дроссель; И — испаритель; Н — насос

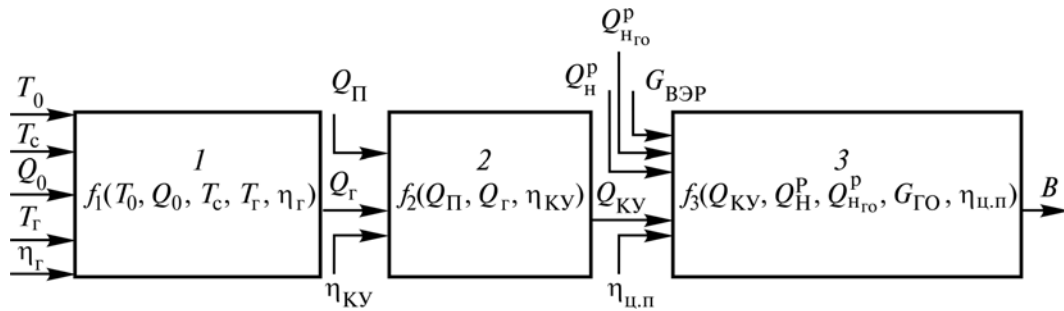


Рис. 4. Структурная схема установки утилизации ГО:

1 — АПТ; 2 — котел-утилизатор; 3 — циклонный предтопок; $Q_{КУ}$, $Q_{Г}$ — тепловая нагрузка (количество выработанной/потребленной теплоты) котла-утилизатора, генератора АПТ; B — расход топливного газа

циклонного предтопка $\eta_{ц.п}$, котла-утилизатора $\eta_{КУ}$, генератора АПТ $\eta_{Г}$.

Искомая расчётная зависимость расхода топливного газа в виде функции от технологических и режимных параметров получена в соответствии с взаимосвязями элементов системы утилизации ГО с выработкой тепловой энергии и холода, приведёнными на рис. 4, где показаны только те элементы, которые необходимы для решения поставленной задачи.

Математическая постановка решаемой задачи формулируется как определение в общем виде функциональной зависимости:

$$B = f_3 \left(\begin{matrix} Q_{КУ} (Q_{П}, Q_{Г} (T_0, Q_0, T_c, T_g, \eta_g), \eta_{КУ}), \\ Q_{Н}^p, Q_{НГО}^p, G_{ГО}, \eta_{ц.п} \end{matrix} \right). \quad (7)$$

Задача решалась последовательно, начиная с первого элемента (АПТ), для которого определена зависимость $Q_{Г} = f_1(T_0, Q_0, T_c, T_g, \eta_g)$. С использованием известного уравнения для удельного расхода тепловой энергии на выработку холода в АПТ получим аналитическое выражение зависимости выходной переменной $Q_{Г}$ от входных меняющихся параметров технологической системы и температуры охлаждающей среды

$$Q_{Г} = \frac{Q_0}{\eta_g} \frac{1/T_0 - 1/T_c}{1/T_c - 1/T_g}. \quad (8)$$

Для второго элемента (котла-утилизатора) искомая зависимость $Q_{КУ} = f_2(Q_{П}, Q_{Г}, \eta_{КУ})$ определена из уравнения теплового баланса этого аппарата:

$$Q_{КУ} = (Q_{П} + Q_{Г})/\eta_{КУ}, \quad (9)$$

где тепловая нагрузка $Q_{П}$ является заданным параметром.

Для третьего элемента (циклонного предтопка) зависимость расхода топливного газа от влияющих технологических факторов $B = f_3(Q_{КУ}, Q_{Н}^p, Q_{НГО}^p, G_{ГО}, \eta_{ц.п})$ также является решением уравнения теплового баланса этого элемента системы:

$$B = (Q_{КУ}/\eta_{ц.п} - G_{ГО}Q_{НГО}^p)/Q_{Н}^p. \quad (10)$$

После подстановки в (7) уравнений (8)—(10) получим итоговое уравнение для определения зависимости расхода топливного газа от перечисленных влияющих входных параметров и переменных

$$B = \left(\begin{matrix} Q_{П} + \frac{Q_0}{\eta_g} \frac{1/T_0 - 1/T_c}{1/T_c - 1/T_g} - \\ - G_{ГО}Q_{НГО}^p \eta_{ц.п} \eta_{КУ} \end{matrix} \right) / (Q_{Н}^p \eta_{ц.п} \eta_{КУ}). \quad (11)$$

На показатели потребления топлива в ТС и ЭК ГПП влияют также режимы загрузки отдельного оборудования, согласованные с графиками их текущих и капитального ремонтов. Данный режимный фактор учтён в информационно-аналитическом обеспечении расчётов [2, 3] соответствующими коэффициентами загрузки установок.

Алгоритм управления топливопотреблением базируется на разработанных с использованием информационно-аналитического обеспечения и прикладных программ режимных картах элементов синтезированных оптимальных топливных систем. Для рассмотренной установки утилизации теплоты ГО с выработкой теплоты и холода один из возможных вариантов режимной карты показан на рис. 5 в виде фазовой диаграммы этого объекта, где в качестве параметров системы приняты следующие данные: $Q_{П} = 1030$ кВт, $Q_{НГО}^p = 23$ МДж/кг,

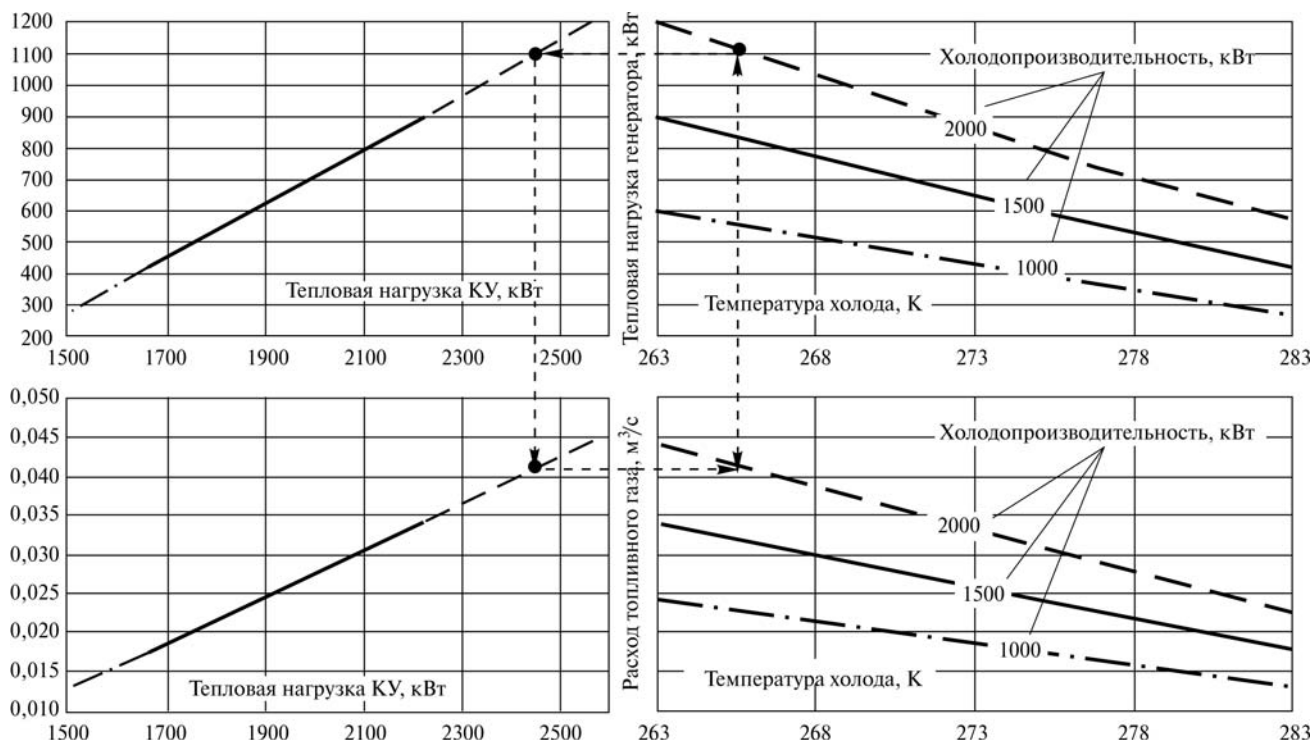


Рис. 5. Фазовая диаграмма установки утилизации ГО с выработкой теплоты и холода для определения зависимости расхода топливного газа от холодопроизводительности АПТ и температуры холода

$$Q_n^p = 36 \text{ МДж/м}^3, G_{ГО} = 0,05 \text{ кг/с}, T_c = 303 \text{ К}, T_r = 413 \text{ К}.$$

Режимы эксплуатации котельных агрегатов внешнего источника теплоснабжения в условиях переменных нагрузок ГПП по расходу УВС формируются в соответствии с последовательностью вычислительных процедур (1)—(6). Решение данной задачи управления показано на рис. 6 для многопрофильного ГПП, перерабатывающего высокосернистое УВС. В итоге определяются динамические зависимости — функционалы расхода УВС: производительность котельной и количество работающих котлоагрегатов.

Технические решения повышения эффективности топливной системы с утилизацией ГО в ТС и ЭК ГПП реализованы в направлении создания технологических установок



Рис. 6. Режимы работы котельной при переменной нагрузке по УВС

регенерации абсорбентов [4, 5] и собственного источника энерговодоснабжения с максимальным использованием потенциала ВЭР и промышленных стоков [6].

Анализ данных имитационного моделирования режимов эксплуатации ряда действующих блоков осушки установок комплексной подготовки и переработки газа и газового конденсата показал, что их модернизация с внедрением энергоэффективных установок регенерации абсорбента позволит снизить потребление топливного газа из сети предприятия на 30—36 %. Удельное потребление топливного газа (на 1000 м³ газа, подаваемого на осушку) составит 0,317 м³, что на 0,178 м³ меньше, чем в установках без утилизации ГО. Для установки производительностью 43,3 тыс. т/г по регенерируемому абсорбенту интегральный эффект от внедрения предложенных решений составит ~1,8 млн руб. при сроке окупаемости дополнительных капитальных затрат, не превышающем 2,5 лет.

Внедрение собственного источника энергообеспечения с утилизацией ГО на крупном ГПП позволяет снизить удельный годовой расход топлива в системе на выработку 1 МВт(э) на 12—14 %. Удельный интегральный эффект, определённый за 10 лет, в расчёте на 1 МВт электрической мощности в зависимости от типа предприятия составит

8,06—18,01 млн руб./МВт(э), внутренняя норма доходности 22—26 %, индекс доходности 2,4—3,5 руб./руб., срок окупаемости инвестиций от 7 до 9 лет.

Заключение. Разработанная методология оптимизации топливной системы энергетического комплекса газоперерабатывающих предприятий, математические модели расчёта топливно-энергетического баланса с учётом технологических и режимных факторов позволяют разработать направления и технические решения по вовлечению в топливный баланс горючих технологических газов и уменьшить потребление энергоресурсов от внешних источников.

Работа выполнена по госзаданию при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

Библиографические ссылки

1. Долотовский И.В., Ленькова А.В., Ларин Е.А. Моделирование и оптимизация технических ре-

шений по утилизации горючих отходов установок подготовки и переработки углеводородного сырья // Вестник СГТУ. № 1 (61). Вып. 1. 2012. С. 64—68.

2. Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В. Информационно-аналитическая система нормирования и оптимизации выработки и потребления топлива и энергоносителей на предприятии // Патент РФ № 2465639. 2012, Бюл. № 30.

3. Система "Энергоресурс": программа для ЭВМ № 2010615353 / Е.А. Ларин, И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская. № 2010613798; заявл. 29.06.10; зарегистр. 20.08.10.

4. Долотовский И.В., Ленькова А.В. Установка регенерации абсорбента с термической утилизацией горючих отходов // Патент РФ № 114424. 2012, Бюл. № 9.

5. Долотовский И.В., Долотовская Н.В. Установка регенерации метанола с термической утилизацией горючих отходов // Патент РФ № 138474. 2014, Бюл. № 8.

6. Долотовский И.В. Установка электро-тепловодоснабжения предприятий добычи, транспорта и переработки углеводородного сырья // Патент РФ № 118360. 2012, Бюл. № 20.

УДК 658.511

Т.А. Суетина, канд. экон. наук, доц., **В.В. Родионов**, канд. техн. наук, доц.,
П.К. Семёнов, канд. техн. наук, доц.

(Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева)

suetinat@mail.ru

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАРТИРОВАНИЕМ ПОТОКА СОЗДАНИЯ ЦЕННОСТИ

Разработана концепция автоматизированной системы, предназначенной для управления процессом картирования потоков создания ценностей на предприятиях различной отраслевой принадлежности. Описаны цели, функции, задачи и возможные средства реализации автоматизированной системы, дана схема движения информационных потоков внутри системы.

Ключевые слова: бережливое производство; карта потока создания ценности; автоматизированная система управления.

The concept of an automated system intended for process management of the valuable creation flow mapping in various industrial branches is developed. The objectives, functions, tasks and possible means of the automated system implementation are described; the diagram of information flows movement within the system is adduced.

Key words: lean manufacturing; value creation flow map; automatic control system.

Внедрение инструментов бережливого производства в последние годы приобрело широкомасштабный характер. Бережливое производство (lean manufacturing, lean thinking, lean enterprise) — управленческая концепция, направленная на устранение потерь и оптимизацию бизнес-процессов, основанная на прин-

ципах организации производственной системы компании Тойота [1—3].

Ключевым понятием бережливого производства является ценность продукта (услуги) — способность товара удовлетворять ожидания потребителя. Ценность создаётся постепенно в результате выполнения ряда шагов. Сово-

купность процессов при том или ином виде обработки добавляют к товару ценность, что принято называть потоком создания ценности.

Операции и процессы, которые осуществляются при изготовлении продукции, но не добавляющие ей ценность, принято называть потерями.

Основная цель бережливого производства состоит в построении эффективного потока создания ценности [1], т.е. выявлении и устранении всех потерь в производственном процессе с помощью внедрения инструментов бережливого производства.

Преобразования, связанные с внедрением инструментов бережливого производства, далее будем называть lean-преобразованиями [4].

Высокая эффективность методологии бережливого производства не вызывает сомнений, но процесс её внедрения часто сопряжён с проблемами как в области постановки целей, так и в области исполнения.

В ходе lean-преобразований происходит постоянное совершенствование процессов производства. Традиционно улучшения от lean-преобразований отслеживаются через процедуры картирования (value stream mapping, VSM) — периодическое проведение контрольных замеров с помощью построения карт потоков текущего и будущего состояния [5].

Карта потока создания ценности (КПСЦ, или просто карта) изображает материальные и информационные потоки, необходимые для предоставления продукта или услуги конечному потребителю в виде графической схемы. КПСЦ показывает узкие места потока, на основании анализа которых можно выявить непроизводительные затраты и процессы, разработать план улучшений.

Для решения проблем нерационального документооборота, часто являющегося причиной потерь времени или накопления запасов, карта также может содержать виды и траектории движения оформляемых документов.

Процедура картирования включает следующие этапы:

документирование карты текущего состояния, т.е. фиксация текущих значений характеристик карты на основании анализа потока производства ценности;

создание карты будущего состояния на основании норматив-

ных или желаемых значений производственных процессов;

расчёт потерь в рамках потока и показателей эффективности потока;

разработка плана по устранению потерь и повышению показателей эффективности потока с помощью инструментов бережливого производства;

реализация плана и повторное картирование.

На рис. 1 представлены структурные элементы КПСЦ условной ценности, проходящей от одного процесса обработки к другому и к процессу отгрузки. При производстве ценности имеются места остановки процесса производства, т.е. места, в которых ценность временно превращается в запас. Базовыми точками для отслеживания качества потока являются места хранения запасов между процессами и места добавления ценности.

Основные характеристики процессов, необходимые для построения КПСЦ и расчёта её показателей:

наименование процессов;

число занятых в каждом процессе работников (операторов);

виды и количество используемого в процессе оборудования и оснастки;

доступное рабочее время, в течение которого к изделию может добавляться ценность, определяемое как рабочее время смены за вычетом возможных периодов нерабочего времени (технических перерывов, времени на уборку, собрания) $P_{см}$;

объём потребности в готовой продукции в смену D ;

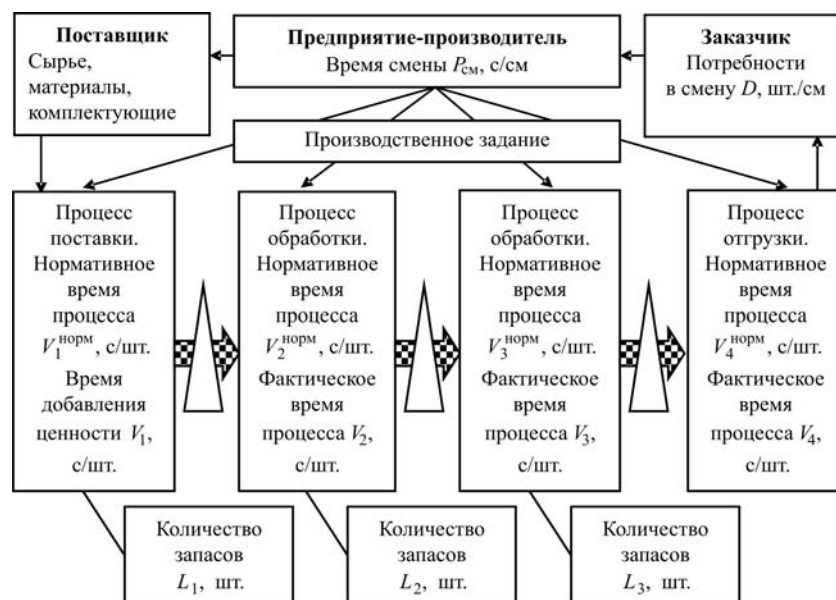


Рис. 1. Структурные элементы карты потока создания ценности

время добавления ценности, т.е. непосредственной обработки изделия, в течение которой происходит фактическое изменение изделия, удовлетворяющее требованиям заказчика (потребителя), $V_i, i = \overline{1, n}$, где n — количество процессов в потоке;

количество запасов продукции на выходе процесса, $L_i, i = \overline{1, n}$;

нормативное время добавления ценности, в течение которого должно обрабатываться изделие согласно технологическому процессу, $V_i^{\text{норм}}, i = \overline{1, n}$.

На основании исходных данных определяют расчётные показатели и показатели эффективности КПСЦ, представленные в табл. 1.

Взаимосвязь исходных и расчётных показателей КПСЦ, отражающая причинно-следственные связи между элементами модели, приведена на рис. 2.

Список исходных и расчётных показателей может быть расширен для обеспечения возможностей определения конкретных значений по видам потерь, что требует проведения соответствующей методической подготовки.

Контрольные замеры при выполнении картирования проводят постоянно и требуют вовлечения значительного количества персонала. Для повышения эффективности этого процесса необходимо его автоматизировать.

Таблица 1

Показатели карты потока создания ценности

Показатель	Формула для расчёта показателя
Расчётные показатели КПСЦ	
Суммарное время добавления ценности (время цикла) — время от входа до выхода изделия из потока без учёта времени нахождения изделия в запасах между процессами обработки	$V = \sum_{i=1}^n V_i$
Суммарное нормативное время добавления ценности — нормативное время цикла изготовления изделия согласно технологическому процессу	$V^{\text{норм}} = \sum_{i=1}^n V_i^{\text{норм}}$
Время нахождения изделия в запасах по окончании процесса обработки — время, в течение которого может быть обеспечена поставка за счёт запасов, имеющихся по окончании процесса	$T_i^{\text{зап}} = \frac{L_i}{D}$
Суммарное время нахождения изделия в виде запасов между всеми процессами потока	$T^{\text{зап}} = \sum_{i=1}^n T_i^{\text{зап}}$
Общая длительность производственного цикла — время цикла изготовления изделия с учётом времени нахождения изделия в запасах между процессами обработки	$S = V + T^{\text{зап}}$
Время такта показывает, с какой частотой нужно выпускать продукцию на каждом процессе, чтобы удовлетворить потребности в продукции	$T_{\text{такта}} = \frac{P_{\text{см}}}{D}$
Показатели эффективности КПСЦ	
Показатель соответствия времени процесса времени такта — соответствие времени обработки изделия потребностям заказчика в рамках процесса	$K_i^t = \frac{T_{\text{такта}}}{V_i} \cdot 100 \%$
Эффективность процесса показывает соответствие времени обработки на каждом процессе технологии и позволяет предположить, что внутри процесса существуют потери простоев, ожидания или потери лишних перемещений внутри процесса	$K_i = \frac{V_i^{\text{норм}}}{V_i}$
Эффективность потока без учёта наличия запасов между процессами — соответствие времени цикла технологическим нормативам	$K = \frac{V^{\text{норм}}}{V}$
Полная текущая эффективность потока, учитывающая наличие запасов	$K_{\text{полн}}^{\text{тек}} = \frac{V}{S}$
Полная нормативная эффективность потока при существующем уровне запасов	$K_{\text{полн}}^{\text{норм}} = \frac{V^{\text{норм}}}{S}$

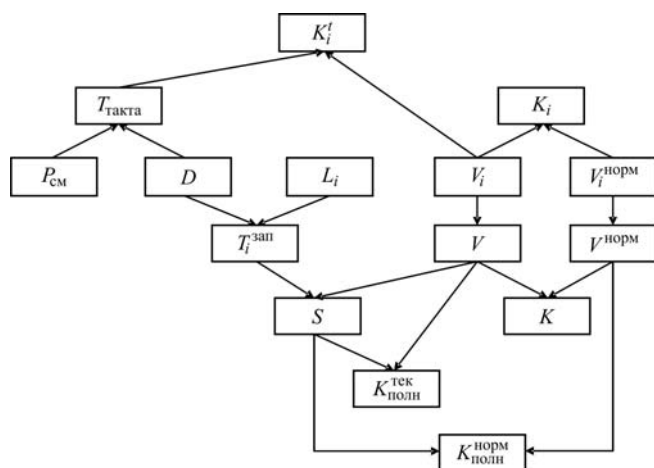


Рис. 2. Взаимосвязь исходных и расчётных показателей КПСЦ

Автоматизированная система для проведения, учёта и хранения контрольных замеров позволит значительно сократить время на отслеживание улучшений в результате внедрения lean-мероприятий. Кроме того, появится возможность хранить большой массив информации о потоке создания ценности и проводить контроль и анализ достигнутых результатов в динамике. Результаты построения и анализа КПСЦ — это основа для управления процессом улучшения производственного процесса с точки зрения устранения (уменьшения) потерь.

Автоматизированная система управления картированием потока создания ценности (АСУ КПСЦ) предназначена для рабочих групп, занятых внедрением бережливого производства на предприятиях. Информация, получаемая из КПСЦ, является основанием для принятия управленческих решений, поэтому пользоваться конечным результатом будут и руководители производственных структурных подразделений предприятий.

КПСЦ — это основные документы, на основании которых выявляют проблемы производственного процесса (потока создания ценности), возможные потери и места их возникновения.

Карты позволяют установить целевые показатели, к которым необходимо стремиться при улучшении производственного процесса (потока). Если внедрять бережливое производство с использованием проектной методологии, то показатели карты могут выступать в качестве основных целевых показателей проектов бережливого производства, а сами карты — в качестве обоснования lean-проектов [4].

Концепция автоматизированной системы состоит в обеспечении следующих возможностей: автоматизированного построения КПСЦ для анализируемого этапа изготовления изделия; объединения произвольного количества процессов создания ценности в единую карту; выделения из общего потока создания ценности отдельной его части, состоящей из произвольного количества процессов.

Разрабатываемая система должна обеспечивать бесперебойное выполнение заказа с минимальными затратами в рамках бережливого производства. Наиболее эффективно эту задачу, как показано ранее, решает КПСЦ, своевременная разработка и построение которой сигнализирует о наличии потерь в отдельных элементах потока и о необходимости применения тех или иных мероприятий бережливого производства.

Предлагаемая концептуально система не дублирует функции систем оперативного контроля и управления производством, а дополняет их. Круг задач АСУ КПСЦ представлен в табл. 2.

Для эффективного решения задач, описанных в табл. 2, проводят подготовительную работу, связанную с измерением характеристик всех процессов в рамках потока создания ценности и их корректного внесения в базу данных системы. Для качественного выполнения этой работы возможно использование контрольных листков с данными наблюдений, которые уже использовались в бережливом производстве.

Основными результатами работы АСУ КПСЦ должны стать динамические данные об изменении текущей карты потока создания ценности при внедрении мероприятий бережливого производства, характеристики всех процессов в рамках потока, значения потерь внутри потока и эффективности всего потока или его частей.

Разрабатываемая АСУ должна удовлетворять следующим требованиям:

обеспечивать задание всей необходимой информации для описания характеристик процессов, а также возможность формирования новых характеристик процесса в случае необходимости;

давать графическое представление карты текущего состояния и позволять сделать карту будущего состояния на основании нормативных или желаемых показателей процесса;

рассчитывать потери, поддающиеся количественному измерению, а также показатели

Таблица 2

Задачи автоматизированной системы управления картированием потока создания ценности по блокам

Блоки АСУ КПСЦ	Задачи в рамках блока
нормативно-справочной информации	Ввод, хранение, корректировка данных по имеющемуся производственному оборудованию
	Ввод, хранение, корректировка данных по имеющемуся производственно-промышленному персоналу
	Ведение перечня возможных потерь
	Ведение перечня мероприятий по устранению (уменьшению) потерь каждого вида
	Расчёт расходов на устранение потерь внедрением мероприятий бережливого производства
входных данных, необходимых для lean-анализа	Ввод, хранение, корректировка информации по производимой продукции (количество, наименование, единицы измерения, план по периодам времени)
	Ввод, хранение, корректировка информации по технологическим процессам производства (данные по потоку создания ценности по каждой продукции по каждому процессу в рамках потока создания ценности)
расчёта основных показателей, необходимых для lean-анализа	Ввод данных по результатам картирования за заданный период времени
	Расчёт показателей эффективности потока по каждому картированию
	Расчёт показателей эффективности в среднем
	Расчёт показателей эффективности по карте потока при нормативных данных
	Расчёт потерь по видам
	Задание допустимых отклонений по видам потерь
	Расчёт показателей эффективности потока при допустимых отклонениях
	Определение мероприятий по улучшению потока до допустимых значений
	Расчёт затрат на внедрение мероприятий улучшения потока
выходных данных lean-анализа	Создание карты потока при нормативных значениях процессов и показатели эффективности карты
	Создание карты потока по результатам картирования и показатели эффективности
	Отклонения по процессам
	Создание карты потока при допустимых отклонениях и показатели эффективности
	Расчёт затрат на мероприятия бережливого производства

эффективности всего потока или его отдельных частей;

представлять изменение расчётных данных карты потока в динамике для возможности управления и оптимизации процессов и потока в целом.

Использование автоматизированной системы позволит повысить эффективность процессов разработки и анализа КПСЦ, ускорить расчёт эффективности показателей потока и сравнение их с целевыми значениями показателей, поставленными в качестве целей управления процессами картирования потоков, быстро формировать карты промежуточных (до-

стигнутых) состояний, что без использования АСУ затруднительно и трудоёмко.

Побочный, но чрезвычайно полезный эффект использования системы — сбор фактических временных норм производственного процесса, которые после специальной обработки могут быть использованы при корректировке в системе ранее введённых нормативов, от точности которых зависит точность планирования.

Использование АСУ расширяет возможности процесса картирования, так как содержит информацию обо всех количественных характеристиках процессов в рамках потока и позволяет рассчитать все количественно из-

меряемые потери, которые далеко не всегда отражаются на картах, построенных вручную.

АСУ КПСЦ позволит составить карту для потока, состоящего из большого количества процессов, а также может объединять различные части потока в один общий поток или, наоборот, разбивать один большой поток на части.

Предлагаемая система может быть разработана как самостоятельный программный продукт, так и как часть ERP-системы.

На сегодняшний день существует большое количество АСУ производством, позволяющих выполнять оперативное управление, но они не направлены на решение задач именно бережливого производства, на обеспечение минимальных затрат с точки зрения создания определённых запасов и контроля на определённых интервалах времени.

Определены концептуальные подходы к разработке АСУ картирования потока создания ценности.

Библиографические ссылки

1. Вумек Дж., Джонс Д. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. М.: Альпина Бизнес Букс, 2013. 472 с.

2. Синго С. Кайдзен и искусство творческого мышления — механизм научного мышления. Нью-Йорк: PCS Инк и Энна Продактс, 2007. 282 с.

3. Хоббс Д.П. Внедрение бережливого производства: практическое руководство по оптимизации бизнеса. М.: Гревцов Паблишер, 2007. 352 с.

4. Суетина Т.А., Махтеева Е.А. Lean-программа как способ реализации lean-преобразований на предприятии // Современные технологии управления. 2012. № 12 (24). С. 77—82.

5. Ротер М., Шук Д. Учись видеть бизнес-процессы. Практика построения карт потоков создания ценности / Пер. с англ., 2-е изд. М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. 140 с.

УДК 613.6, 656.7

А.В. Богомолов, д-р техн. наук, проф.

(Центральный научно-исследовательский институт
Военно-воздушных сил Минобороны России, г. Москва),

С.П. Драган, канд. техн. наук

(Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна, г. Москва)

a.v.bogomolov@gmail.com

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ И ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА

Приведена характеристика современных технологий автоматизированного мониторинга и акустической безопасности персонала промышленных производств, включая технологии коллективной и индивидуальной шумозащиты, защиты от воздушной акустической вибрации и активной шумозащиты. Представлены общие правила выбора технологий акустической безопасности персонала, сформулированы приоритетные направления совершенствования технологий.

Ключевые слова: акустическая безопасность; автоматизированный акустический мониторинг; технологии индивидуальной шумозащиты; технологии коллективной шумозащиты.

The modern technology characteristic of the automatic monitoring and the personnel acoustic safety of the industrial production, including technology of the collective and individual noise protection, protection from air acoustic vibrations and active noise protection activeis adduced. General rules for the selection of the personnel acoustic safety ensuring technology are introduced; identified priority directions of the technologies improvement are stated.

Key words: acoustic safety; automatic acoustic monitoring; the individual noise protection technology; the collective noise protection technology.

Научно-технический прогресс способствует повышению мощности промышленного оборудования, сопровождающемуся увеличением неблагоприятных факторов условий деятельности персонала. Ведущее место среди таких факторов занимает шум: более двух миллионов россиян работают в условиях повышенного воздействия акустических колебаний (шума, инфразвука и ультразвука), около 25 % рабочих мест персонала промышленности не соответствуют нормативам по шуму [1, 2].

В большинстве случаев обеспечить акустическую безопасность персонала снижением уровня шума в источнике образования невозможно, так как снижение мощности оборудования снижает его производительность. В этом случае наиболее приемлемым способом повышения акустической безопасности персонала являются технологии, обеспечивающие его индивидуальную и коллективную защиту от шума.

Наиболее остро проблема обеспечения акустической безопасности персонала стоит в авиационной промышленности, прогресс которой приводит к росту интенсивности и времени экспозиции *авиационного шума*, имеющего характерные особенности [1, 3]:

широкополосный спектр с наличием нескольких максимумов спектральной плотности мощности в низко-, средне- и высокочастотных звуковых диапазонах с выраженной инфразвуковой составляющей;

уровни звукового давления практически во всех октавных частотах превышают 100 дБ, что позволяет классифицировать шум как высокоинтенсивный;

шумовое воздействие носит циклический характер — периоды активной нагрузки длятся от нескольких десятков минут до нескольких часов и чередуются с паузами, длительность которых изменяется в тех же пределах.

Из 45 основных профессий авиационной промышленности условия труда представителей 19 относят к вредным [3]. Профессиональные и профессионально обусловленные заболевания выявлены у 91 % персонала авиационной промышленности. Причём у большинства (свыше 75 %) из них установлена патология двух и более систем организма [1, 4].

Проблема защиты от авиационного шума усугубляется отсутствием табельных средств индивидуальной (СИЗ) и коллективной (СКЗ) защиты, обеспечивающих эффективную защиту персонала. Применяемые персоналом СИЗ и СКЗ, как правило, неэффективны с

точки зрения шумозащиты, что повышает риски здоровью и работоспособности [1, 4—6]. Риски здоровью обуславливают снижение возраста выхода персонала на пенсию по состоянию здоровья, а следовательно, и преждевременную потерю высококвалифицированных кадров. Риски работоспособности способствуют снижению надёжности профессиональной деятельности персонала, т.е. повышается вероятность ошибочных действий.

Уровень развития авиационной промышленности и связанных с ней технологий является показателем уровня научно-технического прогресса, так как здесь традиционно апробируют и реализуют самые современные технологии. Поэтому технологии обеспечения акустической безопасности персонала авиационной промышленности могут найти применение в других отраслях промышленности.

Технологии автоматизированного мониторинга акустической безопасности. Мониторинг акустической безопасности предполагает оценивание шума окружающей среды, включающего специфичный (связанный с исследуемыми источниками шума) и остаточный (шум окружающей среды без наличия специфичного шума) [1, 2]. Обязательной частью любой программы обеспечения акустической безопасности является проведение объективных акустических измерений. Правила и стандарты определяют показатели, которые подлежат измерению, и, в большинстве случаев, устанавливают рекомендации по настройке измерительного оборудования в зависимости от различных факторов (метеорологических, климатических).

Типовыми являются акустические измерения, которые выполняют на большом расстоянии от фасадов зданий и препятствий; с подветренной стороны; в сухую погоду при скорости ветра менее 5 м/с; с размещением микрофона на высоте 1,2—1,5 м над уровнем земли.

В качестве показателя промышленного шума Международным стандартом ISO 1996-2 определена величина шумового воздействия, откорректированная с учётом ряда факторов, увеличивающих степень раздражения (импульсный характер шума, время суток и др.), и установлено, что граничные оценки следует определять в зависимости от интервалов времени, связанных с характеристиками источника/источников и приёмника/приёмников шума. Расчёт уровней шума из-за большого объёма данных, характерных для акустических измерений в реальном масштабе времени, выполняют автоматизированно.

При акустическом мониторинге часто применяют компьютерные модели окружающей среды с указанием идентифицированных шумовых источников, топографических параметров и особенностей местности, влияющих на распространение шума до исследуемых точек (приёмника).

Современное автоматизированное оборудование для акустических измерений может функционировать в полевых условиях при отсутствии обслуживающего персонала, регистрировать уровни шума окружающей среды, отправляя отчёты по беспроводному протоколу. Участие оператора в процедуре акустических измерений необходимо при мониторинге акустической безопасности в сложных условиях: ограничено время, затруднён доступ к измерительной площадке, невозможно подключить оборудование к сети или сетевое питание подаётся в импульсном режиме, имеет место неожиданное событие или измерение прервано и оператор не сможет выполнить повторные измерения.

В большинстве случаев мониторинга акустической безопасности персонала рациональным является сочетание измерений при участии оператора с измерениями в автоматическом режиме. В этом случае присутствие оператора при проведении измерений в рамках экспериментальных исследований и при мгновенных проверках на измерительной площадке обязательно, а режим автоматизированных измерений применяют при долгосрочном или непрерывном мониторинге акустической безопасности.

Технологии коллективной защиты от авиационного шума. Важным направлением шумозащиты является применение устройств и сооружений, позволяющих снизить уровень шума, непосредственно воздействующего на человека, за счёт снижения мощности акустического воздействия. Для этого предполагается использование отражателей акустической волны, применение звукопоглощающих конструкций, звукоизоляцию помещений и т.д. Инженерно-технические решения, реализующие названные мероприятия, относят к *средствам коллективной защиты от шума* [1, 3].

Для борьбы с шумом могут использоваться глушители — инженерно-технические конструкции, позволяющие уменьшить шум вблизи от источника его образования. Глушители авиационного шума представляют собой специальные сопла, снижающие интенсивность шума от выхлопной струи двигателя. Это, как

правило, сооружения массой 30—50 т, которые из-за громоздкости не находят широкого применения (кроме снижения авиационного шума при опробовании двигателей на земле).

Современные СКЗ представляют собой защитные модули, сконструированные по типу контейнеров (сборно-разборные сооружения), обеспечивающие комфортные акустические и социально-бытовые условия для персонала. При этом предварительно разрабатывают конструкцию звукопоглощающих панелей — внутренней обшивки СКЗ, т.е. добиваются максимальных значений эквивалентной площади звукопоглощения.

Кроме того, современные СКЗ позволяют создать оптимальные микроклиматические условия (по температуре, влажности, освещённости), т.е. с позиции "затраты—выгода" налицо экономическая целесообразность применения СКЗ.

Технологии индивидуальной защиты от авиационного шума. Средства индивидуальной защиты от шума (противошумы) используют главным образом тогда, когда СКЗ не обеспечивают его снижение до безопасных уровней. К противошумам относят "внутренние" (устанавливаемые в слуховой проход) противошумные вкладыши (беруши, тампоны, втулки и др.), противошумные наушники и противошумные шлемы.

В настоящее время разработано значительное количество модификаций СИЗ, отличающихся как внешним видом и качеством изготовления, так и акустической эффективностью. Заглушающая способность СИЗ различных производителей неодинакова, разброс величин шумопоглощения составляет [1, 7]:

в области низких (63—250 Гц) частот — 2—27 дБ для наушников и 1—22 дБ для шлемов;

в области средних (500—1000 Гц) частот — 4—36 дБ для наушников и 14—39 дБ для шлемов;

в области высоких (свыше 1000 Гц) частот — 23—42 дБ для наушников и 22—56 дБ для шлемов.

Установлено, что величина шумоглушения чашками противошумных наушников на низких частотах существенно зависит от характеристик уплотняющего слоя (амбишюров), на средних частотах — от характеристик наполнителя, особенностей и конструкции корпуса чашки, а на высоких частотах — от характеристик материала, из которого изготовлен корпус чашек наушников [1, 7].

В перечень СИЗ, регламентированный ГОСТ 12.4.011—89 "Система стандартов безо-

пасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация" включен противошумный шлем. Однако требования к подобным СИЗ в системе стандартов безопасности труда не указаны, имеющаяся информация о подобных изделиях скупая и разрозненная. Очевидно, что противошумные шлемы не нашли широкого применения на практике.

Некоторые специалисты рекомендуют использовать в качестве противошумных мягкие и упругие авиационные (например, вертолётные) защитные шлемы, которые за счёт значительной конструктивной массы обладают должной акустической эффективностью в области высоких частот (1000—8000 Гц).

На практике, как правило, отмечают действие на персонал авиационного шума в сочетании с другими неблагоприятными факторами условий профессиональной деятельности. Поэтому представляют интерес разработки по созданию средств комбинированной защиты персонала. В частности, в комплект СИЗ от шума (шлем, наушники), предназначенных для персонала, работающего на открытом воздухе, необходимо включить очки или щиток для защиты глаз от избыточной инсоляции, пыли и металлической окалины.

Технологии защиты от воздушной акустической вибрации. При совпадении частоты шума и частоты колебаний внутренних органов человека, имеющих собственные частоты от 2 до 80 Гц, у него возникают болевые ощущения, обусловленные резонансными явлениями. Поэтому для защиты от шумов с высокими (более 125 дБ) уровнями звукового давления применяют шлемы и противошумные костюмы, закрывающие голову и тело человека. В состав комплекта противошумного снаряжения для работы в таких условиях входят противошумный шлем, противовибрационный противошумный пояс (жилет, комбинезон), который должен обеспечивать снижение общего уровня шума в пододёжном пространстве в области груди и живота на 5—25 дБ (при среднегеометрических частотах октавных полос шумовых колебаний 125—8000 Гц).

Выполнение защитных, эксплуатационных и гигиенических требований, предъявляемых к таким образцам СИЗ, возможно только при использовании специальных материалов, обеспечивающих поглощение энергии воздействующего шума. Ткани и материалы со сложным химическим составом волокон, специальными пропитками демонстрируют значительно лучшие противошумные свой-

ства. Дополнительная обработка материала клеевыми прокладочными материалами с полиамидным точечным покрытием или полимерными клеями, нанесёнными тонким слоем на изнаночную сторону основной ткани, позволяет создать между слоями ткани дополнительное пространство, увеличить количество граничащих сред, и, следовательно, повысить акустическую эффективность СИЗ.

Технологии активной защиты от авиационного шума. Все описанные выше средства и методы обеспечения акустической безопасности персонала относят к пассивным, обеспечивающим поглощение акустической энергии. Однако имеются примеры эффективного использования активных средств защиты от шума, принцип действия которых основан на генерировании инвертированного (имеющего противоположные фазы) шумового сигнала, который, суммируясь с исходным шумовым сигналом по принципу интерференции, обеспечивает снижение акустической энергии [1, 7]. Показано, что противошумные наушники с реализацией активного шумоподавления позволяют обеспечить на низких частотах дополнительную эффективность подавления широкополосного шума не менее, чем на 10 дБ и тонального шума не менее 20 дБ, что существенно для низкочастотного диапазона.

Активные противошумные наушники появились относительно недавно. Они позволяют не только защитить органы слуха, но и в реальном времени, без запаздывания, плавно уменьшают уровень звукового давления на оглушающих частотах до безопасного уровня. Кроме того, современные образцы наушников с активным шумоподавлением, используя стереофонический усилитель слабых шумов, позволяют различать даже самые слабые и отдалённые звуки, сохраняя возможность определения направления на источник звука.

Следует отметить, что усиление слабых звуков имеет и негативные последствия, так как система активного шумоподавления не распознает "полезность" звука, а усиливает все тихие звуки в заданном (речевом) частотном диапазоне. При этом человек будет постоянно слышать шорохи одежды, звуки шагов и другие внешние звуки, обычно практически не слышимые. Микрофоны, встроенные в чашки наушника с активным шумоподавлением, не защищены от ветра, поэтому передаваемый фоновый шум может вызывать серьёзное раздражение, особенно при продолжительной работе в таких условиях (неизбежно будут

усиливаться и хорошо слышны звуки специальной техники и авиационных двигателей, работающих даже на значительном удалении). Если снизить громкость воспроизводимого сигнала, то, соответственно, снизится и громкость воспроизводимых "полезных" звуков.

Опыт эксплуатации показывает, что существенных преимуществ использования наушников с активным шумоподавлением перед обычными наушниками в области частот 125—8000 Гц нет. Лимитирующим фактором является высокая стоимость наушников с активным шумоподавлением, в разы превосходящая стоимость пассивных наушников, а также необходимость обеспечения таких наушников источником питания (батареями).

Все эффективные пассивные СКЗ от низкочастотного шума (покрытия, перегородки, пассивные резонаторы) требуют очень больших массогабаритных характеристик. В этом случае фактически не существует альтернативы применению методов и средств активного шумогашения, основанных на использовании деструктивной интерференции и активных резонаторов.

Выбор средств защиты от шума. Для защиты персонала от шума, в спектре которого преобладают средние и высокие частоты звукового диапазона, а уровень инфразвука не превышает 100 дБА, необходимо ориентироваться на уровень шума. При уровне шума до 100 дБА следует использовать противошумы: втулки, вкладыши, тампоны или наушники, акустическая эффективность которых, как правило, не превышает 20 дБ в области средних и высоких звуковых частот. С позиции защиты органа слуха и эргономических свойств предпочтение отдают противошумным наушникам [1].

При уровнях шума свыше 100 дБА для защиты органа слуха целесообразно применять противошумные наушники в комбинации с другими типами противошумов (вкладыши, беруши). В диапазоне частот от 1 до 8 кГц такая комбинация обеспечивает ослабление звука на 20—30 дБ. На частотах ниже 500 Гц многие противошумы малоэффективны (ослабление звука не превышает 10—15 дБ).

При уровнях авиационного шума свыше 110 дБА необходима защита не только воздушного, но и костного пути передачи звука в орган слуха. В этом случае целесообразно использовать противошумный шлем.

При уровнях авиационного шума свыше 125 дБА необходима защита не только органа слуха и головы, но и грудной клетки и брюшной полости, чтобы предупредить феномен

"воздушной вибрации". Это обеспечивается с помощью противошумного жилета и пояса.

На рабочих местах при действии авиационного шума, в спектре которого уровень инфразвука превышает 100 дБА, необходимо использовать специальные средства защиты: противошумные наушники, шлем и жилет [1, 7].

Важная роль в обеспечении акустической безопасности персонала принадлежит организационно-техническим мероприятиям по оптимизации условий профессиональной деятельности (применение СКЗ, снижение продолжительности пребывания в зоне шума, чередование периодов работы и отдыха и др.). Для этого необходимо использовать чередование периодов активной акустической нагрузки с периодами акустической паузы (пассивные периоды акустической нагрузки). В пассивный период акустической нагрузки важно создать комфортные акустические условия пребывания персонала на рабочем месте.

Перспективные технологии обеспечения акустической безопасности персонала. Обобщая имеющийся опыт, следует подчеркнуть, что наибольшего эффекта защиты от авиационного шума можно достичь при комплексном использовании инженерных (коллективных) и индивидуальных противошумных средств. Совместное применение СКЗ и СИЗ обеспечивает комфортную акустическую обстановку, позволяя управлять суммарным временем работы персонала в условиях воздействия авиационного шума.

Перспективными являются следующие направления обеспечения акустической безопасности персонала:

разработка и внедрение в практику универсального противошумного изделия с использованием эффективных шумопоглощающих материалов и инновационных технологий, быстро адаптируемого под различные цели и задачи с учётом особенностей акустической обстановки и (или) изменяющего свои свойства в зависимости от характеристик акустической обстановки на рабочих местах;

внедрение в СИЗ беспроводных малогабаритных переговорных устройств, вмонтированных в чашки наушников (или в шлем) для осуществления качественной коммуникации между персоналом;

применение эффективных средств активного гашения звука в имеющихся пассивных СИЗ и СКЗ;

улучшение эргономических характеристик СИЗ и СКЗ.

Библиографические ссылки

1. Солдатов С.К., Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Человек и авиационный шум // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 9 (приложение). 24 с.
2. Петрова С.С. Обеспечение акустической безопасности технологических процессов // Безопасность жизнедеятельности. 2007. № 2. С. 8—14.
3. Зинкин В.Н., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Солдатов С.К., Шешегов П.М. Анализ эффективности средств защиты от шума во взаимосвязи с профессиональной надёжностью специалистов "шумовых" профессий // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2011. № 3. С. 70—76.
4. Родькин В.П., Усатов А.Н., Ростиков В.П. Социально-гигиенический мониторинг условий труда и

здоровья работающих на предприятии авиационного моторостроения // Национальные приоритеты России. 2013. № 2 (9). С. 56—59.

5. Симухин В.В., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Ворона А.А. Методические аспекты нормирования импульсных промышленных шумов // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 10. С. 32—35.

6. Высоцкая В.И., Добровольский В.И., Маликов С.Б. Разработка комплекса мер по повышению качества высокотехнологической продукции авиационной промышленности // Научные труды (Вестник МАТИ). 2013. № 20 (92). С. 276—281.

7. Драган С.П., Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Солдатов С.К., Дроздов С.В. Акустическая эффективность средств защиты от шума // Медицинская техника. 2013. № 3. С. 34—36.

УДК 681.513

К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф., **Чан Нгок Хьонг**

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

neysipin@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ КОРРЕКЦИИ АВТОНОМНЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены методы компенсации погрешностей автономных инерциальных навигационных систем. Предложен способ формирования компенсационных сигналов на основе информации с датчиков углов прецессии.

Ключевые слова: автономная инерциальная навигационная система; динамические погрешности; коррекция; углы прецессии.

The error compensation methods of the autonomous inertia navigation systems are considered. A method for the compensation signals forming on the basis of information from sensors precession angles sensors is proposed.

Key words: autonomous inertia navigation system; the dynamic errors; correction, the precession angles.

Введение. Эффективное решение задач управления летательными аппаратами (ЛА) во многом определяется уровнем развития измерительной техники, в частности, качеством информационно-измерительных сигналов различных навигационных систем, используемых для управления. Источником информационно-измерительных сигналов о местоположении, ориентации, скорости и других параметрах движения ЛА являются различные измерительные системы и навигационные комплексы. Базовой системой навигационного комплекса обычно является инерциальная навигационная система (ИНС), которая часто используется как автономная система.

Измерительные сигналы ИНС имеют погрешности, обусловленные конструктивными

особенностями, условиями их функционирования и особенностями режимов полёта ЛА. Повышение точности измерительной информации алгоритмическим путём представляет собой важную и актуальную задачу, так как позволяет быстро и с минимальными затратами повысить точность навигационной информации серийных систем.

Известны различные алгоритмы коррекции автономных ИНС [1—3]. Наиболее эффективные схемы коррекции позволяют компенсировать динамические погрешности на основе сигналов с датчиков углов прецессии. К современным автономным ИНС предъявляются всё более высокие требования по точности, поэтому создание высокоточных алгоритмов коррекции является важной и

актуальной задачей. В то же время алгоритмы коррекции должны быть простыми при реализации в спецвычислителе, что особенно актуально для грубых ИНС, отличающихся низкой себестоимостью и надёжностью.

Алгоритмы коррекции автономных ИНС.

Рассмотрим алгоритмы коррекции автономных ИНС на основе сигналов с датчиков углов прецессии.

Известен метод компенсации, основанный на приближённом формировании угловых скоростей гиросtabilизированной платформы (ГСП) вокруг осей стабилизации как функции соответствующих углов прецессии [2, 3].

Этот метод компенсации нелинейных гироскопических моментов позволяет увеличить точность работы ИНС и инерциальных систем управления.

Движение ГСП, построенной на базе трёх двухстепенных гироскопов с интегральной коррекцией и настроенной на период Шуллера, может быть представлено следующей системой динамических уравнений [2, 3]:

$$\begin{aligned}
 J_x \ddot{\alpha} + D_x \dot{\alpha} - H(\dot{\delta} + \dot{\mu}) - L^{-1}[k_1 W_1(s)\delta(s)] &= M_x; \\
 J_y \ddot{\beta} + D_y \dot{\beta} - H(\dot{\lambda} + \dot{\mu}) - L^{-1}[k_1 W_1(s)\lambda(s)] &= M_y; \\
 J_z \ddot{\mu} + D_z \dot{\mu} - H(\dot{\vartheta} + \dot{\mu}) - L^{-1}[k_1 W_1(s)\vartheta(s)] &= M_x; \\
 J_\Gamma \ddot{\delta} + h\dot{\delta} - H\dot{\alpha} + k \int (\dot{V}_y + g\alpha) &= \\
 = H \frac{V_y}{R} - H\dot{\beta}\delta + M_\delta; & \\
 J_\Gamma \ddot{\lambda} + h\dot{\lambda} - H\dot{\beta} + k \int (\dot{V}_x + g\beta) &= \\
 = -H \frac{V_x}{R} - H\dot{\alpha}\lambda + M_\lambda; & \\
 J_\Gamma \ddot{\vartheta} + h\dot{\vartheta} + H\dot{\mu} &= H\dot{\beta}_\vartheta + M_\vartheta,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $хуz$ — ортогональная система координат, жёстко связанная с ГСП; α, β, μ — угловые координаты ориентации ГСП относительно сопровождающего трёхгранника $\xi\eta\zeta$ (углы стабилизации); $\delta, \lambda, \vartheta$ — углы прецессии гироскопов; H — собственный кинетический момент гироскопа (все три гироскопа одинаковые); J_x, J_y, J_z — моменты инерции ГСП относительно осей стабилизации; J_Γ — момент инерции гироскопа относительно оси прецессии; D_x, D_y, D_z — удельные моменты сил скоростного (вязкого) трения, приведённые к осям стабилизации ГСП; h — удельный момент сил скоростного трения вокруг оси прецессии гироскопа; k_1 — статический коэффициент усиления в канале стабилизации (разгрузки); M_x, M_y, M_z — моменты внешних и инерционных сил, не учтённых в левых частях первых трёх уравнений; g — ускорение силы тяжести; R — радиус Земли;

V_x, V_y — проекции абсолютной горизонтальной скорости объекта на оси ГСП; $M_\delta, M_\lambda, M_\vartheta$ — возмущающие моменты, включающие инерционные моменты, не учтённые в левых частях вторых трёх уравнений; $k = H/R$ — коэффициент интегральной коррекции; $W_1(s)$ — передаточная функция канала разгрузки, которая полагается одинаковой для всех трёх каналов; L^{-1} — оператор обратного преобразования Лапласа.

Погрешности ИНС обусловлены гироскопическими моментами вида $H\dot{\alpha}\lambda$ и $H\dot{\beta}\delta$, которые вызывают дрейф ГСП ($\epsilon = \beta\delta$), что приводит к существенным погрешностям. Для их компенсации сформированы сигналы коррекции на соответствующие моментные датчики гироскопов, пропорциональные величинам возмущающих нелинейных гироскопических моментов.

С некоторым приближением производные по времени от выражений для углов ориентации ГСП на частотах вынужденных колебаний $\omega \gg \omega_0$ можно представить в виде:

$$\dot{\alpha} = -\frac{J_\Gamma}{H} \ddot{\delta} - \frac{h}{H} \dot{\delta}; \quad \dot{\beta} = \frac{J_\Gamma}{H} \ddot{\lambda} + \frac{h}{H} \dot{\lambda}. \tag{2}$$

Имея информацию о текущих значениях углов прецессии, дифференцированием по времени сигналов с датчиков углов прецессии и использованием формул (2), сформированы компенсационные моменты.

Подача этих сигналов на моментные датчики гироскопов ГСП ИНС существенно уменьшает влияние нелинейных гироскопических моментов на точностные характеристики ИНС. Недостатком такой компенсации является необходимость брать производные по времени от сигналов с датчиков углов прецессии, что приводит к увеличению шумов, имеющих место в последних.

Другой известный метод компенсации влияния нелинейного гироскопического момента, вызывающего дрейф ГСП ИНС, заключается в коррекции выходной информации системы [3]. Этот метод предполагает определение ошибок ИНС, вызванных дрейфом ГСП, который обусловлен влиянием нелинейных гироскопических моментов. Зависимость среднего значения ошибки ИНС в определении местоположения от угла прецессии и угловой скорости отклонения ГСП от плоскости горизонта имеет вид:

$$\Delta y(t) = -\left(\frac{J_\Gamma}{H} \ddot{\lambda} + \frac{h}{H} \dot{\lambda}\right)^* \delta R \left(t - \frac{1}{\omega_0} \sin \omega_0 t\right), \tag{3}$$

где $\ddot{\lambda}, \dot{\lambda}$ и δ определены с учётом выражения (2).

Недостатком методов коррекции автономных ИНС является невысокая точность.

Другой способ компенсации ошибок ИНС без использования внешних измерений основан на методах линейного оценивания. Реализация этой схемы известна только для случая движения несущего ИНС объекта с постоянной скоростью [1]. При этом в качестве уравнений объекта в алгоритме оценивания применяются уравнения ошибок автономной ИНС, а сигналы с акселерометров в условиях движения ЛА с постоянной скоростью используются в качестве измерений. В практических приложениях ЛА совершает, как правило, сложное ускоренное движение, интенсивное маневрирование, в связи с чем, использовать эту схему коррекции не представляется возможным. Повысить точность выходной информации ИНС, используя только внутренние связи, можно не накладывая ограничений на режим полёта.

Компенсация ошибок ИНС предполагает формирование сигналов коррекции, пропорциональных ошибкам системы в определении скорости, углам отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника и дрейфам ГСП. В качестве уравнений объекта в алгоритме оценивания приняты уравнения ошибок ИНС, выраженные через углы отклонения ГСП относительно опорной системы координат, а в качестве измерений — углы отклонения ГСП от плоскости горизонта и заданного направления в азимуте, сформированные на основе информации, снимаемой с датчиков углов прецессии гироскопов.

Введём обозначения: Φ_1, Φ_2, Φ_3 — угловые координаты ориентации ГСП относительно выбранного сопровождающего трёхгранника; M_i ($i = 1, 2, 3$) — прочие малые возмущающие моменты, имеющие случайный характер, не рассматриваются. Углы ориентации ГСП представлены в виде:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= -\frac{J_\Gamma}{H} \dot{\delta} - \frac{h}{H} \delta + \frac{1}{H} \times \\ &\times \int \left[(Jr\ddot{\lambda} + h\dot{\lambda})\delta - \frac{1}{H} (Jr\ddot{\vartheta} + h\dot{\vartheta})(Jr\dot{\lambda} + h\lambda) \right] dt; \\ \Phi_2 &= \frac{J}{H} \dot{\lambda} + \frac{h}{H} \lambda + \frac{1}{H} \times \\ &\times \int \left[(J\ddot{\delta} + h\dot{\delta})\lambda + \frac{1}{H} (J\ddot{\vartheta} + h\dot{\vartheta})(J\dot{\delta} + h\delta) \right] dt; \\ \Phi_3 &= -\frac{J}{H} \dot{\vartheta} - \frac{h}{H} \vartheta + \frac{1}{H} \times \\ &\times \int (J\ddot{\lambda} + h\dot{\lambda})\vartheta + \frac{1}{H} (J\ddot{\delta} + h\dot{\delta})(J\dot{\lambda} + h\lambda) dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, получены формализованные зависимости углов ориентации ГСП от углов прецессии гироскопов. Сформированные в соответствии с формулами (4) углы ориентации можно использовать в алгоритме оценивания в качестве измерения.

Измерительные сигналы для алгоритма оценивания представляют собой зависимости углов отклонения и дрейфов ГСП, а также ошибок ИНС в определении скорости от углов прецессии гироскопов.

Однако реализация фильтра Калмана сопряжена с рядом трудностей, обусловленных отсутствием достоверной априорной информации о статистических характеристиках шумов и др., что приводит к расходимости процесса оценивания. Использование адаптивных алгоритмов оценивания осуществляется при коррекции высокоточных и, соответственно, дорогих ИНС. Поэтому для серийных грубых ИНС целесообразно применять более простые алгоритмы коррекции [4, 5].

Способ формирования сигналов коррекции в выходной информации ИНС. Недостатком рассмотренных методов коррекции автономной ИНС является эффект увеличения шумов из-за дифференцирования сигналов с датчиков углов прецессии. В практических приложениях рекомендуется осуществлять усреднение этих сигналов. Выходной сигнал современных ИНС является цифровым, поэтому в дальнейшем все формулы представим в дискретной форме.

При формировании сигналов коррекции воспользуемся известным способом формирования приведённых измерений [4].

Пусть погрешности ИНС описываются уравнением вида:

$$x_k = \Phi x_{k-1} + W_{k-1}, \quad (5)$$

где x_{k-1} — вектор состояния; w_{k-1} — вектор входного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием; Φ — $(n \times m)$ -матрица системы.

Часть вектора состояния измеряется:

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad (6)$$

где z_k — m -вектор измерений; H — $(m \times n)$ -матрица измерений; v_k — m -вектор измерительного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием, причём v и w не коррелированы между собой, т.е. $M[v_j w_k^T] = 0$.

Выразим измерения через вектор состояния на первом подтакте измерений:

$$z^* = Sx_1 + v^*, \tag{7}$$

$$\text{где } z^* = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}; S = \begin{bmatrix} H \\ H\Phi \\ \vdots \\ H\Phi^{n-1} \end{bmatrix}; v^* = \begin{bmatrix} v_1 \\ Hw_1 + v_2 \\ \dots \\ H\Phi^{n-2}w_1 + \dots + Hw_{n-1} + v_n \end{bmatrix}.$$

Введем обозначение

$$y = S^{-1}z^*. \tag{8}$$

Уравнение для i -й компоненты вектора y имеет следующий вид:

$$y^i = a_1z_1 + a_2z_2 + \dots + a_nz_n, \tag{9}$$

где y^i — элемент вектора y ; a_i — элементы i -й строки матрицы S^{-1} .

Уравнения ошибок ИНС для одного из горизонтальных информационных каналов имеют вид (5):

$$x_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \varphi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ \frac{T}{R} & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 - \beta T \end{bmatrix};$$

$$W_{k-1} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ \omega_{k-1} \end{bmatrix}.$$

В уравнении измерений (6) матрица $H = [0 \ 1 \ 0]$. Тогда матрица S^{-1} будет иметь вид:

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} \left[-\frac{R}{T} + \frac{R}{\beta T^2} + \frac{g}{\beta} \right] & \left[-\frac{R}{\beta T^2}(2 - \beta T) \right] & \frac{R}{\beta T^2} \\ 1 & 0 & 0 \\ \left[-\frac{g}{\beta R} - \frac{1}{\beta T^2} \right] & \frac{2}{\beta T^2} & -\frac{1}{\beta T^2} \end{bmatrix}.$$

В соответствии с выражением (9) сигналы приведённых измерений автономной ИНС принимают вид:

$$Z(\delta V) = \left(-\frac{R}{T} + \frac{R}{\beta T^2} + \frac{g}{\beta} \right) z_k - \frac{R}{\beta T^2}(2 - \beta T)z_{k+1} + \frac{R}{\beta T^2}z_{k+2};$$

$$Z(\varphi) = z_k; \tag{10}$$

$$Z(\varepsilon) = \left(-\frac{g}{\beta R} - \frac{1}{\beta T^2} \right) z_k + \frac{2}{\beta T^2}z_{k+1} - \frac{1}{\beta T^2}z_{k+2}.$$

В выражении (10) скалярные измерения z_k, z_{k+1}, z_{k+2} являются функциями углов прецессии и формируются на основе информации с датчиков углов соответствующих гироскопов в соответствии с выражением (4). Сигналы с датчиков углов прецессии предварительно усредняются и из уже сглаженных сигналов формируется вектор приведённых измерений. Корректирующий сигнал, пропорциональный вектору приведённых измерений, используется для компенсации погрешностей в выходной информации ИНС.

Таким образом, предложена модификация способа формирования сигналов коррекции автономной ИНС в выходной информации.

Разработанные формализованные зависимости (10) с учётом (4) можно использовать в качестве входных измерительных сигналов для генетического алгоритма (ГА). С помощью ГА строятся модели динамических погрешностей ИНС, которые применяются для оценки точности ИНС в полёте, в системах контроля навигационного оборудования и др.

Заключение. Модифицированный алгоритм коррекции автономной ИНС позволяет компенсировать динамические погрешности за счёт использования более подробной модели и использования ГА, позволяющего строить высокоточные индивидуальные модели динамических погрешностей ИНС в конкретных условиях работы системы.

Разработанный модифицированный алгоритм коррекции автономной ИНС, основанный на сигналах с датчика угла прецессии, отличается простотой реализации в спецвычислителе или БЦВМ.

Библиографические ссылки

1. Кузовков Н.Т., Салычев О.С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение. 1982. 215 с.
2. Неусыпин К.А., Чон Ван Кыонг. Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. 2006, № 2. С. 14—19.
3. Неусыпин К.А. Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд. МГОУ. 2009. 500 с.
4. Салычев О.С. Скалярное оценивание многомерных динамических систем. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.
5. Proletarsky A.V., Neuspipin K.A. Adaptive filtering for navigation systems of robot-aerocraft. Science & military, V. 5, 2010. Pp. 75—80.

УДК 004.8.681.3.06

А.Н. Афанасьев, д-р техн. наук, **В.С. Хородов**
(Ульяновский государственный технический университет)

v.khorodov73@gmail.com

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ VHDL-ОБЪЕКТОВ

Предложена распределённая система проектирования сложных VHDL-программ, в основу организации и функционирования которой положен многоагентный подход. На базе цветных сетей Петри разработана сетевая модель системы.

Ключевые слова: распределенное проектирование; многоагентный подход; VHDL; сети Петри.

Designing distributed system of the complex VHDL-programs, which organization and functioning based on the multi-agent approach, is proposed. On the basis of colored Petri nets developed a network system model is developed.

Key words: distributed designing; multi-agent approach; VHDL; Petri nets.

Введение. Процесс "затвердевания" программного обеспечения (software), начатый в 80-х гг. прошлого столетия, в связи со значительными успехами в области микросхемотехники приобретает в настоящее время материальное воплощение в виде методологий проектирования сверхбольших интегральных схем (СБИС) "система на кристалле" [1]. При этом объём RTL-кода увеличился до более одного миллиона строк, а количество логических вентилях возросло до ста миллионов [2]. В настоящее время объём создаваемого кода на языках описания аппаратуры (Hardware Description Language — HDL), являющихся основным инструментом при проектировании СБИС, и количество логических вентилях в проектируемых схемах выступают одними из основных факторов, которые характеризуют возрастание сложности таких проектов и существенно влияют на их успешность.

Приведём ряд примеров: внутрисалонная информационно-управляющая система (Cabin Intercommunication Data System, CIDS) — более чем 5 млн строк кода, написанных, в основном, на языках Си, Java и VHDL; описание поведенческого и структурного уровней микропроцессора Chameleon, разработанного SGS-THOMSON Microelectronics, — нескольких сотен тысяч строк; кристалл SPARCv9 с тестами и окружением — около 160 тыс. строк на языке Verilog; большие аппаратные конструкции, которые включают несколько интегральных схем специального назначения (ASIC) и микропроцессоры, могут достигать размеров нескольких сотен тысяч строк VHDL-кода и тысяч компонентов [3].

Аналогично разработке программного обеспечения сложных автоматизированных систем для реализации подобных проектов и повышения их успешности используется коллективное проектирование, реализованное в сетевых системах. Одним из перспективных направлений этой предметной области является разработка и использование распределённых систем и технологий.

В основе организации коллективной параллельной разработки устройств лежат принципы модульности и иерархичности. Использование модульного проектирования позволяет проводить коллективную разработку, разделяя задачи между отдельными участниками проекта в соответствии с их квалификацией. Структура программы на языке VHDL, представляющая собой модель устройства, позволяет обеспечивать разработку и эффективное моделирование иерархических компонентов.

Ниже предлагается многоагентная система распределённого проектирования программ на языке VHDL. Разработана модель системы на базе цветных сетей Петри.

Многоагентная система распределённого проектирования. Многоагентная система (МАС) представляет собой совокупность взаимосвязанных агентов, способных взаимодействовать друг с другом и окружающей средой, обладающих определёнными интеллектуальными способностями и возможностью индивидуальных и совместных действий [4].

Структура многоагентной системы распределённого проектирования представлена на рис. 1. Выделены следующие типы агентов: интерфейсный, управления проектными

задачами, разработки проектного решения, синтеза проектных решений, маршрутизации, поисковый, базы знаний и рабочей памяти.

Интерфейсный агент (interface-agent [INA]), взаимодействуя с проектировщиком и агентом маршрутизации, выполняет связующую роль.

Агент управления проектными задачами (management agent project tasks [МАРТ]) осуществляет формирование параллельной сетевой схемы задач (ПССЗ) и распределение проектных задач между проектировщиками.

Агент разработки проектного решения (agent designer project solution [ADPS]) выполняет операции, связанные с созданием проектного решения на языке VHDL, т.е. формированием структурно-функциональной лингвистической модели (СФЛМ), шаблона СФЛМ и проведением лексического и семантического анализа кода.

Агент синтеза проектных решений (agent synthesis project solution [ASPS]) осуществляет поиск готовых к объединению проектных решений, созданных проектировщиками, а также их синтез в единое проектное решение.

Агент маршрутизации (router agent [ROA]) является связующим между локальными или распределёнными агентами, расположенными на других серверах, которые выполняют роль хранения или разработки проектных решений.

Поисковый агент (search agent [SEA]) формирует запрос на поиск проектного решения и кластеризацию данных для сокращения времени поиска данных.

Агент базы знаний (agent knowledge base [АКВ]) осуществляет операции по работе с базой знаний.

Агент рабочей памяти (agent working memory [АВМ]) управляет состоянием системы и распределением нагрузки как на агентов, так и на всю систему.

Проведение синтаксического и семантического анализов кода VHDL-программы и формирование СФЛМ [5] на основе данного кода позволяет агенту разработки проектного решения формировать библиотеку проектных решений, используя которую поисковый агент осуществляет поиск решения для разрабатываемого компонента с учётом его характерных особенностей. Основные операции, выполняемые агентом синтеза проектных решений, обеспечивают получение проектных решений объединением СФЛМ отдельных компонентов разрабатываемого устройства.



Рис. 1. Структура многоагентной системы распределённого проектирования

Моделирование работы многоагентной системы распределённого проектирования.

Описание и анализ процессов, протекающих в системе, осуществляется средствами математического аппарата цветных ингибиторных сетей Петри второго рода, представленных в виде иерархической композиции объектов.

Анализ сетевой модели до разработки программного обеспечения системы проектирования обеспечивает проверку работоспособности, выявление ошибок и узких мест в системе, в результате которых производительность или пропускная способность системы ограничена одним или несколькими компонентами или ресурсами.

Модель системы распределённого проектирования реализована в среде CPN Tools [6] и показана на рис. 2. В табл. 1 приведено описание позиций сети.

На рис. 2 выделены блоки, моделирующие процесс работы проектировщиков в системе: system entry (SEN) — система входа; system search (SSE) — система поиска; system constructor project solution (SCPS) — система конструктора проектного решения; system personal cabinet (SPC) — система личного кабинета; system managing projects (SMP) — система управления проектами; system managing project tasks (SMPT) — система управления проектными задачами; messenger (MES) — система уведомлений.

Данные, описанные в табл. 1, представляют основные этапы функционирования рассматриваемой системы. Каждая позиция выполняет связующую роль между компонентами. Ввиду того, что сеть Петри представлена в виде иерархической композиции, дальнейшее описание представляет собой детализацию некоторых компонент, изображенных на рис. 2.

Сетевая модель агента синтеза проектных решений (ASPS) представлена на рис. 3. Ос-

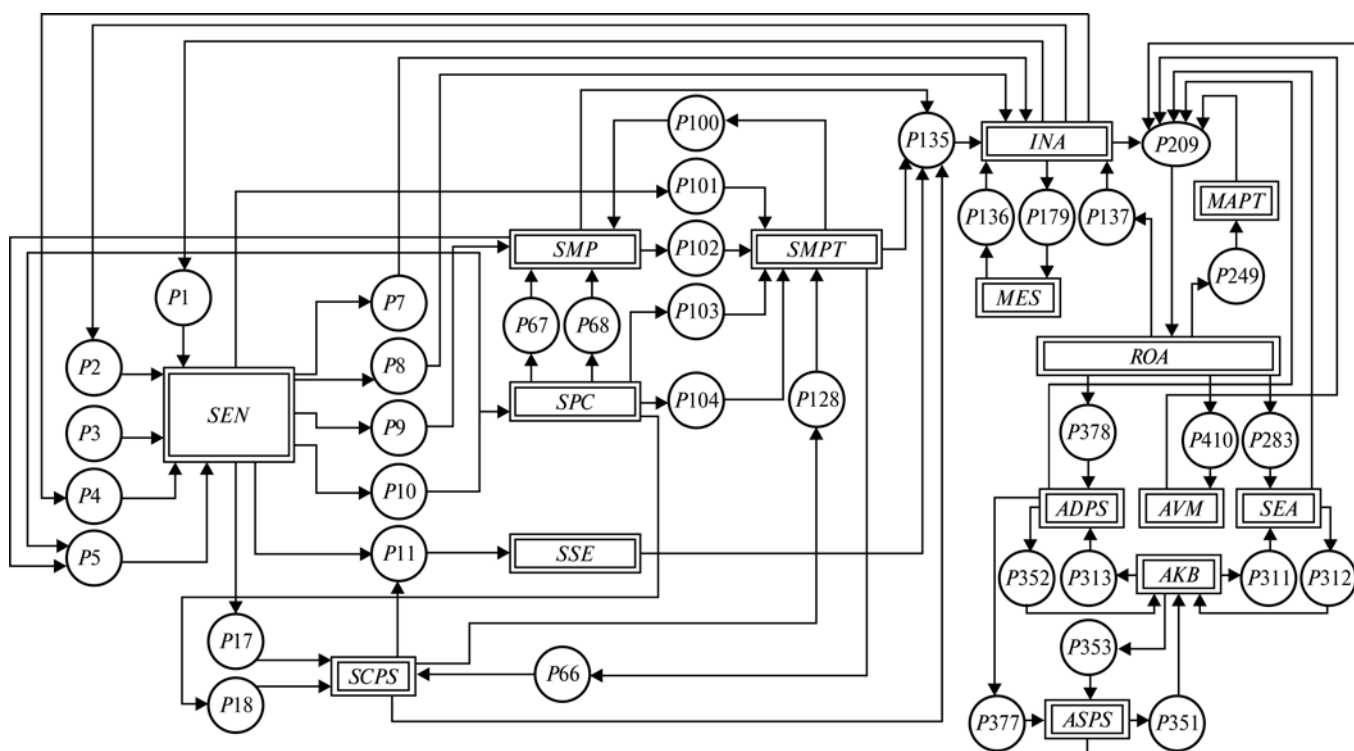


Рис. 2. Сеть Петри распределённой системы проектирования

Таблица 1

Описание позиций сети Петри системы распределённого проектирования

Обозначение элемента	Описание
P1	Выявлены ошибки при авторизации пользователя в системе
P2	Выявлены ошибки при регистрации пользователя в системе
P3	Выполнен переход на стартовую страницу системы
P4	Авторизация в системе пройдена. Осуществлён вход в систему
P5	Выбран элемент основного меню
P7	Передан запрос на регистрацию пользователя в системе
P8	Передан запрос на авторизацию пользователя в системе
P9	Выполнен переход на страницу управления проектами
P10	Выполнен переход в личный кабинет
P11	Выполнен переход на страницу поиска
P17	Выполнен переход к конструктору проектного решения
P101	Выполнен переход к управлению проектными задачами
P135	Передан запрос интерфейсному агенту
P67	Выполнен переход на страницу создания проекта
P68	Выбран проект. Осуществлён переход к странице проекта
P104	Выполнен переход к проектной задаче
P103	Выполнен переход к странице управления результатами поиска ПССЗ
P18	Выполнен переход к странице управления результатами поиска СФМ
P100	Выполнен переход к меню. Выбран элемент меню
P102	Выполнен переход к просмотру списка проектных задач с фильтрацией по проекту и/или проектировщику
P66	Выполнен переход к странице создания/редактирования проектного решения
P128	Выполнен переход на страницу создания проектной задачи
P179	Переданы данные по уведомлению для пользователя
P136	Передан запрос на получение уведомлений для пользователя

Окончание табл. 1

Обозначение элемента	Описание
P137	Передано сообщение от агента ROA. Сообщение получено
P209	Сформировано и передано сообщение агенту ROA
P249	Передано сообщение от агента ROA. Сообщение получено
P283	Передано сообщение от агента ROA. Сообщение получено
P311	Передано сообщение от агента АКВ. Сообщение получено
P312	Сформировано и передано сообщение агенту АКВ
P351	Передано сообщение от агента ASPS. Сообщение получено
P352	Передано сообщение от агента ADPS. Сообщение получено
P378	Сформировано и передано сообщение агенту ADPS
P353	Сформировано и передано сообщение агенту ASPS
P377	Передано сообщение от агента ADPS. Сообщение получено
P378	Передано сообщение от агента ROA. Сообщение получено
P410	Передано сообщение от агента ROA. Сообщение получено

новые позиции и переходы, описывающие операцию синтеза, представлены в табл. 2.

Агент синтеза проектных решений является одним из компонентов иерархической структуры. Основные операции и этапы работы данного агента, такие как получение, обработка, формирование сообщений, а также взаимодействие с аппаратом ПССЗ представлены в виде совокупности позиций и переходов сети Петри (см. рис. 3 и табл. 2).

Сетевая модель агента маршрутизации (ROA) представлена на рис. 4. Основные позиции и переходы, описывающие процесс обработки и пересылки сообщений агентом маршрутизации с целью решения общей задачи, представлены в табл. 3.

Агент маршрутизации так же, как и предыдущий агент, является одним из компонентов иерархической структуры. Основные операции и этапы работы данного агента, такие как получение, обработка и формирование сообщений, представлены в виде совокупности позиций и переходов сети Петри (см. рис. 4 и табл. 3).

Рассмотрим типовые свойства сетей Петри в их интерпретации к рассматриваемой задаче. Результат анализа свойства живости показывает степень работоспособности системы, помогает выявлять невозможные состояния (в частности, неисполняемые ветви функционирования системы), например, ситуации, в которых блокируются действия пользователя на одной странице в web-системе, или работа,

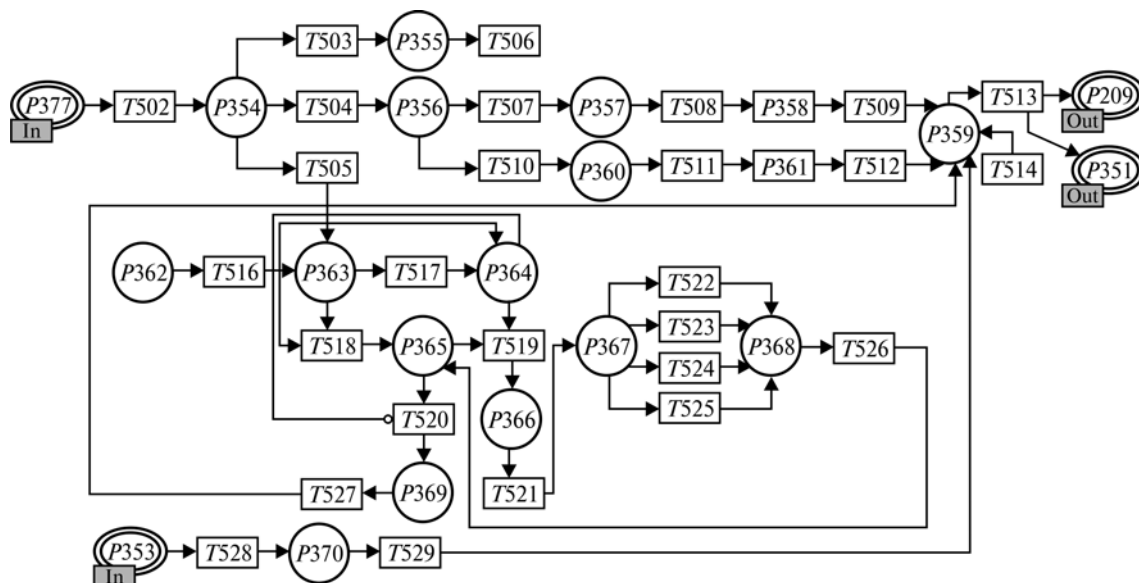


Рис. 3. Сеть Петри, моделирующая работу агента синтеза проектных решений

Таблица 2

**Описание позиций и переходов сети Петри,
моделирующей основные этапы синтеза проектных решений агентом**

Обозначение элемента	Описание
<i>P377</i>	Передано сообщение от агента ADPS. Сообщение получено
<i>P209</i>	Сформировано и передано сообщение агенту ROA
<i>P362</i>	Периодическая проверка графа ПССЗ на наличие завершённых стадий операторов (проектных задач), которые предшествуют оператору синтеза в графе ПССЗ
<i>P363</i>	Подсчёт количества операторов синтеза (проектных задач) в графе ПССЗ (проекте)
<i>P364</i>	Общее количество операторов синтеза
<i>P365</i>	Процесс анализа графа ПССЗ
<i>P366</i>	Данные по оператору синтеза выбраны
<i>P369</i>	Получен результат анализа графа ПССЗ
<i>P367</i>	Получена общая стадия, на основе которой будет производиться синтез проектного решения
<i>P368</i>	Получено новое проектное решение (оператора синтеза)
<i>T502</i>	Анализ сообщения. Получение данных агента-отправителя, ID отправляемого сообщения и данных по запросу
<i>T516</i>	Запуск проверки графа ПССЗ
<i>T517</i>	Получение оператора синтеза
<i>T518</i>	Подсчёт общего количества операторов синтеза закончен. Запуск анализа графа ПССЗ
<i>T519</i>	Завершение процесса анализа графа ПССЗ
<i>T520</i>	Выбор оператора синтеза и список предшествующих операторов
<i>T527</i>	Формирование сообщения (сохранение данных). Выбор агента маршрутизации
<i>T521</i>	Вычисление общей стадии разработки для предшествующих операторов
<i>T522</i>	Синтез VHDL-кода. Объединение веток разработки в git
<i>T523</i>	Синтез СФЛМ
<i>T524</i>	Синтез шаблонов СФЛМ
<i>T525</i>	Синтез графических блоков
<i>T526</i>	Переход к следующему оператору синтеза

Таблица 3

**Описание позиций и переходов сети Петри,
моделирующей процесс обработки и пересылки сообщений агентом маршрутизации**

Обозначение элемента	Описание
<i>P209</i>	Агент получил переданное ему сообщение
<i>P137</i>	Сформированное сообщение передано агенту INA
<i>P410</i>	Сформированное сообщение передано агенту AWM
<i>P378</i>	Сформированное сообщение передано агенту ADPS
<i>P238</i>	Сформированное сообщение передано агенту SEA
<i>P249</i>	Сформированное сообщение передано агенту MAPT
<i>P210</i>	Подсчёт количества правил работы агента
<i>P211</i>	Общее количество правил работы агента
<i>P212</i>	Запущен процесс поиска правила работы
<i>P213</i>	Количество правил, не соответствующих условию поискового запроса
<i>P214</i>	Количество правил, соответствующих условию запроса
<i>P215</i>	Получен результат поиска правила работы
<i>P216</i>	Получены данные для агента(ов) получателей сообщения
<i>P218</i>	Получен тип события и ID сообщения
<i>P219</i>	Сформировано сообщение, отправляемое агенту
<i>P220</i>	Найдено сообщение, которое было отправлено ранее. Сообщение помещено в историю
<i>T327</i>	Анализ сообщения. Получение данных агента-отправителя, ID отправляемого сообщения и данных о проектировщике и запросе. Формирование запроса для поиска правила работы агента

Окончание табл. 3

Обозначение элемента	Описание
T328	Получение правила работы агента
T329	Подсчёт общего количества правил работы агента закончен. Запуск поиска правила работы агента
T330	Правило не соответствует условиям поиска. Переход к следующему правилу
T332	Правило соответствует условиям поиска. Переход к следующему правилу
T333	Завершение процесса поиска правила работы агента
T334	Анализ найденного правила работы агента
T335	Формирование сообщения для отправки агенту
T336	Агенту было отправлено сообщение-запрос. Сохранение сообщения в базе агента
T338	Установка связи и передача сообщения агенту INA
T339	Установка связи и передача сообщения агенту SEA
T340	Установка связи и передача сообщения агенту ADPS
T341	Установка связи и передача сообщения агенту MAPT
T342	Установка связи и передача сообщения агенту AWM
T343	Агенту было отправлено сообщение-результат. Поиск сохраненного сообщения-запроса, по которому было получено сообщение-результат

в которых не может завершиться. В цветной сети Петри анализ этого свойства проводится относительно каждого цвета (т.е. относительно каждого проектировщика, находящегося в системе). Таким образом осуществляется проверка работы в системе нескольких проектировщиков, выполняющих различные действия.

При моделировании работы системы задача достижимости интерпретируется как возможность перехода к некоторой типовой ситуации, под которой понимается совокупность последовательных маркировок, необходимых для перехода в интересующее состояние системы. Для этого строится дерево типовых ситуаций, переходы по которому переводят систему в выбранные состояния, минуя определенное количество промежуточных этапов. Используя свойство достижимости сети Петри, строится карта внутрисистемных переходов. На ней отображаются все переходы, но активны будут только те, в которые можно перейти из текущего состояния.

Определение свойства безопасности позволяет анализировать процесс создания проектного решения "наблюдением" за ходом выполнения проектных задач,

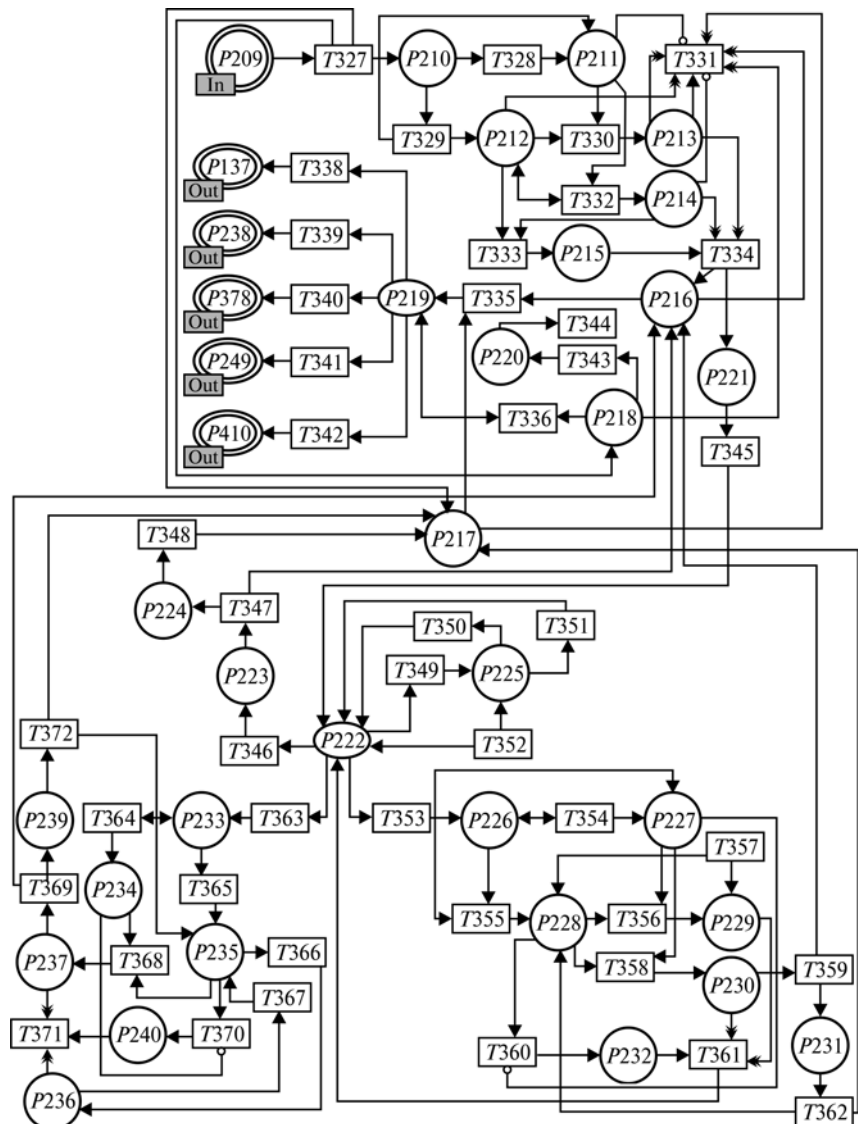


Рис. 4. Сеть Петри, моделирующая работу агента маршрутизации

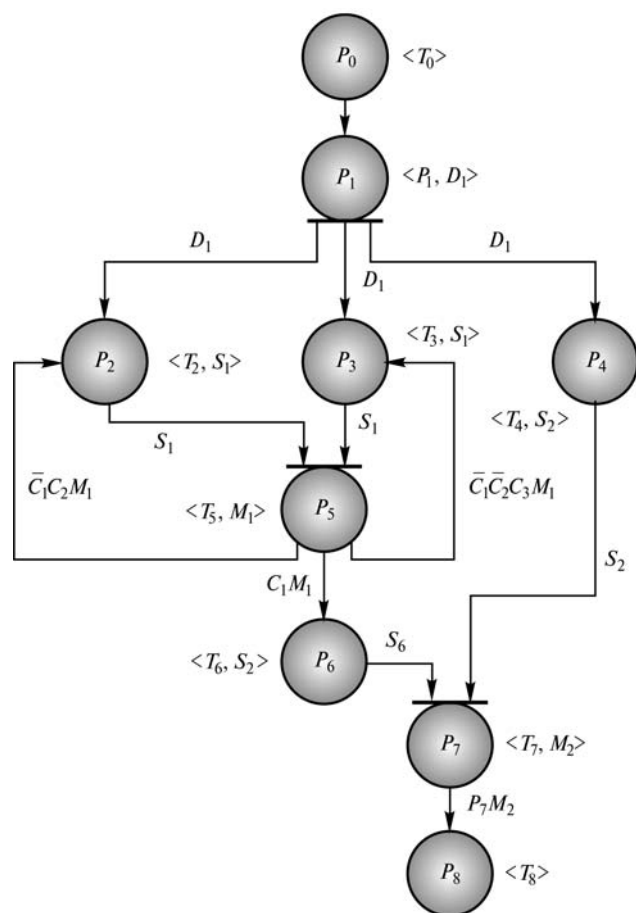


Рис. 5. Пример графа ПССЗ

выполняемых проектировщиками. Так как в текущий момент у проектировщика может быть только одна активная задача, которую он делает и по которой ведётся учёт времени, анализ свойства безопасности позиций токенов определённого цвета позволит выявить временные нарушения решения задач.

Обязательное наличие позиции-очереди у агента создаёт необходимость проверять данную позицию на свойство ограниченности. В случае превышения предельно допустимого количества задач, установленных в системе, запускается механизм создания копии агента и переназначения на него части задач. Освобождение ресурсов удалением копии агента из системы происходит при отсутствии задач в позиции-очереди агента.

Для реализации процесса декомпозиции проектных задач и синтеза проектных решений используется аппарат ПССЗ [7]. Пример графа ПССЗ, содержащего все применяемые в работе операторы, представлен на рис. 5. Каждой вершине графа ПССЗ (P) соответствует составной оператор. Информационная составляющая оператора предназначена для хране-

ния совокупности проектных задач (T). Дуги в ПССЗ представляют условия (C) перехода к выполнению следующего оператора. Оператор декомпозиции (D) предназначен для организации процесса распараллеливания задач.

Оператор синтеза (S) отвечает за объединение проектных решений, являющихся атрибутами составных операторов, в единое проектное решение. Одним из элементов управляющей составляющей ПССЗ является маска (M), которая представляет собой совокупность параметров проектных задач. Использование операции маскирования позволяет кластеризовать множество задач и осуществлять поиск по параметрам и контексту.

Заключение. Предложенная многоагентная система распределённого проектирования ориентирована на создание сложных VHDL-программ. Коллективное проектирование, а также создание и наполнение библиотек проектных решений в виде VHDL-объектов обеспечивает повышение эффективности и качества создания программно-информационных активов, приводит к сокращению сроков разработки.

Библиографические ссылки

1. Евтушенко Н.Д., Немудров В.Г., Сырцов И.А. Методология проектирования систем на кристалле. Основные принципы, методы, программные средства // Электроника: наука, технология, бизнес. 2003. № 6. С. 7—11.
2. Maciel R., Albertini B., Rigo S., Araujo G., Azevedo R. A Methodology and Toolset to Enable System C and VHDL Co-simulation // Computer Society Annual Symposium VLSI (ISVLSI'07). 2007. P. 351—356.
3. Афанасьев А.Н., Хородов В.С. Распределённое проектирование структурно-функциональных моделей, представленных на языке VHDL // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2014. № 2 (66). С. 41—45.
4. Мутовкина Н.Ю., Кузнецов В.Н., Ключин А.Ю., Палюх Б.В. Нечёткие методы согласованного управления в многоагентных системах // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2013. № 4. С. 740—750.
5. Афанасьев А.Н., Игонин А.Г. Применение нейросемантического подхода для анализа и синтеза функциональных моделей в системах проектирования // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2007. № 1. С. 66—69.
6. Владимиров А.В. Моделирование взаимодействия агентов в многоагентной системе с помощью цветных сетей Петри и нечеткой логики // Программные продукты и системы. 2014. № 1. С. 44—50.
7. Афанасьев А.Н. Методология графоаналитического подхода к анализу и контролю потоков работ в автоматизированном проектировании сложных компьютеризованных систем // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2011. № 3 (55). С. 48—52.



УДК 614.8

А.Н. Варнавский, канд. техн. наук, доц., В.В. Миронов, д-р физ.-мат. наук, проф.

(Рязанский государственный радиотехнический университет)

varnavsky_alex@rambler.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ "ЦЕНА/КАЧЕСТВО" ОТ ПАРАМЕТРОВ ТРУДОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрено моделирование соотношения "цена/качество" человеко-машинной системы от параметров организации трудовой деятельности оператора на основе имитационной модели в виде последовательностей интервалов работы и отдыха. Проведено моделирование влияния количества регламентированных перерывов как на показатели качества, так и на затраты в человеко-машинной системе. Получены семейства кривых зависимостей показателей качества и затрат от числа регламентированных перерывов при различных значениях начальной работоспособности, интенсивностей утомления и восстановления сил оператора.

Ключевые слова: моделирование; человеко-машинные системы; соотношение "цена/качество"; деятельность оператора; регламентные работы.

Correlation modeling of the dependence of man-machine system "price/quality" ratio from the operator work organization parameters on the basis of a simulation model of the employee in the form of work and rest intervals sequences is considered. An impact modelling of the regulated interruptions quantity on the quality indicators and the cost in man-machine system is carried out. Dependence curves families of the quality and cost indicators from the regulated interruptions quantity at different value of the initial efficiency, the fatigue intensities and operator force recuperation are derived.

Key words: modeling; man-machine systems; the "price/quality" ratio; operator activities; schedule work.

Введение. Интенсификация современного технического производства, повсеместное использование компьютерных технологий выдвигает в качестве приоритетной проблему математического моделирования функционирования различных человеко-машинных систем (ЧМС).

Для оценки эффективности работы человеко-машинной системы используется показатель (соотношение) "цена/качество". Чем меньше величина показателя, тем эффективнее используется данная ЧМС. Таким образом, задача исследования влияния различных факторов и показателей системы на величину соотношения "цена/качество" для ЧМС является весьма актуальной.

Заметим, что высокоавтоматизированные технические системы при решении задач повышенной сложности и ответственности предусматривают контроль со стороны человека [1].

Качество ЧМС — это (по определению) совокупность свойств, направленных на удовлетворение тех или иных заявленных потребностей человека или (и) общества. Такие свойства закладываются уже при проектировании

системы "человек-машина", воплощаются при изготовлении и реализуются в процессе эксплуатации ЧМС. Количественную характеристику того или иного свойства системы, рассматриваемого применительно к определённым условиям её создания или эксплуатации, называют показателем качества ЧМС [2].

Под "ценой" будем понимать суммарную стоимость затрат как на этапе создания системы, так и на этапе эксплуатации.

Основным или решающим элементом любой ЧМС является человек (работник или оператор), так как параметры его деятельности существенным образом влияют на эффективность функционирования всей системы.

В работах [2, 3], посвящённых качеству ЧМС, величины качества и затрат рассматриваются постоянными и определяются только параметрами самой системы. В таком случае и величина "цена/качество" является постоянной. Так как на показатели функционального состояния оператора влияет организация трудовой деятельности [4], то целесообразно рассматривать динамику величины качества ЧМС в течение рабочего дня в зависимости

от параметров трудовой деятельности. В ряде работ, посвящённых моделированию и управлению систем [5], влияние параметров организации трудовой деятельности на систему не рассматривается.

Таким образом, выявив зависимость эффективности ЧМС от параметров трудовой деятельности оператора, можно по критерию минимизации величины "цена/качество" организовать работу оператора в системе и повысить тем самым эффективность её использования.

Рассмотрим имитационное моделирование зависимости величины соотношения "цена/качество" ЧМС от параметров трудовой деятельности оператора.

Для достижения цели создадим соответствующую модель ЧМС и реализующий эту модель алгоритм, которые будут воспроизводить процесс деятельности оператора во времени.

Для подобных исследований используем традиционные показатели качества ЧМС: быстродействие, надёжность, точность, своевременность и безопасность труда. В качестве параметра трудовой деятельности рассмотрим количество регламентированных перерывов для отдыха между отдельными производственными операциями.

Имитационная модель деятельности оператора ЧМС. Работу оператора представим в виде периодической во времени последовательности этапов его трудовой деятельности, в течение которых по определению снижается работоспособность, нарастает утомление. Эти этапы разделены временными перерывами для отдыха оператора (микропаузы, регламентированные перерывы или перерывы для неотложных личных надобностей, обеденный перерыв), в течение которых снижается уровень утомления и восстанавливается работоспособность [6].

Используем следующие параметры модели: T , T_w , Tr , Td , n — длительность рабочего дня, интервала деятельности, интервала отдыха; обеденного перерыва и число интервалов деятельности соответственно.

Если все перерывы распределены во времени равномерно (что и полагаем), то нетрудно видеть, что количество интервалов деятельности можно определить по формуле:

$$n = \frac{T - Td + 2Tr}{T_w + Tr}.$$

Обозначим текущий номер интервала деятельности оператора длительности T_w буквой w , $w = 1, \dots, n$ [7].

Для аналитического описания изменения работоспособности оператора с течением времени в процессе трудовой деятельности используем стандартное для подобных исследований [4, 6] выражение

$$B(t) = B(t0_w) e^{-\mu_u(t-t0_w)}, \quad (1)$$

где μ_u — интенсивность накопления утомления; $t0_w$ — момент времени начала w -го интервала деятельности.

Для аналитического описания изменения работоспособности с течением времени в процессе отдыха на интервале, следующим за w -м интервалом деятельности, имеем зависимость в виде

$$B(t) = (B_0 - B(t0_w + Tr)) \times (1 - e^{-\mu_v(t-(t0_w+Tr))}) + B(t0_w + Tr), \quad (2)$$

где B_0 — начальное значение уровня работоспособности в момент начала работы $t = 0$ (максимальное значение работоспособности); μ_v — интенсивность восстановления работоспособности.

На рис. 1 представлены результаты проведённого математического моделирования зависимости параметра $B(t)$ от времени.

Моделирование зависимостей показателей качества ЧМС от числа регламентированных перерывов для отдыха между отдельными производственными операциями. Определим (по аналогии с работой [2]) быстродействие системы как время прохождения информации по замкнутому контуру "человек—машина":

$$T_{\Pi} = \sum_{i=1}^k t_i, \quad (3)$$

где T_{Π} — время задержки обработки информации в i -м звене системы "человек—машина"; k — количество последовательно соединённых звеньев в системе "человек—машина", в качестве которых могут выступать как технические устройства, так и операторы.

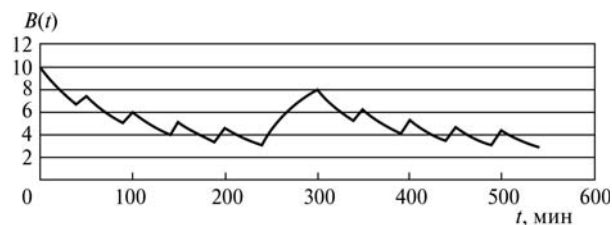


Рис. 1. Зависимость работоспособности $B(t)$ от времени в течение рабочего дня

Для определения влияния организации трудовой деятельности на значение показателя быстродействия рассмотрим систему "человек—машина", в которой из k звеньев одним звеном является оператор. Тогда выражение (3) можно представить в виде

$$T_{ц} = t_1 + \sum_{i=2}^k t_i,$$

где t_1 — время обработки информации оператором.

Время обработки информации оператором зависит от его функционального состояния и, соответственно, меняется с течением времени. Используется модель, в которой время обработки информации оператором обратно пропорционально его работоспособности:

$$t_1(t) = k_{ц}/B(t),$$

где $k_{ц}$ — некий коэффициент пропорциональности (действительное число), вводимый эмпирически.

Поскольку динамика, т.е. количественный характер изменения функции $B(t)$ зависит от организации трудовой деятельности, в частности от количества и длительностей интервалов отдыха, то среднее значение показателя быстродействия также зависит от этих показателей.

Учитывая введённые модельные зависимости и согласуясь с логикой исследования, обоснованной, в частности, в работе [7], определим среднее значение времени обработки информации оператором за один рабочий день, учитывая обработку информации только в интервалы работы человека—оператора:

$$\begin{aligned} \bar{t}_1(n) &= k_{ц} \frac{T - Td -}{\sum_{j=1}^{n/2} \int_{(Tw+Tr)(j-1)}^{(Tw+Tr)j-Tr} B(t) dt +} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{-(n-2)Tr}{\sum_{j=n/2+1}^n \int_{(T+Td)/2+(Tw+Tr)(j-n/2-1)}^{(T+Td)/2+(Tw+Tr)(j-n/2)-Tr} B(t) dt}. \end{aligned}$$

Введём функцию суммарной работоспособности оператора за рабочий день. Аргументом этой функции будет количество регламентированных перерывов n :

$$BS(n) = \sum_{j=1}^{n/2} \int_{(Tw+Tr)(j-1)}^{(Tw+Tr)j-Tr} B(t) dt + \sum_{j=n/2+1}^n \int_{(T+Td)/2+(Tw+Tr)(j-n/2-1)}^{(T+Td)/2+(Tw+Tr)(j-n/2)-Tr} B(t) dt.$$

Тогда среднее время обработки информации в ЧМС обоснованно запишется в виде

$$\bar{T}_{ц}(n) = k_{ц} \frac{T - Td - (n-2)Tr}{BS(n)} + \sum_{i=2}^k t_i.$$

Для нахождения функциональной зависимости, которую обозначим как $\bar{T}_{ц}(n)$, среднего времени обработки информации за рабочий день от числа n регламентированных перерывов, проведём эксперименты с полученной имитационной моделью деятельности оператора в программе GPSS World [8].

Изменяя значения параметров B_0, μ_u, μ_v , повторим серию экспериментов по определению зависимостей $\bar{T}_{ц}(n)$ при n от 2 до 40. Необходимость проведения именно серии экспериментов обусловлена тем, что значения B_0, μ_u, μ_v зависят от биологических свойств оператора и от его текущего функционального состояния.

В результате экспериментов получено, что среднее значение показателя быстродействия за рабочий день ЧМС зависит от индивидуальных свойств операторов, т.е. от значений B_0, μ_u, μ_v , и убывает с увеличением количества интервалов отдыха.

Точность работы человека-оператора определим как степень отклонения некоторого параметра, измеряемого, устанавливаемого или регулируемого оператором, от истинного (заданного или номинального) значения. Для количественной оценки точности используем (по аналогии с работой [2]) величину погрешности, с которой оператор измеряет, устанавливает или регулирует данный параметр:

$$Y = |I_{н} - I_{оп}|,$$

где $I_{н}$ — истинное значение параметра; $I_{оп}$ — фактически измеряемое (регулируемое).

Полагаем, что точность работы оператора зависит от его функционального состояния и меняется с течением времени. Для исследования используем модель, в которой точность установки измеряемого параметра оператором пропорциональна его работоспособности:

$$I_{оп} = I_{н} \pm k_{оп}(B_0 - B(t)),$$

где $k_{оп}$ — коэффициент пропорциональности, определяемый эмпирически.

Тогда точность работы оператора в моменты деятельности можно записать в виде

$$Y(t) = k_{оп}(B_0 - B(t)).$$

Среднее значение точности работы оператора за рабочий день

$$\bar{Y}(n) = k_{\text{оп}} \left(B_0 - \frac{BS(n)}{T - Td - (n-2)Tr} \right).$$

По результатам исследования можно сделать заключение, что среднее значение погрешности работы оператора за рабочий день зависит от индивидуальных свойств операторов, т.е. от значений параметров B_0 , μ_u , μ_v и убывает с увеличением числа интервалов отдыха n .

Надёжность работы ЧМС определим как безошибочность (или правильность по сравнению с образцом) решения стоящих перед системой "человек—машина" задач. Оценим её классической статистической вероятностью:

$$P_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{пр}}}{N} = 1 - \frac{m_{\text{ош}}}{N}, \quad (4)$$

где $m_{\text{пр}}$, $m_{\text{ош}}$ и N — статистические данные, являющиеся соответственно количеством правильно решённых, ошибочно решённых и общим количеством решаемых задач.

Ниже рассматривается обоснованная практикой использования модель, в которой количество правильно решённых задач оператором пропорционально его работоспособности (например, [4, 6]):

$$m_{\text{пр}}(t) = k_{\text{пр}} B(t),$$

где $k_{\text{пр}}$ — коэффициент пропорциональности, определяемый эмпирически.

Так как динамика функции $B(t)$ зависит от организации трудовой деятельности, в частности, от числа и длительностей интервалов отдыха, то среднее значение показателя надёжности работы оператора также зависит от статистических показателей.

Определим среднее значение показателя надёжности за рабочий день. Будем считать, что в каждую единицу рабочего времени возникают задачи, подлежащие решению. Тогда среднее значение показателя надёжности (по определению) запишется в виде

$$\overline{P_{\text{пр}}}(n) = k_{\text{пр}} \frac{BS(n)}{T}. \quad (5)$$

Как следствие, среднее значение показателя надёжности за рабочий день ЧМС зависит от

индивидуальных свойств операторов, т.е. от значений B_0 , μ_u , μ_v .

По результатам моделирования надёжности работы ЧМС с использованием выражения (5) получено, что среднее значение показателя надёжности сначала возрастает с увеличением количества интервалов отдыха n , а затем убывает при дальнейшем увеличении n .

Своевременность решения задачи системой "человек—машина" оценивается функцией распределения (в классическом её определении [9]), а именно вероятностью того "случайного" события, что стоящая перед ЧМС задача будет решена за время, не превышающее допустимое:

$$P_{\text{св}} = P\{T_{\text{ц}} < T_{\text{доп}}\} = \int_0^{T_{\text{доп}}} \varphi(T) dT,$$

где $\varphi(T)$ — функция плотности времени решения задачи системой "человек—машина".

Теоретическую вероятность можно оценить по статистическим данным [9] статистической вероятностью:

$$P_{\text{св}} = \frac{m_{\text{св}}}{N} = 1 - \frac{m_{\text{нс}}}{N}, \quad (5')$$

где $m_{\text{св}}$, $m_{\text{нс}}$ — количество своевременно и несвоевременно решённых задач из их общего числа N .

Полагаем при этом, что условия эксперимента таковы, что классические предельные теоремы [9] позволяют принять эмпирическую оценку (5') как вполне адекватную.

Полагаем, что количество своевременно решённых задач человеком зависит от его функционального состояния и пропорционально его работоспособности:

$$m_{\text{св}}(t) = k_{\text{св}} B(t),$$

где $k_{\text{св}}$ — коэффициент пропорциональности, подобранный эмпирически.

Определим среднее значение вероятности своевременного решения задач за рабочий день, полагая, что каждую единицу времени возникают задачи, подлежащие решению. По определению имеем

$$\overline{P_{\text{св}}}(n) = k_{\text{св}} \frac{BS(n)}{T}. \quad (6)$$

Анализ определения (6) показывает, что среднее значение вероятности своевременного решения задач за рабочий день ЧМС зависит от индивидуальных свойств операторов, т.е. от значений B_0 , μ_u , μ_v и сначала возрастает с увеличением количества интервалов отдыха n , а затем убывает при дальнейшем увеличении количества n .

Проведённый анализ показывает, что общий показатель надёжности ЧМС позволяет учесть и значения величин $m_{\text{ош}}$, $m_{\text{нс}}$, и, соответственно, вероятности $P_{\text{пр}}$, $P_{\text{св}}$. На эти значения влияет как некачественная работа машины, так и некачественная деятельность оператора. Известно, что ЧМС функционируют в рамках определённых временных ограничений, и как следствие, несвоевременное решение задачи приводит к недостижению поставленной перед ЧМС цели.

Полагаем, что в условиях проводимых экспериментов соответствующие "случайные" события независимы. Это позволяет использовать классическую теорему о произведении событий [9] и определить общий показатель надёжности работы ЧМС как вероятность

$$P_{\text{ЧМС}} = P_{\text{пр}} P_{\text{св}}.$$

Используя формулы (5) и (6), можно записать выражение для определения среднего значения общего показателя надёжности в общем структурном методе:

$$\overline{P_{\text{ЧМС}}}(n) = k_{\text{пр}} k_{\text{св}} \frac{(BS(n))^2}{T^2}. \quad (7)$$

Свойства зависимости (7) повторяют свойства зависимостей (5) и (6): среднее значение общего показателя надёжности за рабочий день ЧМС зависит от индивидуальных свойств операторов, т.е. от значений B_0 , μ_u , μ_v , и сначала возрастает с увеличением количества интервалов отдыха, а затем убывает при дальнейшем увеличении n . При этом соответствующие скорости изменения увеличиваются на порядок.

Безопасность труда (или безопасность работы) оператора в системе "человек—машина" будем оценивать следующим образом. Полагаем, что ЧМС включает в себя как безвредные, так и вредные производственные ситуации, а также как неправильные, так и правильные действия оператора. Полагаем, что вредные для оператора производственные ситуации и неправильные действия оператора незави-

симы друг от друга, образуют полную группу событий и подразделяются по типам. Для упрощения полагаем, что количество типов в каждой из определённых ситуаций (событий) одинаково, они пронумерованы индексом $i = 1, \dots, q$, где q — количество пар возможных травмоопасных (вредных производственных ситуаций и неправильных действий) ситуаций.

Известны вероятности $P_{\text{воз}i}$ — вероятность возникновения опасной или вредной для оператора производственной ситуации i -го типа; $P_{\text{ош}i}$ — вероятность неправильных действий оператора в i -й ситуации.

Тогда вероятность безопасной работы ЧМС можно записать в виде

$$P_{\text{бт}} = 1 - \sum_{i=1}^q P_{\text{воз}i} P_{\text{ош}i}.$$

Опасные и вредные ситуации могут возникать как по вине технических объектов (неисправности машин и защитных сооружений, аварийные ситуации и т.п.), так и по вине людей (нарушения с их стороны правил и мер безопасности, негативные психофизиологические факторы и т.п.).

Вероятность неправильных действий оператора в опасной или вредной производственной ситуации определим по той же методике, что и ранее. Логично использовать математическую модель, в которой вероятность неправильных действий оператора в i -й ситуации обратно пропорциональна его работоспособности:

$$P_{\text{ош}i}(t) = k_{\text{ош}i} B(t),$$

где $k_{\text{ош}i}$ — коэффициент пропорциональности в i -й ситуации.

Как и ранее при оценке деятельности ЧМС по другим критериям, определим среднее значение вероятности безопасной работы за рабочий день:

$$\overline{P_{\text{бт}}}(n) = 1 - \sum_{i=1}^q P_{\text{воз}i} k_{\text{ош}i} \frac{T - Td - (n-2)Tr}{BS(T)}.$$

Таким образом, среднее значение показателя безопасности труда за рабочий день ЧМС зависит от индивидуальности операторов и возрастает с увеличением количества интервалов отдыха.

Моделирование зависимости интегральной оценки качества ЧМС от количества регламентированных перерывов для отдыха между

отдельными производственными операциями.

Обобщённую (интегральную) оценку качества системы "человек—машина" определим как совокупность всех её рассмотренных выше основных свойств. При этом эффективность системы "человек—машина" рассчитывается по частным показателям качества ЧМС, которые к тому же входят в общую оценку с некоторым "весом", характеризующим степень их важности в данной системе.

Итак, интегральная оценка качества системы "человек—машина" (по определению) имеет вид:

$$Q_{\text{ЧМС}} = \sum_{i=1}^n a_i Q_i, \quad (8)$$

где a_i — весовые коэффициенты, определяемые эмпирически (иногда и эвристически), сумма которых равна единице; n — количество учитываемых частных показателей; Q_i — нормированное значение i -го частного показателя.

Если частный показатель с точки зрения его влияния на эффективность является повышающим (надёжность, безопасность, своевременность и т.п.), то нормирование осуществляют согласно выражению:

$$Q_i = E_i / E_{\text{max } i}.$$

Если же частный показатель — понижающий (время решения задачи, погрешность и т.п.), то нормирование вычисляется по формуле:

$$Q_i = E_{\text{min } i} / E_i,$$

где E_i — абсолютное значение i -го частного показателя; $E_{\text{max } i}$ и $E_{\text{min } i}$ — максимальное и минимальное значения i -го частного показателя, которое имеет существующая или проектируемая аналогичная система "человек—машина".

При нормировании входящих в правую часть формулы (8) величин, совокупная величина $Q_{\text{ЧМС}}$ принимает значения от нуля до единицы. Можно считать, что величина $Q_{\text{ЧМС}}$ фактически есть коэффициент полезного действия ЧМС [2].

Рассмотрим влияние количества периодов регламентированного отдыха за рабочий день на величину интегральной оценки качества системы "человек—машина". Выделим частные показатели качества ЧМС: быстродействие, точность, надёжность, своевремен-

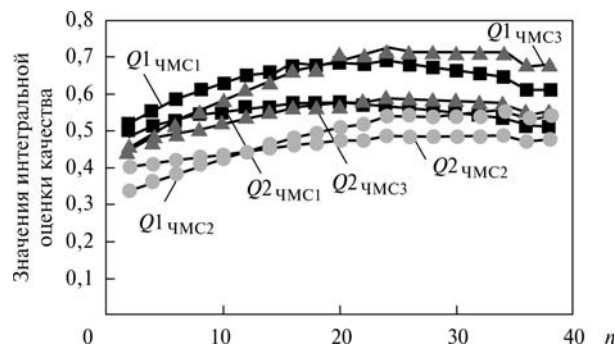


Рис. 2. Пример зависимости интегральной оценки качества ЧМС от количества регламентированных перерывов

ность и безопасность труда. Тогда выражение (8) запишется в виде

$$Q_{\text{ЧМС}}(n) = a_1 \frac{T_{\text{ц min}}}{T_{\text{ц}}(n)} + a_2 \frac{\bar{Y}_{\text{min}}}{\bar{Y}(n)} + a_3 \frac{\bar{P}_{\text{пр}}(n)}{P_{\text{пр max}}} + a_4 \frac{\bar{P}_{\text{св}}(n)}{P_{\text{св max}}} + a_5 \frac{\bar{P}_{\text{ЧМС}}(n)}{P_{\text{ЧМС max}}} + a_6 \frac{\bar{P}_{\text{бр}}(n)}{P_{\text{бр max}}}. \quad (9)$$

На рис. 2 представлены результаты проведённого математического моделирования, где графически показано поведение семейства кривых зависимости $Q_{\text{ЧМС}}(n)$ для разных значений коэффициентов a_i . Анализ закономерностей показывает, что интегральная оценка качества ЧМС зависит как от индивидуальных свойств операторов, так и от количества интервалов отдыха n .

Моделирование зависимости экономических затрат в ЧМС от количества регламентированных перерывов, предназначенных для отдыха оператора между отдельными производственными операциями. Экономический показатель системы "человек—машина" оценим по формуле полных произведённых затрат [9]:

$$W_{\text{ЧМС}} = C_э + E_n(C_{\text{оп}} + C_{\text{и}}),$$

где $C_{\text{и}}$ — затраты на создание (изготовление) системы; $C_{\text{оп}}$ — затраты на подготовку операторов; $C_э$ — эксплуатационные расходы; E_n — нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных затрат.

При рассмотрении влияния количества регламентированных перерывов на $W_{\text{ЧМС}}$ будем считать затраты $C_{\text{и}}$ и $C_{\text{оп}}$ и часть затрат $C_э$ постоянными, а часть затрат $C_э$ отнесём

к недополучению прибыли из-за отличия производительности за рабочий день от максимально возможного значения.

Будем считать (обосновано и экономической теорией, и опытом производства), что производительность труда в текущий момент времени прямо пропорциональна работоспособности оператора, а прибыль прямо пропорциональна производительности его труда. Соответственно, производительность труда за рабочий день определяется по формуле

$$Proizv(n) = k_{\text{произв}}BS(n),$$

а прибыль

$$C_{\text{приб}}(n) = k_{\text{приб}}Proizv(n),$$

где $k_{\text{произв}}$, $k_{\text{приб}}$ — коэффициенты пропорциональности, подобранные эмпирически.

Максимальная прибыль получается при максимальном значении работоспособности оператора ЧМС в течение всего рабочего дня. Следовательно, имеют место соотношения:

$$Proizv_{\text{max}} = B_0T,$$

$$C_{\text{приб_max}} = k_{\text{приб}}Proizv_{\text{max}}.$$

Таким образом, полные затраты на функционирование ЧМС запишутся в виде

$$W_{\text{ЧМС}}(n) = k_{\text{приб}}(Proizv_{\text{max}} - Proizv(n)) + C_{\text{ЧМС}}, \quad (10)$$

где $C_{\text{ЧМС}}$ — затраты, не зависящие от организации трудовой деятельности и отдыха оператора.

На рис. 3 представлены результаты проведённого математического моделирования, где графически показано семейство кривых зависимости $W_{\text{ЧМС}}(n)$ для трёх операторов. Анализ

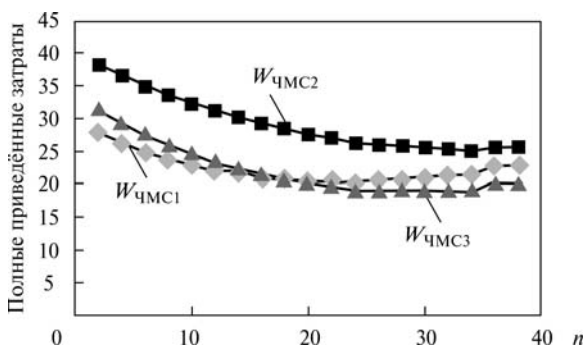


Рис. 3. Пример семейства кривых зависимостей $W_{\text{ЧМС}}(n)$

показывает, что величина полных производственных затрат системы "человек—машина" за рабочий день существенно зависит от индивидуальных свойств операторов, и сначала убывает с увеличением количества интервалов отдыха, а затем возрастает при дальнейшем их увеличении.

Моделирование зависимости величины соотношения "цена/качество" ЧМС от количества регламентированных перерывов для отдыха оператора между отдельными производственными операциями. Соотношение "цена/качество" $WQ_{\text{ЧМС}}$ определим как отношение выражений (10) и (9). Очевидно, что данное соотношение будет зависеть от количества регламентированных перерывов:

$$WQ_{\text{ЧМС}}(n) = \frac{W_{\text{ЧМС}}(n)}{Q_{\text{ЧМС}}(n)}.$$

На рис. 4 представлены результаты проведённого математического моделирования, где графически представлено семейство кривых зависимости $WQ_{\text{ЧМС}}(n)$ для разных значений коэффициентов a_i . Из проведённого анализа видно, что интегральная оценка качества ЧМС зависит и от индивидуальных свойств операторов, и от значения количества интервалов отдыха.

Проанализировав результаты проведённого моделирования, можно сделать основные выводы.

Во-первых, соотношение "цена/качество" ЧМС является функцией от количества регламентированных перерывов n , причём эта зависимость (в зависимости от значений коэффициентов a_i) имеет максимум $WQ_{\text{ЧМС}}(n_{\text{опт}})$ при значении аргумента $n_{\text{опт}}$.

Во-вторых, само значение $n_{\text{опт}} = f(B_0, \mu_u, \mu_v)$ в каждой из проанализированных зависимостей $WQ_{\text{ЧМС}}(n, B_0, \mu_u, \mu_v)$ является неконстантной функцией от параметров B_0, μ_u, μ_v .

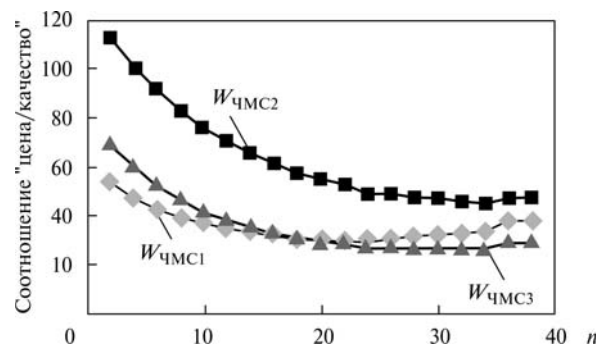


Рис. 4. Пример зависимости соотношения "цена/качество" ЧМС от числа регламентированных перерывов

В-третьих, для достижения максимальной эффективности деятельности ЧМС и соотношения "цена/качество" необходимо задавать оптимальные значения $n_{\text{опт}}$ регламентированных перерывов для каждого оператора, исходя из его биологических свойств и определённых значений B_0 , μ_u , μ_v .

Заключение. Таким образом, решена актуальная задача моделирования зависимости величины соотношения "цена/качество" ЧМС регламентированных перерывов, предназначенных для отдыха оператора между отдельными производственными операциями. Эта зависимость объективно является показателем эффективности деятельности ЧМС, так как моделирование доказало качественное влияние количества регламентированных перерывов как на показатели качества, так и на затраты в системе и выявило количественные аспекты этого влияния.

Кроме прочего, результаты проведённого моделирования показали, что методика регламентации времени отдыха и перерывов (в которой их количественные значения задаются постоянными и зависят только от типа производственных работ) имеет существенный недостаток, который обуславливается тем, что отсутствует учёт текущих значений B_0 , μ_u , μ_v , что может снизить значение показателя "цена/качество" и недостижён запланированного.

Важно отметить, что значения B_0 , μ_u , μ_v могут быть определены перед началом работы ЧМС проведением тестирования, по результатам которого возможна оценка интенсивностей утомления и восстановления, максимальной работоспособности оператора [10].

Рекомендуется также оценить значение параметра $n_{\text{опт}}$ для каждого оператора в зависимости от его индивидуальных особенностей,

а также от назначения системы и её наиболее важных свойств.

Библиографические ссылки

1. **Мионов В.В.** Сравнение систем регистрации космического мусора // Космические исследования. 1996. Т. 34. № 4. С. 414—419.
2. **Медяник В.А.** Необходимость учёта проблем безопасности при исследовании механизма адаптации человека-оператора в системе "человек—машина—среда" // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля. 2010. С. 216—227.
3. **Пряжников Н.С., Пряжникова Е.Ю.** Психология труда и человеческого достоинства: учеб. пособие для вузов. М.: Изд. центр "Академия". 2004. 156 с.
4. **Дружинин Г.В.** Учёт свойств человека в модулях технологий. М.: МАИК "Наука/Интерпериодика". 2000. 188 с.
5. **Иванов А.Г., Кукушкин В.А., Скуркайте А.П.** Вероятностно-динамические методы оптимального управления производственно-экономическими системами // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 8. С. 43—46.
6. **Рыбников О.Н.** Психофизиология профессиональной деятельности. М.: Изд. центр "Академия". 2010. 164 с.
7. **Варнавский А.Н.** Имитационное моделирование производительности труда работника при разных вариантах организации производственных работ // Автоматизация в промышленности. 2013. № 7. С. 55—59.
8. **Томашевский В.Н., Жданова Е.Г.** Имитационное моделирование в среде GPSS. М.: Бестселлер. 2003. 146 с.
9. **Краснощёков П.С., Петров А.А.** Принципы построения моделей. М.: Изд-во ФАЗИС: Вычислительный центр РАН. 2000. 412 с.
10. **Основы профессионального психофизиологического отбора** / Н.В. Макаренко, Б.А. Пухов, Н.В. Кольченко и др. Киев: Наук. думка. 1987. 323 с.

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации,
можно найти на сайте www.mashin.ru