ISSN 2079-0023
№ 51’ 2017

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

1885

«ХПІ»

ВІСНИК

Національного технічного університету
«ХПІ»

Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології

№ 51 (1272) 2017

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2017

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 51 (1272). – 73 с.

Державне видання
Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 р. та наказом МОН України № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

Координаційна рада:
Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);
А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;
А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;
В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.;
С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;
Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.;
В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.;
В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.;
В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;
Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:
Відповідальний редактор: М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.
Заст. відповідального редактора: О. С. Куценко, д-р техн. наук, проф.
Відповідальний секретар: М. І. Безменов, канд. техн. наук, проф.
Члени редколегії: І. П. Гамаюн, д-р техн. наук, проф.; І. В. Кононенко, д-р техн. наук, проф.;
Л. М. Любчик, д-р техн. наук, проф.; Р. Мішкевич, д-р ек. наук, проф. (Польща);
О. А. Павлов, д-р техн. наук, проф. (НТУУ «КПІ»); К. Пайонк, д-р ек. наук, проф. (Польща);
Л. Г. Раскін, д-р техн. наук, проф.; В. П. Северин, д-р техн. наук, проф.;
М. В. Ткачук, д-р техн. наук, проф.; Н. Ф. Хайрова, д-р техн. наук, проф.;
Н. В. Шаронова, д-р техн. наук, проф..

Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Системний аналіз, управління та інформаційні технології», індексується в наукометричних базах ***Index Copernicus, WorldCat*** *і* ***Google Scholar*** *і включений у довідник періодичних видань бази даних* ***Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)****. Повний перелік див. на сайті http://samit.khpi.edu.ua/*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 11 від 22 грудня 2017 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2017

УДК 697.1

А. С. КУЦЕНКО, В. И. ТОВАЖНЯНСКИЙ

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ ЗДАНИЯ С ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ

Рассматривается актуальная задача структурного синтеза системы автоматического управления индивидуальным тепловым пунктом жилых, производственных и офисных зданий. На основе упрощенной математической модели процесса теплоснабжения, отражающей в безразмерной форме основные конструктивные параметры здания, с помощью принципа максимума найден оптимальный закон управления тепловой мощностью с учетом краткосрочного прогноза погоды. Полученное программное управление по возмущению корректируется управлением по отклонению температуры помещения от заданного комфортного значения.

Ключевые слова: оптимальное управление теплоснабжением, комбинированное управление, управление с прогнозирующей моделью, метод последовательных приближений.

Розглядається актуальна задача структурного синтезу системи автоматичного управління індивідуальним тепловим пунктом житлових, виробничих і офісних будівель. На основі спрощеної математичної моделі процесу теплопостачання, що відбиває в безрозмірною формі основні конструктивні параметри будівлі, за допомогою принципу максимуму знайдений оптимальний закон керування тепловою потужністю з урахуванням короткострокового прогнозу погоди. Отримане програмне управління з обуренню коригується управлінням по відхиленню температури приміщення від заданого комфортного значення..

Ключові слова: оптимальне управління теплопостачанням, комбіноване управління, управління з прогнозуючої моделлю, метод послідовних наближень.

The actual problem of structural synthesis of the automatic control system for the thermal state of housing, industrial and office buildings is considered. Based on the simplified mathematical model of the main thermal processes of the heated building and short-term weather forecast, the method and algorithm of the thermal power optimal control the were developed based on the criterion of the internal air temperature minimum deviation from the specified comfort value. The application of the maximum principle and the numerical method of fixed-point iterations for solving the two-point boundary problem allowed to find the thermal power software control online, which corresponds to the ideology of the MPC method. Program control errors caused by the inaccuracy of the mathematical model and the weather forecast is proposed to compensate in control circuit by the deviation of the actual internal temperature from its comfort value. The corresponding block diagram of the combined control system is proposed.

Key words: optimal heating control, combined control, control with predictive model, fixed-point iterations.

Список обозначений.

T – усредненная температура ограждения.

T_a – усредненная температура внутренних аккумулирующих элементов.

Q – тепловой поток отопительных приборов.

$T_в$ – температура внутреннего воздуха.

$T_в^*$ – задание по температуре внутреннего воздуха.

$T_{ос}$ – температура окружающей среды.

$\hat{T}_{ос}$ – прогнозируемая температура окружающей среды.

$\overline{T}_{ос}$ – среднесуточное значение температуры наружного воздуха.

ΔT – амплитуда колебаний температуры наружного отдыха.

ρ – отношение тепловых сопротивлений ограждения и внутренних аккумулирующих элементов.

ω – отношение тепловых сопротивлений ограждения и остекления.

τ – постоянная времени внешнего ограждения здания.

ξ – отношение постоянных времени ограждения и внутренних аккумулирующих элементов.

Введение. Эффективное теплоснабжение жилых и промышленных зданий является одной из ключевых проблем современной Украины, имеющей первостепенное социальное, экономическое и внешнеполитическое значение. Несмотря на то, что теплоснабжение помещений является одним из основных процессов, обеспечивающих жизнедеятельность человека, а его научно-техническая поддержка в виде таких научных дисциплин как техническая термодинамика, теплотехника и гидроаэромеханика имеет более чем двухсотлетнюю историю, интерес к совершенствованию организации отопительных процессов за последние несколько десятилетий поднялся на принципиально новый уровень. На протяжении последних 50 лет существования СССР проблеме совершенствования систем теплоснабжения не уделялось должного внимания в связи с недопустимо низкими ценами на энергоносители, что приводило к значительным потерям тепловой энергии сквозь чрезмерно остекленные бетонные ограждения, длинные теплотрассы и несовершенные отопительные приборы. Это обусловило необходимость решения комплекса взаимосвязанных задач по обеспечению комфортных условий в отапливаемых помещениях, снижению расходов энергоносителей, экологическому совершенствованию процессов производства, транспортировки и использования тепловой энергии в условиях рыночной экономики.

Вторым фактором, определяющим низкое качество отопительных процессов, является общепринятое качественное регулирование теплоснабжения при котором все здания отопительном районе получают теплоноситель, температура которого изменяется по фиксированному температурному графику, задаваемому генерирующей котельной установкой. Количество же теплоты, потребляемой каждым конкретным зданием, в большинстве случаев не регулируется. Это

©А. С. Куценко, В.И. Товажнянский 2017

приводит как к нарушению комфортного температурного режима помещений с одной стороны, так и к дополнительным энергетическим потерям при ручном управлении тепловым режимом отдельными потребителями путем проветривания или подключения электрообогревателей в зависимости от соотношения температуры окружающей среды и внутреннего воздуха.

Одним из путей преодоления проблем, связанных с централизованным теплоснабжением, является его децентрализация путем установки в многоэтажных строениях индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) оснащенных системой автоматического управления количеством теплоты, направленным на отопление здания.

На автоматизированный ИТП могут быть возложены функции поддержания заданной (комфортной) температуры внутреннего воздуха, а также программного изменения подводимой тепловой мощности при прерывистом режиме отопления.

Внедрение ИТП позволяет учесть всевозможные факторы, влияющие на тепловое состояние здания. К последним относятся как конструктивные особенности (материал и толщина внешнего ограждения, поверхность остекления) так и внешние возмущения (температура окружающей среды, температура теплоносителя, генерируемого центральной котельной установкой и др.).

Целью работы является обоснование структуры систем автоматического управления индивидуальным тепловым пунктом, функционирующих в условиях неопределенности математической модели теплового процесса здания и возмущающих воздействий.

Обзор литературы. Анализ всего комплекса подходов к автоматизации процессов, связанных с теплоснабжением можно найти в работе [1]. Системный подход к конструированию математических моделей и оптимизации тепловой эффективности детально рассматривается в монографии [2]. Эти работы являются типичными представителями множества исследований, инициированных специалистами в области теплотехники, поставившими перед собой цель формировать проблему управления теплоснабжением на языке максимально близком к языку теории автоматического управления. Их основными недостатками является представление тепловых процессов в отапливаемом здании как квазистатических, не учитывающих процессы аккумулирования теплоты во внешних ограждениях. В противовес квазистатическим моделям широко применяются математические модели, основанные на уравнении теплопроводности в частных производных, решение которого, находится численными методами. Такой подход, в наибольшей мере, ориентирован на решение задач анализа теплового состояния здания. Для решения же задач синтеза законов управления такой подход малопригоден.

Большинство зарубежных публикаций в этом направлении ориентируются на конечномерный подход к математическому моделированию тепловых процессов зданий [3]. В результате такого подхода математическая модель процесса теплоснабжения представляет собой управляемую систему линейных обыкновенных дифференциальных уравнений, которые используются в качестве прогнозирующих для метода MPC управления с прогнозирующими моделями (modeling predictive control). В тоже время, предлагаемые математические модели для реализации MPC имеют ряд принципиальных недостатков. Во-первых, отсутствует какое-либо обоснование размерности моделирующей системы дифференциальных уравнений. Во-вторых, чрезмерная детализация математической модели приводит к появлению большого числа неопределенных параметров. И, наконец, это неучет разнотемповости динамических процессов в таких ключевых элементах системы как внешнее и внутреннее ограждение, полезное наполнение здания, внутренний воздух.

Определенные шаги в направлении учета перечисленных недостатков были сделаны в работах авторов [4, 5].

Анализ реальных систем автоматического управления тепловым состоянием [6] дает основания утверждать, что в их основе лежит принцип количественного регулирования массового расхода горячего теплоносителя в соответствии с заданным температурным графиком, представляющим собой заранее сформулированную зависимость положения регулирующего клапана от температуры окружающей среды в данный момент времени. Очевидны принципиальные недостатки такого подхода: это неучет информации о реальной температуре внутреннего воздуха, а также неучет динамических качеств конкретного здания и краткосрочного прогноза погоды. Отмеченные недостатки могут быть устранены на основе комбинированной системы управления с прогнозирующей моделью в канале управления по возмущению, что и составляет предмет настоящего исследования.

Постановка задачи исследования. Упрощенная математическая модель процесса теплоснабжения, обоснование которой приведено в работах [4, 5] имеет вид

$$\begin{aligned}
\frac{dT}{d\vartheta} &= -\left[1+2(\rho+\omega)\right]T+\rho T_a+q+(1+\rho+\omega)T_{oc},\\
\frac{dT_a}{d\vartheta} &= \xi T-\xi(1+\omega)T_a+\xi\omega T_{oc}+\xi q,\\
T_в &= \frac{1}{1+\rho+\omega}\left(q+T+\rho T_a+\omega T_{oc}\right),
\end{aligned} \qquad (1)$$

где $\vartheta = t/\tau/(1+\rho+\omega)$ – безразмерное время, $q = QR$ – тепловой поток отопительных приборов в температурном измерении, R – тепловое сопротивление.

Критерий качества процесса теплоснабжения примем интегральным квадратическим

$$J = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_1}\left[\left(T_в(t)-T_в^*(t)\right)^2 dt\right], \qquad (2)$$

оценивающим отклонение температуры помещения от программного значения.

Прогноз температуры окружающей среды на интервале времени $[t_0, t_1]$ предполагается достаточно обоснованным.

Необходимо найти закон управления тепловой мощностью $q(t)$, минимизирующий критерий (2).

Синтез программного управления тепловой мощностью. Для решения поставленной задачи оптимального управления воспользуемся принципом максимума. После подстановки третьего уравнения (1) в (2) гамильтониан задачи можно записать как

$$\begin{aligned} \mathrm{H} = \frac{1}{2}\left[a\left(q + T + \rho T_a + \omega T_{oc}\right) - T_в^*\right]^2 + \\ + \lambda_1\left[-bT + \rho T_a + q + cT_{oc}\right] + \lambda_2\left[T - dT_a + q + \omega T_{oc}\right]\cdot\xi, \end{aligned} \quad (3)$$

где $a = (1+\rho+\omega)^{-1}$, $b = 1+2(\rho+\omega)$, $c = 1+\rho+2\omega$, $d = 1+\omega$.

Соответствующая система дифференциальных уравнений для сопряженных переменных λ_1 и λ_2 примет вид

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_1}{d\vartheta} &= -\left[a\left(q + T + \rho T_a + \omega T_{oc}\right) - T_в^*\right]a + b\lambda_1 - \xi\lambda_2, \\ \frac{d\lambda_2}{d\vartheta} &= -\left[a\left(q + T + \rho T_a + \omega T_{oc}\right) - T_в^*\right]a\rho - \rho\lambda_1 + \xi d\lambda_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Из условия стационарности функции H по q

$$\frac{\partial H}{\partial q} = a\left[a\left(q + T + \rho T_a + \omega T_{oc}\right) - T_в^*\right] + \lambda_1 + \lambda_2\xi = 0$$

найдем закон оптимального управления для $0 \le q \le q_{\max}$ в виде

$$q = -\left(T + \rho T_a + \omega T_{oc}\right) + a^{-2}\left(aT_в^* - \lambda_1 - \lambda_2\xi\right). \quad (5)$$

Если вычисленное в соответствии с (5) значение q не будет удовлетворять заданным границам 0 и $q_{\max}$, то в качестве q выбираются соответствующие граничные значения.

Таким образом, полная система дифференциальных уравнений для решения задачи оптимальной компенсации внешнего возмущения $T_{oc}(t)$ примет вид

$$\begin{aligned} \frac{dT}{d\vartheta} &= -bT + \rho T_a + q(\cdot) + cT_{oc}, \\ \frac{dT}{d\vartheta} &= \xi T - \xi d T_a + \xi q(\cdot) + \xi\omega T_{oc} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_1}{d\vartheta} &= -a^2 T - a^2\rho T_a + b\lambda_1 - \xi\lambda_2 - \\ &- a^2 q(\cdot) - a^2\omega T_{oc} + aT_в^*, \\ \frac{d\lambda_2}{d\vartheta} &= -a^2\rho T - a^2\rho T_a - \rho\lambda_1 + \xi d\lambda_2 - \\ &- a^2\rho q(\cdot) - a^2\rho T_{oc} + a\rho T_в^*, \end{aligned} \quad (7)$$

где $q(\cdot)$ вычисляется в соответствии с (5) и ограничениями.

Сформулированная задача оптимального управления относится к классу задач со свободным правым концом. В связи с этим граничные условия для сопряженной системы (7) имеют вид

$$\lambda_1(t_1) = 0, \quad \lambda_2(t_1) = 0. \quad (8)$$

Начальные условия для температуры ограждения и температуры внутреннего наполнения не могут быть измерены непосредственно. В связи с этим в качестве $T(t_0)$ и $T_a(t_0)$ принимаются значения, вычисленные по статической модели

$$\begin{aligned} T(t_0) &= \frac{1}{2}\left(T_в^*(t_0) - T_{oc}(t_0)\right), \\ T_a(t_0) &= T_в^*(t_0). \end{aligned} \quad (9)$$

Для решения полученной двухточечной краевой задачи воспользуемся методом аналогичным методу последовательных приближений, идея которого принадлежит Черноусько [7]. На первом шаге задается некоторый произвольный закон управления $q(t)$ и интегрируется система (6). Далее интегрируется сопряженная система (7) в обратном времени с учетом (8), при этом на каждом шаге интегрирования вычисляется оптимальное управление по формуле (5).

Полученные траектории $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$, используются для вычисления $q(t)$ в соответствии с (5) и интегрирования системы (6) в прямом времени. Начальные условия для интегрирования этой системы выбираются или в виде (9) при $t = t_0$ или на основании замеров температуры ограждения и температуры внутреннего воздуха, которая принимается в качестве начальной температуры внутреннего наполнения. Полученные в процессе интегрирования системы (6) значения температуры используются для последующего интегрирования (7) в обратном времени. Итерационный процесс продолжается до достижения сходимости по траекториям $q(t)$, $T(t)$, $T_a(t)$ и $T_в(t)$. Численные эксперименты показали высокую скорость сходимости итерационного процесса. Относительное отклонение последующей итераций менее чем 0,01 достигалось не более чем на 15 цикле итерационного процесса. На рис. 1 приведен пример зависимости оптимальной тепловой мощности при гармоническом изменении температуры окружающей среды

$$\hat{T}_{oc}(\vartheta) = \overline{T}_{oc} + \Delta T \sin\Omega\vartheta.$$

Круговая частота Ω определяется соотношением между реальным временем t и безразмерным ϑ, т.е. конструктивными параметрами здания:

$$\Omega = 2\pi l,$$

где l – количество суток в интервале, соответствующем единице безразмерного времени ϑ.

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

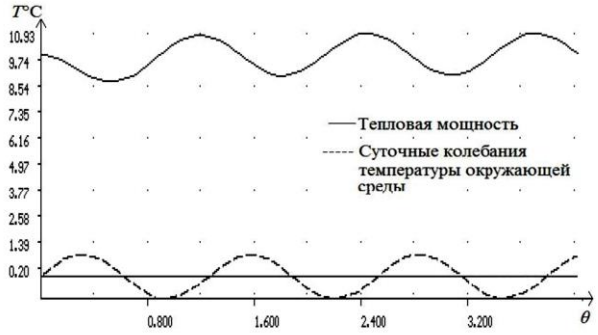


Рис. 1 – Графики изменения тепловой мощности и температуры наружного воздуха

Из рис. 1 видно, что оптимальный закон управления тепловой мощностью подобен закону изменения температуры окружающей среды но смещен по фазе относительно температурных колебаний, в чем и проявляется принципиальное отличие оптимального управления с прогнозирующей моделью от погодного регулирования. Величина фазового сдвига определяется в основном постоянной времени здания.

Полученная оптимальная программа приближенно соответствует реальности, поскольку она основана на упрощенной математической модели процесса теплоснабжения. Для компенсации ошибок, вызванных неточностью модели, естественно дополнить процесс управления составляющей, сформированной на основе отклонения температуры воздуха от заданного значения, т.е. осуществить комбинированное управление. Таким образом, упрощенная структурная схема комбинированного регулятора теплового состояния отапливаемого здания (ОЗ) примет вид, изображенный на рис 2.

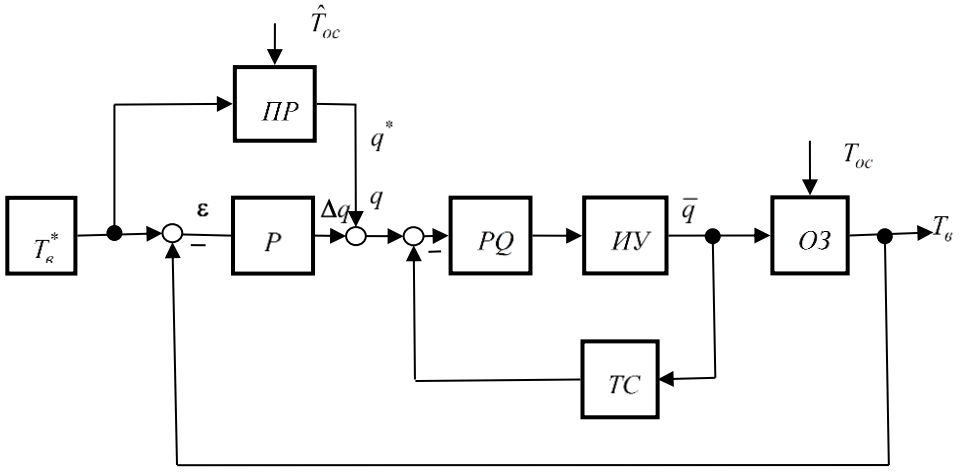


Рис. 2 – Структурная схема комбинированного регулятора тепловой мощности с прогнозирующей моделью

На рис. 2 регулятор P по отклонению $\varepsilon = T_в^* - T_в$ формирует поправку Δq к вычисленному регулятором $ПР$ программному значению тепловой мощности q^*. Полученное суммарное значение тепловой мощности $q = q^* + \Delta q$ используется в качестве задания для внутреннего контура управления тепловым потоком, осуществляющего изменение расхода теплоносителя, поступающего в систему отопления. Регулятор PQ и исполнительное устройство ИУ реализуют закон управления расходом теплоносителя на основе отклонения задания по тепловой мощности q от измеренной тепловым счетчиком ТС реальной тепловой мощности $\bar{q}$ отопительного прибора. Таким образом, в предлагаемой структурной схеме тепловой счетчик кроме функции мониторинга исполняет функцию датчика во внутреннем контуре регулирования тепловой мощности.

Выводы. На основе упрощенной математической модели основных тепловых процессов отапливаемого здания и краткосрочного прогноза погоды разработан метод и алгоритм оптимального управления тепловой мощностью по критерию минимума отклонения температуры внутреннего воздуха от заданного комфортного значения.

Применение принципа максимума и численного метода последовательных приближений для решения полученной двухточечной краевой задачи позволило находить программное управление тепловой мощностью в режиме online, что соответствует идеологии MPC метода.

Ошибки программного управления, обусловленные неточностью математической модели и прогноза погоды предлагается компенсировать в контуре управления по отклонению реальной температуры внутреннего воздуха от ее комфортного значения. Предложена соответствующая структурная схема комбинированной системы управления.

Список литературы

1. *Чистович С. А.* Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / *С. А. Чистович, В. К. Аверьянов, Ю. А. Трепель, С. И. Быков.* – Л. : Стройиздат, 1987. – 249с.
2. *Табунщиков А. Ю.* Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий /

Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
3. *Ercan Atam* Control-Oriented Thermal Modeling of Multizone Buildings: Methods and Issues / *Atam Ercan, Helsen Lieve* // IEEE control systems, Volume 36. 2016. – p.p. 86 – 111.
4. *Куценко А. С.* Системный подход к математическому моделированию тепловых процессов зданий / *А. С. Куценко, С. В. Коваленко, В. И. Товажнянский* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков : НПП «Технологический центр», 2014. – №4/4 (70) – С. 9 – 12.
5. *Куценко А. С.* Оптимальная стабилизация теплового состояния здания / *А. С. Куценко, С. В. Коваленко, В. И. Товажнянский* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Системний аналіз, управління та інформаційні технології . – Х. : НТУ «ХПІ». – № 42 (948). – С. 17 – 22.
6. *Вороновский Г. К.* Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях / *Г. К. Вороновский*. – Х. : Харьков, 2002. – 240 с.
7. *Черноусько Ф. Л.* Вариационные задачи механики и управления / *Ф. Л. Черноусько, Н. В. Баничук*. – М. : Наука, 1973. – 238 с.

References (transliterated)

1. *Chistovich S. A.* Avtomatizirovannyye sistemy teplosnabzheniya i otopleniya / *S. A. Chistovich, V. K. Aver'yanov, YU. A. Trempel', S. I. Bykov*. – L. : Stroyizdat, 1987. – 249s.
2. *Tabunshhikov A. Ju., M. M. Brodach*. Matematicheskoe modelirovanie i optimizacija teplovoj jeffektivnosti zdanij. Moscow: AVOK-PRESS, 2002. Print.
3. *Atam Ercan , Helsen Lieve* Control-Oriented Thermal Modeling of Multizone Buildings: Methods and Issues. IEEE control systems, Vo 36. 2016. 86–111. Print.
4. *Kucenko A. S., S. V. Kovalenko, V. I. Tovazhnjanskij*. Sistemnyj podhod k matematicheskomu modelirovaniju teplovyh processov zdanij. Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. Kharkov: NPP «Tehnologicheskij centr», No 4/4 (70), 2014, 9–12. Print.
5. *Kutsenko A. S.* Optimal'naya stabilizatsiya teplovogo sostoyaniya zdaniya / *A. S. Kutsenko, S. V. Kovalenko, V. I. Tovazhnyanskiy* // Vísnik NTU «KHPÍ». Seríya : Sistemniy analíz, upravlínnya ta ínformatsíyní tekhnologíÍ . – KH. : NTU «KHPÍ». – № 42 (948). – C. 17 – 22.
6. *Voronovskij G. K.* Usovershenstvovanie praktiki operativnogo upravlenija krupnymi teplofikacionnymi sistemami v novyh jekonomicheskih uslovijah / *G. K. Voronovskij*. –KH. : Kharkov, 2002. – 240 s. Print.
7. *Chernous'ko F. L.* Variatsionnyye zadachi mekhaniki i upravleniya / *F. L. Chernous'ko, N. V. Banichuk*. – M. : Nauka, 1973. – 238 s.

Поступила (received) 20.10.2017

Бібліографічні описи / *Библиографические описания* / *Bibliographic descriptions*

Комбінована система автоматичного управління з прогнозуючої моделлю тепловим станом будівлі / О. С. Куценко, В. І. Товажнянський // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – 2017. – № 51 (1272). – С. 3–7. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Комбинированная система автоматического управления с прогнозирующей моделью тепловым состоянием здания / А. С. Куценко, В. И. Товажнянский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2017. – № 51 (1272). – С. 3–7. – Библиогр.: 7 названий. – ISSN 2079 0023.

Automatic control combined system with the predictive model of the building's thermal state / O. S. Kutsenko, V. I. Tovagnyansky // Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 51 (1272). – P. 3–7. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

Відомості про *авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

Куценко Олександр Сергійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

Куценко Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа и информационно-аналитических технологий, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

Kutsenko Oleksandr Sergijovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Computer Science Department, National Technical University «Kharkiv Politechnic Institute», Kharkiv, Ukraine. e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

Товажнянський Володимир Ігорович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: vtovazhnianskyi@mail.ru

Товажнянский Владимир Игоревич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: vtovazhnianskyi@mail.ru.

Tovagnyansky Vladimir Igorevych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student; tel.: (057) 707-61-03; e-mail: vtovazhnianskyi@mail.ru

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

УДК 62-5:620.9

Е. Н. НИКУЛИНА, В. П. СЕВЕРИН, Д. А. ЛУКИНОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВВЭР-1000 С УЧЕТОМ БОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Розроблено моделі реактора ВВЕР-1000 у вигляді систем диференціальних рівнянь з відносними змінними стану, що описують нейтронну кінетику реактора, теплові процеси, зміни концентрацій ксенону і бору. Обчислені постійні параметри математичних моделей з урахуванням борного регулювання. На підставі математичних моделей реактора отримані перехідні процеси для введення борної кислоти в реактор, проаналізовано зміни найважливіших змінних стану активної зони реактора.
Ключові слова: ядерний реактор, борне регулювання, перехідний режим, математична модель, параметри моделі.

Разработаны модели реактора ВВЭР-1000 в виде систем дифференциальных уравнений с относительными переменными состояния, описывающие нейтронную кинетику реактора, тепловые процессы, изменения концентраций ксенона и бора. Вычислены постоянные параметры математических моделей с учетом борного регулирования. На основании математических моделей реактора получены переходные процессы для ввода борной кислоты в реактор, проанализированы изменения важнейших переменных состояния активной зоны реактора.
Ключевые слова: ядерный реактор, борное регулирование, переходной режим, математическая модель, параметры модели.

The mathematical models of the VVER-1000 reactor of the V-320 series are constructed in the form of systems of differential equations with relative state variables describing the neutron kinetics of the reactor, gradual heat release, thermal processes, and changes in the concentrations of xenon and boron. The design parameters and parameters of the VVER-1000 reactor of the V-320 series are used to calculate the constant parameters of mathematical models, taking into account boron regulation. Based on mathematical models of the reactor, by numerical integration of differential equations, transient processes for introducing boric acid into the reactor have been obtained, which allows one to analyze changes in the most important variables of the state of the reactor core.
Keywords: nuclear reactor, boron control, transition mode, mathematical model, model parameters.

Введение. В энергосистеме Украины на атомных электрических станциях (АЭС) эксплуатируются 13 энергоблоков с ядерными реакторами ВВЭР-1000, из них 11 реакторов типовой серии В-320 [1]. Решение насущной проблемы энергосбережения связано с обеспечением режимов маневрирования мощностью энергоблоков АЭС [2, 3]. Для совершенствования систем управления и теоретического решения задачи маневрирования мощностью энергоблоков необходимы их математические модели, на основании которых выполняется синтез оптимальных систем автоматического управления энергоблоков [4–6]. Ядерный реактор является сложнейшим и важнейшим элементом энергоблока АЭС, поэтому актуальной задачей для последующего улучшения процессов управления энергоблоков в маневренных режимах эксплуатации является разработка математических моделей реактора ВВЭР-1000 серии В-320.

Анализ литературных данных. Существует множество математических моделей различной степени сложности, позволяющих изучать нестационарные процессы, протекающие в водо-водяном энергетическом реакторе ВВЭР. Для исследования переходных процессов в реакторе ВВЭР-1000 разработаны нелинейные и линейные модели в пространстве состояний с относительными переменными, которые включают дифференциальные уравнения (ДУ) нейтронной кинетики с количеством групп запаздывающих нейтронов (ЗН) 1, 2 и 6, а также систему дифференциальных уравнений (СДУ) тепловых процессов в топливе, оболочке и теплоносителе [7]. В этих моделях учтены эффект реактивности от перемещения управляющих стержней, мощностной и температурный эффекты реактивности. На основании моделей проведено исследование динамики реактора путем построения переходных процессов при ступенчатом изменении реактивности. Показано, что уравнения нейтронной кинетики с одной группой ЗН имеют существенную погрешность по сравнению с моделью с шестью группами ЗН. Эти модели использованы для синтеза оптимальных систем автоматического управления энергоблоков [4–6]. Ни в одной из рассмотренных моделей не учтены процессы постепенного тепловыделения, изменений концентраций ксенона и бора, которые существенно влияют на динамику реактора [2, 8, 9].

Цель и задачи исследования. Цель статьи состоит в представлении результатов математического моделирования переходных процессов в ядерном реакторе ВВЭР-1000 серии В-320 для изучения эффекта борного регулирования вначале стационарной загрузки топлива.

Для достижения намеченной цели поставлены задачи:

– описать известные ДУ нейтронных и тепловых процессов, а также процессов изменений концентраций ксенона и бора в активной зоне реактора;

– построить математические модели ядерного реактора ВВЭР-1000 в относительных переменных состояния с учетом ввода борной кислоты в активную зону реактора;

– на основании конструктивных и технологических параметров реактора ВВЭР-1000 серии В-320 вычислить параметры математических моделей вначале стационарной загрузки топлива;

– получить процессы изменения мощности ядерного реактора ВВЭР-1000 серии В-320 при вводе борной кислоты в активную зону реактора.

© Е. Н. Никулина, В. П. Северин, Д. А. Лукинова, 2017

Моделирование ядерного реактора. Для моделирования переходных процессов в активной зоне реактора при вводе борной кислоты необходимо рассмотреть уравнения нейтронной кинетики, тепловых процессов, а также процессов изменений концентраций ксенона и бора.

Уравнения точечной нейтронной кинетики реактора с учетом шести групп ЗН имеют вид [7, 9]:

$$\begin{cases} dn/dt = (r-\beta)\,n/l^* + \sum_{i=1}^{6}\lambda_i C_i, \\ dC_i/dt = \beta_i\, n/l^* - \lambda_i C_i,\ i=\overline{1,6}, \end{cases} \quad (1)$$

где n – плотность нейтронов, r – реактивность реактора, $\beta = \sum_{i=1}^{6}\beta_i$ – суммарная доля ЗН, l^* – среднее эффективное время жизни нейтронов, λ_i и C_i – постоянные радиоактивного распада и концентрации ядер-излучателей ЗН, β_i – доли ЗН, $\lambda_i = 1/l_i$, l_i – среднее время жизни ядер-излучателей i-той группы ЗН. Концентрации ядер-излучателей ЗН в номинальном режиме имеют значения $C_{0i} = \beta_i n_0/(\lambda_i l^*)$, $i=\overline{1,6}$. В равновесном состоянии номинального режима реактора начальные условия СДУ (1) $n = n_0$, $C_i = C_{0i}$, $i=\overline{1,6}$.

В уравнениях нейтронной кинетики реактора (1) перейдем к относительным переменным:

$$\nu = n/n_b,\ \rho = r/\beta,\ \xi_i = C_i/C_{bi},\ i=\overline{1,6},\ \tau = t/t_b,$$

где $n_b = n_0$ – базовое значение плотности нейтронов, $C_{bi} = C_{0i}$ – базовые значения концентрации ядер-излучателей ЗН, $t_b = 1\text{c}$ – базовое значение времени. Определим параметры $\alpha_\nu = \beta t_b/l^*$, $\alpha_i = \lambda_i t_b$, $\mu_i = \beta_i/\beta$, $i=\overline{1,6}$, после алгебраических преобразований получим модель кинетики:

$$\begin{cases} d\nu/d\tau = \alpha_\nu[(\rho-1)\nu + \sum_{i=1}^{6}\mu_i\xi_i], \\ d\xi_i/d\tau = \alpha_i(\nu-\xi_i),\ i=\overline{1,6}. \end{cases} \quad (2)$$

Начальные условия для этой СДУ соответствуют номинальному режиму: $\nu_0 = 1$, $\xi_{0i} = 1$, $i=\overline{1,6}$, $\alpha_\nu = 304$, остальные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры СДУ ЗН

i	1	2	3	4	5	6
μ_i	0.033	0.221	0.196	0.396	0.114	0.041
α_i	0.014	0.030	0.111	0.300	1.124	3.012

Тепловыделение в топливе при ядерных реакциях рассчитывается по формуле $Q_u = Q_0(\varepsilon_m\nu + \varepsilon_p\eta)$, где $\varepsilon_m = 0.896$ и $\varepsilon_p = 0.078$ – доли мгновенного и постепенного тепловыделений, Q_0 – тепловая мощность реактора в номинальном режиме, $\eta = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3$ – относительная мощность постепенного тепловыделения [8]. Переменные η_1, η_2, η_3 находят из СДУ:

$$T_i\, d\eta_i/dt + \eta_i = K_i\nu,\quad i=\overline{1,3},$$

где T_i и K_i – постоянные параметры. По этим уравнениям с обозначениями $b_{i\nu} = K_i t_b/T_i$, $a_{i\eta} = t_b/T_i$, $i=\overline{1,3}$ получим модель относительного тепловыделения в форме Коши:

$$d\eta_i/d\tau = b_{i\nu}\nu - a_{i\eta}\eta_i,\quad i=\overline{1,3}. \quad (3)$$

Начальные условия этой СДУ $\eta_{0i} = K_i$, $i=\overline{1,3}$. Параметры модели (3) приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения параметров модели тепловыделения

i	K_i	$a_{i\eta}$	$b_{i\nu}$
1	0.05	0.6	0.012
2	0.33	–1.999	0.01
3	0.62	–1.114	5.26×10^{-4}

Уравнения теплового баланса для топлива, оболочки и теплоносителя имеют вид [7, 9]:

$$\begin{cases} c_u M_u\, dt_u/dt = Q_u - \alpha_z F_z(t_u - t_z), \\ c_z M_z\, dt_z/dt = \alpha_z F_z(t_u - t_z) - \alpha_r F_z(t_z - t_r), \\ c_r M_r\, dt_r/dt = Q_r + \alpha_r F_z(t_z - t_r) - c_r G_r(t_r - t_l), \end{cases} \quad (4)$$

где c_u и M_u – удельная теплоемкость и масса топлива – двуокиси урана, t_u и t_z – средние температуры поверхности топлива и оболочки твэла из циркониевого сплава, α_z – коэффициент теплоотдачи от топлива к оболочке, F_z – суммарная площадь оболочек, c_z и M_z – удельная теплоемкость и суммарная масса оболочек всех твэлов в активной зоне, α_r – коэффициент теплоотдачи от оболочки к теплоносителю, t_r – средняя температура теплоносителя в активной зоне, c_r и M_r – удельная теплоемкость и масса теплоносителя в активной зоне, Q_r – тепловыделение в теплоносителе вследствие замедления нейтронов, G_r – расход теплоносителя через активную зону, t_l – температура теплоносителя на входе в активную зону.

Тепловыделение в теплоносителе $Q_r = Q_0\varepsilon_r\nu$, где $\varepsilon_r = 0.026$ – доля мгновенного тепловыделения при замедлении нейтронов.

Обозначим t_{0u}, t_{0z}, t_{0r} и t_{0l} – значения температур в номинальном режиме, которые определяют начальные условия СДУ (4). По известным значениям температур в номинальном режиме на входе t_{0l} и выходе t_{0h} активной зоны найдем среднюю температуру $t_{0r} = (t_{0l} + t_{0h})/2$.

Введем базовое значение температуры T_b и перейдем к относительным переменным:

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

$\theta_u = t_u/T_b$, $\theta_z = t_z/T_b$, $\theta_r = t_r/T_b$, $\theta_l = t_l/T_b$.

Преобразуя уравнения (4), введем обозначения для постоянных параметров:

$$a_{uu} = -\frac{\alpha_z F_z t_b}{c_u M_u}, \quad a_{uz} = \frac{\alpha_z F_z t_b}{c_u M_u}, \quad b_{un} = \frac{Q_0 \varepsilon_m n_b t_b}{c_u M_u n_0 T_b},$$

$$b_{uq} = \frac{Q_0 \varepsilon_p t_b}{c_u M_u T_b}, \quad a_{zu} = \frac{\alpha_z F_z t_b}{c_z M_z}, \quad a_{zz} = -\frac{(\alpha_z + \alpha_r) F_z t_b}{c_z M_z},$$

$$a_{zr} = \frac{\alpha_r F_z t_b}{c_z M_z}, \quad a_{rz} = \frac{\alpha_r F_z t_b}{c_r M_r}, \quad a_{rr} = -\frac{\alpha_r F_z + c_r G_r}{c_r M_r} t_b,$$

$$b_{rl} = \frac{G_r t_b}{M_r}, \quad b_{ru} = \frac{Q_0 \varepsilon_r n_b t_b}{c_r M_r n_0 T_b}.$$

Тогда получим модель теплоотвода в относительных переменных состояния:

$$\begin{cases} d\theta_u/d\tau = a_{uu}\theta_u + a_{uz}\theta_z + b_{un}\nu + b_{uq}\eta, \\ d\theta_z/d\tau = a_{zu}\theta_u + a_{zz}\theta_z + a_{zr}\theta_r, \\ d\theta_r/d\tau = a_{rz}\theta_z + a_{rr}\theta_r + b_{rl}\theta_l + b_{ru}\nu. \end{cases} \quad (5)$$

Для номинального режима начальные условия этой СДУ $\theta_{0u} = t_{0u}/T_b$, $\theta_{0z} = t_{0z}/T_b$, $\theta_{0r} = t_{0r}/T_b$, $\theta_{0l} = t_{0l}/T_b$. Параметры модели теплоотвода (5) представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Параметры модели теплоотвода

Параметр	Значение	Параметр	Значение
a_{uu}	–0.217	a_{rr}	–1.937
a_{uz}	0.217	b_{uq}	0.116
b_{un}	1.338	b_{ru}	0.0055
a_{zu}	0.741	θ_{0u}	10.32
a_{zz}	–13.814	θ_{0z}	3.4
a_{zr}	13.073	θ_{0r}	3.05
a_{rz}	0.538	θ_{0l}	2.9

Дифференциальные уравнения изменения концентраций йода и ксенона имеют вид [9]:

$$\begin{cases} dN_J/dt = \gamma_J \Sigma_f^U \Phi - \lambda_J N_J, \\ dN_X/dt = \gamma_X \Sigma_f^U \Phi + \lambda_J N_J - \sigma_a^X N_X \Phi - \lambda_X N_X, \end{cases} \quad (6)$$

где N_J и N_X – концентрации ядер йода и ксенона, γ_J и γ_X – удельные выходы ядер йода и ксенона при реакции деления топлива, Σ_f^U – макроскопическое сечение деления тепловыми нейтронами атомов урана, $\Phi = n\nu_n$ – плотность потока нейтронов, ν_n – средняя скорость нейтронов относительно ядер, λ_J и λ_X – постоянные радиоактивного распада йода и ксенона.

В номинальном режиме концентрации атомов йода и ксенона имеют значения N_{0J} и N_{0X} . В уравнениях (6) перейдем к относительным переменным $\nu_J = N_J/N_{0J}$, $\nu_X = N_X/N_{0X}$ и введем обозначения для постоянных параметров:

$$b_{J\nu} = \gamma_J \Sigma_f^U n_0 \nu_n t_b / N_{0J}, \quad a_{JJ} = \lambda_J t_b,$$

$$b_{X\nu} = \gamma_X \Sigma_f^U n_0 \nu_n t_b / N_{0X}, \quad a_{XX} = \lambda_X t_b,$$

$$a_{XJ} = \lambda_J N_{0J} t_b / N_{0X}, \quad a_{X\nu} = \sigma_a^X n_0 \nu_n t_b.$$

Тогда получим модель изменения концентрации ксенона в относительных переменных состояния:

$$\begin{cases} d\nu_J/d\tau = b_{J\nu}\nu - a_{JJ}\nu_J, \\ d\nu_X/d\tau = b_{X\nu}\nu - a_{XX}\nu_X + a_{XJ}\nu_J - a_{X\nu}\nu_X\nu. \end{cases} \quad (7)$$

Параметры модели (7) приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Параметры модели концентрации ксенона

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$b_{J\nu}$	2.895×10^{-5}	a_{XX}	2.12×10^{-5}
a_{JJ}	2.895×10^{-5}	a_{XJ}	4.296×10^{-5}
$b_{X\nu}$	2.301×10^{-6}	$a_{X\nu}$	2.406×10^{-5}

Борное регулирование. Уравнение баланса борной кислоты в первом контуре описывается ДУ [9]

$$\rho_r V_t \, dC_B/dt = C_M G_M - C_B G_L, \quad (8)$$

где ρ_r – плотность теплоносителя, V_t – объем теплоносителя в первом контуре, C_M – концентрация борной кислоты в баке борного регулирования, G_M и G_L – массовые расходы системы подпитки и дренажа первого контура. Обозначая массу теплоносителя в первом контуре $M_t = \rho_r V_t$ и учитывая, что в нормальном режиме работы первого контура $G_M = G_L$, уравнение (8) примет вид

$$M_t \, dC_B/dt = G_M (C_M - C_B). \quad (9)$$

Перейдем к относительным переменным:

$$\xi_B = C_B/C_{Bb}, \quad \xi_M = C_M/C_{Bb}, \quad g_M = G_M/G_{Bb},$$

где C_{Bb} – базовое значение концентрации борной кислоты, $G_{Bb} = G_M$ – базовое значение массового расхода системы подпитки. Введем обозначение $a_B = G_{Bb} t_b / M_t$. Тогда после преобразования уравнения (9) получим ДУ ввода борной кислоты в относительной переменной состояния

$$d\xi_B/d\tau = a_B g_M (\xi_M - \xi_B). \quad (10)$$

Начальное условие для этого ДУ $\xi_{0B} = C_{0B}/C_{Bb}$, где C_{0B} – концентрация борной кислоты в номинальном режиме. Параметры борного регулирования приведены в табл. 5.

Определение реактивности реактора. Реактивность реактора представим в виде $r = r_0 + \Delta r_u + \Delta r_r + \Delta r_X + \Delta r_B$, где r_0 – начальное

значение реактивности, Δr_u и Δr_r – изменения реактивности при изменении температур топлива и теплоносителя, Δr_X и Δr_B – изменения реактивности при изменении концентраций ксенона и бора [9].

Таблица 5 – Параметры модели борного регулирования

Параметр	Значение	Параметр	Значение
K_B, кг·г$^{-1}$	–0.0135	C_{0B}, г·кг$^{-1}$	8.69
ρ_r, кг·м$^{-3}$	724.4	M_t, т	268
V_t, м^3	370	G_M, т·ч$^{-1}$	40
C_M, г·кг$^{-1}$	40	a_B	4.146×10^{-5}
C_{Bb}, г·кг$^{-1}$	10	ξ_{0B}	0.869

Изменения реактивности определяются приращениями переменных состояния реактора:

$$\Delta r_u = K_u(t_u - t_{0u}), \quad \Delta r_r = K_t(t_r - t_{0r}),$$

$$\Delta r_X = -(N_X - N_{0X})\sigma_a^X \theta_n / \Sigma_c^U, \quad \Delta r_B = K_B(C_B - C_{0B}),$$

где K_u и K_t – коэффициенты реактивности по температурам топлива и теплоносителя, σ_a^X – микроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов атомами ксенона, θ_n – коэффициент использования тепловых нейтронов в неотравленном реакторе, $\Sigma_c^U = \sigma_a^U N_{0U}$ – макроскопическое сечение захвата нейтронов ядрами урана, N_{0U} – концентрация атомов урана в номинальном режиме, K_B – коэффициент реактивности борной кислоты, для номинального режима $r_0 = 0$.

Перейдем к относительным переменным и обозначим

$$\alpha_u = K_u T_b / \beta, \quad \alpha_t = K_t T_b / \beta,$$

$$\alpha_X = -\sigma_a^X \theta_n N_{0X} / (\beta \sigma_a^U N_{0U}), \quad \alpha_B = K_B C_{Bb} / \beta.$$

Тогда получим уравнение реактивности в относительных переменных

$$\rho = \alpha_u(\theta_u - \theta_{0u}) + \alpha_t(\theta_r - \theta_{0r}) + \\ + \alpha_X(\nu_X - \nu_{0X}) + \alpha_B(\xi_B - \xi_{0B}). \qquad (11)$$

Параметры этого уравнения приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Параметры реактивности

Параметр	Значение	Параметр	Значение
α_u	–0.313	α_X	–2.255
α_t	–1.565	α_B	–21.127

Процесс ввода борной кислоты в реактор. С целью исследования влияния ввода борной кислоты на переменные состояния активной зоны ядерного реактора ВВЭР-1000 серии В-320 объединим модели (2), (3), (5), (7), (10), (11) в одну модель. Интегрируя полученную СДУ при начальных условиях номинального режима, получим переходные процессы изменения переменных состояния. Процессы на рис. 1 – 3 представляют изменение переменных состояния в зависимости от времени в минутах $t_m = \tau/60$, а на рис. 4 и 5 – в зависимости от времени в часах $t_h = t_m/60$.

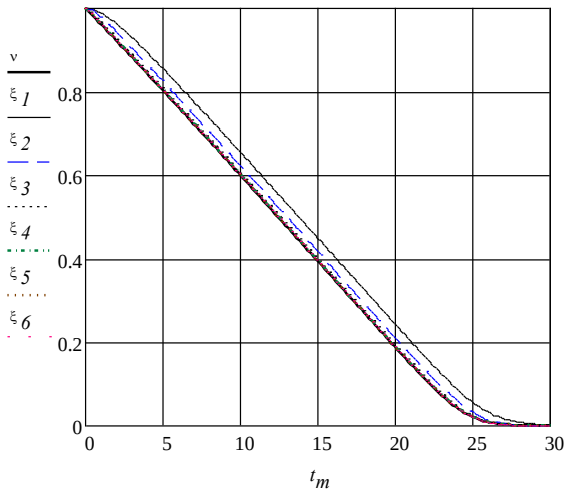


Рис. 1 – Переменные нейтронной кинетики

Процесс изменения нейтронной мощности реактора на рис. 1 показывает, что реактор переходит из номинального режима в режим нулевой мощности за 26 минут. Концентрации запаздывающих нейтронов монотонно убывают от номинальных значений до нулевых значений.

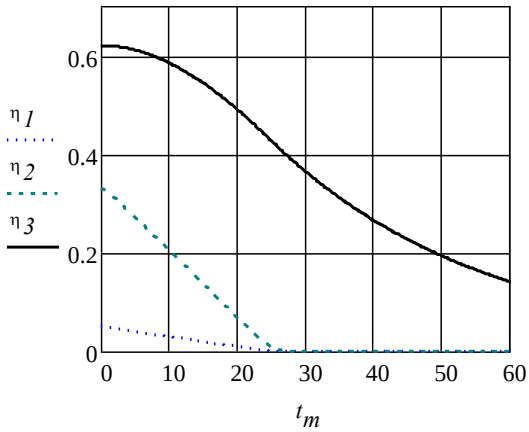


Рис. 2 – Изменение переменных тепловыделения

Переменные постепенного тепловыделения на рис. 2 монотонно убывают от номинальных значений до нулевых значений с различной скоростью.

Температуры топлива, оболочки и теплоносителя реактора на рис. 3 монотонно убывают от значений температур в номинальном режиме до температуры теплоносителя на входе в активную зону.

На рис. 4 концентрация ксенона сначала возрастает от номинального значения, а затем убывает

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

до нулевого значения, концентрация йода монотонно убывает от номинального значения до нулевого значения.

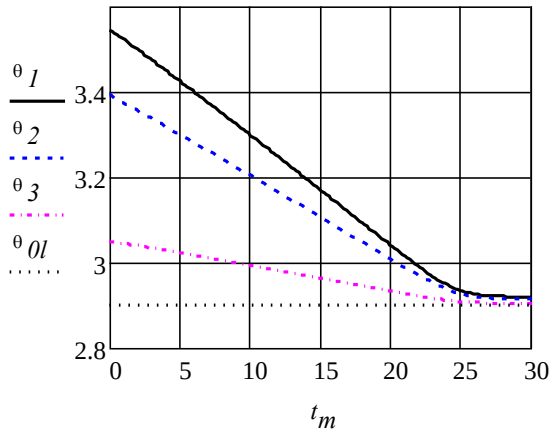


Рис. 3 – Изменение температур

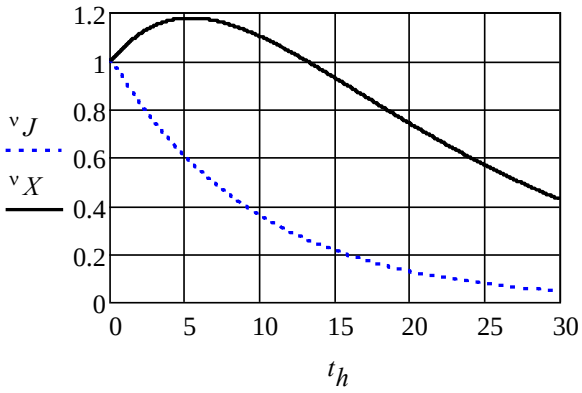


Рис. 4 – Изменение концентраций йода и ксенона

Концентрация борной кислоты на рис. 5 монотонно возрастает от номинального значения до концентрации в баке борного регулирования.

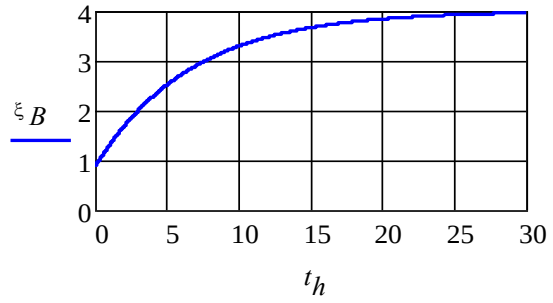


Рис. 5 – Изменение концентрации бора

Таким образом, нейтронные и тепловые процессы происходят в течение десятков минут, а процессы изменения концентраций ксенона и бора – в течение десятков часов.

Выводы. Построены математические модели реактора ВВЭР-1000 серии В-320 в виде систем дифференциальных уравнений с относительными переменными состояния, описывающие нейтронную кинетику реактора, постепенное тепловыделение, тепловые процессы в топливе, оболочках и теплоносителе, изменения концентраций ксенона и бора. По конструктивным и технологическим параметрам реактора ВВЭР-1000 серии В-320 вычислены постоянные параметры математических моделей с учетом борного регулирования. На основании математических моделей реактора путем численного интегрирования дифференциальных уравнений получены переходные процессы для ввода борной кислоты в реактор, что позволяет проанализировать изменения важнейших переменных состояния активной зоны реактора.

Список литературы

1. Системы управления и защиты ядерных реакторов / *М. А. Ястребенецкий, Ю. В. Розен, С. В. Виноградская, Г. Джонсон, В. В. Елисеев, А. А. Сиора, В. В. Скляр, Л. И. Спектор, В. С. Харченко*; Под ред. *М. А. Ястребенецкого*. – К.: Основа-Принт, 2011. – 768 с.
2. *Андрушечко С. А.* АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 / *С. А. Андрушечко, А. М. Афров, Б. Ю. Васильев, В. Н. Генералов, К. Б. Косоуров, Ю. М. Семченков, В. Ф. Украинцев*. – М.: Логос, 2010. – 604 с.
3. *Северин В. П.* Проблема маневренности энергоблока АЭС и развитие моделей его систем управления / *В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Д. А. Лютенко, Е. Ю. Бобух* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 61 (1103). – С. 24–29.
4. *Никулина Е. Н.* Моделирование и синтез систем управления энергоблоком АЭС с ВВЭР-1000 в основных режимах эксплуатации / *Е. Н. Никулина, В. П. Северин* // Материалы V Международной научно-технической конференции «Информационные и управляющие системы АЭС: аспекты безопасности». – Харьков, 2013. – С. 151–162.
5. *Никулина Е. Н.* Оптимальный синтез перспективных систем управления реакторной установки ВВЭР-1000 в нормальных режимах эксплуатации / *Е. Н. Никулина, В. П. Северин* // Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС: сборник научных трудов / Под. ред. *М. А. Ястребенецкого*. – Одесса: Астропринт, 2010. – С. 179–192.
6. *Северин В. П.* Синтез оптимальных систем автоматического управления энергоблока АЭС в нормальных режимах эксплуатации / *В. П. Северин, Е. Н. Никулина* // Ядерна та радіаційна безпека. – 2013. – Вип. 3(59). – С. 62–68.
7. *Северин В. П.* Математическое моделирование и исследование динамики атомного реактора ВВЭР-1000 / *В. П. Северин* // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – Київ: Інститут електродинаміки НАН України. – 2005. – Ч. 4. – С. 94–99.
8. *Денисов В. П.* Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций / *В. П. Денисов, Ю. Г. Драгунов*. – М.: ИздАТ, 2002 – 480 с.
9. *Иванов В. А.* Эксплуатация АЭС: учебник для вузов / *В. А. Иванов*. – СПб: Энергоатомиздат, 1994. – 384 с.

References (transliterated)

1. Yastrebenetskiy M. A., Rozen Yu. V., Vinogradskaya S. V., Dzhonson G., Yeliseyev V. V., Siora A. A., Sklyar V. V., Spektor L. I., Kharchenko V. S. *Sistemy upravleniya i zashchity jadernyh reaktorov* [The nuclear reactor control and protection systems]. Kiyev, Osnova-Print, 2011. 768 p.
2. Andrushechko S. A., Afrov A. M., Vasil'jev B. Yu., Generalov V. N., Kosourov K. B., Semchenkov Yu. M.,

Ukraintsev V. F. AES s reaktorami tipa VVER-1000 [The NPPs with WWER-1000 reactors]. Moscow, Logos, 2010. 604 p.
3. Severin V. P., Nikulina E. N., Lyutenko D. A., Bobukh E. Yu. Problema manevrennosti energobloka AES i razvitiye modeley yego sistem upravleniya [The problem of maneuverability of the power unit of nuclear power plants and development of models of its control systems]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 61 (1103), pp. 24–29.
4. Nikulina E. N., Severin V. P. Modelirovaniye i sintez sistem upravleniya energoblokom AES s VVER-1000 v osnovnykh rezhimakh ekspluatatsii [Modeling and synthesis of control systems for the power unit of NPPs with WWER-1000 in the main operating modes]. *Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferentsii «Informatsionnyje i upravlyayushchije sistemy AES: aspekty bezopasnosti»* [Proc. of the Int. Conf. " Information and control systems of nuclear power plants: safety aspects"]. Khar'kov, 2013, pp. 151–162.
5. Nikulina E. N., Severin V. P. Optimal'nyy sintez perspektivnykh sistem upravleniya reaktornoy ustanovki VVER-1000 v normal'nykh rezhimakh ekspluatatsii [Optimum synthesis of advanced control systems for the WWER-1000 reactor in normal operation conditions]. *Problemy obespecheniya bezopasnosti informatsionnykh i upravlyayushchikh sistem AES: sbornik nauchnykh trudov* [Problems of ensuring the safety of information and control systems of nuclear power plants: a collection of scientific papers]. Odessa: Astroprint, 2010, pp. 179–192.
6. Severin V. P., Nikulina E. N. Sintez optimal'nyh sistem avtomaticheskogo upravlenija energobloka AES v normal'nyh rezhimah ekspluatatsii [Synthesis of optimal automatic control systems for the power unit of NPPs under normal operating conditions]. *Yaderna ta radiatsijna bezpeka* [Nuclear and radiation safety]. Kiev, 2014, no. 3(59), pp. 62–68.
7. Severin V. P. Matematicheskoye modelirovaniye i issledovaniye dinamiki atomnogo reaktora VVER-1000 [Mathematical modeling and study of the dynamics of the WWER-1000 nuclear reactor]. *Tekhnichna elektrodinamika* [Technical electrodynamics]. Kiev, Institut elektrodynamiky NAN Ukrayiny, 2005, no 4, pp. 94–99.
8. Denisov V. P., Dragunov Yu. G. *Reaktornyye ustanovki VVER dlya atomnykh elektrostantsiy* [WWER Reactor Installations for Nuclear Power Plants]. Moscow, IzdAT, 2002. 480 p.
9. Ivanov V. A. *Ekspluatatsiya AES: uchebnik dlya vuzov* [NPP operation: a textbook for universities]. St. Petersburg, Energoatomizdat, 1994. 384 p.

Поступила (received) 05.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделювання перехідних режимів ядерного реактора ВВЕР-1000 з урахуванням борного регулювання / О. М. Нікуліна, В. П. Северин, Д. А. Лукінова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 8–13. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0023.

Моделирование переходных режимов ядерного реактора ВВЭР-1000 с учетом борного регулирования / Е. Н. Никулина, В. П. Северин, Д. А. Лукинова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 8–13. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0023.

Modeling of transients of the WWER-1000 nuclear reactor taking into account boron regulation / E. N. Nikulina, V. P. Severin, D. A. Lukinova // Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 51 (1272). – P. 8–13. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Нікуліна Олена Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри радіоелектроніка; м. Харків, Україна, тел.: (050) 100-79-65; e-mail: elniknik02@gmail.com.

Никулина Елена Николаевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры радиоэлектроника; г. Харьков, Украина, тел.: (050) 100-79-65; e-mail: elniknik02@gmail.com.

Nikulina Elena Nikolaevna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Radioelectronica of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; tel.: (050) 100-79-65; e-mail: elniknik02@gmail.com.

Северин Валерій Петрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна, тел.: (066) 847-83-70; e-mail: severinvp@gmail.com.

Северин Валерий Петрович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий; г. Харьков, Украина, тел.: (066) 847-83-70; e-mail: severinvp@gmail.com.

Severin Valeriy Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Systems Analysis and Information and Analytical Technologies of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; tel.: (066) 847-83-70; e-mail: severinvp@gmail.com.

Лукінова Дарина Андріївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірантка; тел.: (050) 288-11-99; e-mail: dasha.lutenko@gmail.com.

Лукинова Дарина Андреевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирантка; тел.: (050) 288-11-99 e-mail: dasha.lutenko@gmail.com.

Lukinova Daryna Andriivna – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate student; tel.: (050) 288-11-99; e-mail: dasha.lutenko@gmail.com.

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

УДК 681.513.5:622.279

В. Б. ВОЛОВЕЦЬКИЙ, С. В. ВАСИЛЕНКО, О. Ю. ВИТЯЗЬ,
В. С. БОРИН, О. М. ЩИРБА, А. В. ГНІТКО

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ПЕРІОДИЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГАЗОВИХ ТА ГАЗОКОНДЕНСАТНИХ СВЕРДЛОВИН

В статті розглянуто періодичну експлуатацію газових та газоконденсатних свердловин на завершальній стадії розробки родовищ. Експлуатація таких свердловин характеризується ускладненнями при видобуванні вуглеводнів. Запропоновано шляхи автоматизації періодичної експлуатації свердловин за рахунок встановлення на вхідному газопроводі установки підготовки газу системи регулювання. За допомогою системи регулювання при зростанні або зниженні тиску на вході установки підготовки газу відповідно здійснюється пуск в експлуатацію свердловин або їх зупинка. Впровадження даного заходу дозволить контролювати умови експлуатації свердловин.
Ключові слова: свердловина, газ, шлейф, періодична експлуатація, технологічний режим, автоматизоване управління.

В статье рассмотрено периодическую эксплуатацию газовых и газоконденсатных скважин на завершающей стадии разработки месторождений. Эксплуатация таких скважин характеризуется осложнениями при добыче углеводородов. Предложены пути автоматизации периодической эксплуатации скважин за счет установления на входном газопроводе установки подготовки газа системы регулирования. С помощью системы регулирования при росте или снижении давления на входе установки подготовки газа соответственно осуществляется пуск в эксплуатацию скважин или их остановка. Внедрение данного мероприятия позволит контролировать условия эксплуатации скважин.
Ключевые слова: скважина, газ, шлейф, периодическая эксплуатация, технологический режим, автоматизированное управление.

The article describes the periodic operation of gas and gas-condensate wells at the final stage of field development. The operation of such wells is characterized by complications in the process of hydrocarbons production. The authors have proposed the ways to automate the periodic operation of wells by means of installing the control system at the inlet gas line of gas treatment unit. In case of pressure rise or drop at the inlet of gas treatment unit the control system regulates bringing wells into production or their shutdown. The introduction of the proposed method will help to control the well production conditions.
Keywords: well, gas, line, periodic operation, technological mode, automated control.

Вступ. У минулі роки для потреб України використовувся природний газ власного видобутку, а також імпортований з Європейських країн та Російської Федерації. Проте у 2016-му році надходження імпортованого природного газу в Україну здійснювалось виключно з європейського газового ринку. Технічно це стало можливим завдяки значному збільшенню потужності реверсних потоків. Для забезпечення енергетичної незалежності розробляється та впроваджується чимало заходів, які спрямовані на збільшення власного видобутку природного газу і відповідно зменшення використання та імпорту. Крім цього, вирішується комплексно зменшення використання природного газу шляхом застосування альтернативних джерел енергії, впровадження енергозберігаючих технологій та багато інших.

Так, за останні три роки з 2014-го по 2016-й рік спостерігається позитивна динаміка щодо зменшення використання природного газу в Україні. Наприклад, за 2014-й рік знизились обсяги використання природного газу на 7,8 млрд. м^3 (до 42,6 млрд. м^3) або 16 % порівняно з 2013-м роком (50,4 млрд.м^3). У 2015-му році знизились обсяги використання природного газу на 8,8 млрд. м^3 (до 33,8 млрд. м^3) або 21 % порівняно з 2014-м роком. У 2016-му році знизились обсяги використання природного газу на 0,6 млрд. м^3 (до 33,2 млрд. м^3) або на 2 % порівняно з 2015-м роком [1].

Варто відмітити, що за останні три роки з 2014-го по 2016-й рік спостерігається позитивна динаміка зменшення обсягу імпорту природного газу в Україну. За 2014-й рік у порівнянні з 2013-м роком, імпорт природного газу зменшився на 30 % з 27,9 млрд. м^3 до 19,5 млрд. м^3. За 2015-й рік у порівнянні з 2014-м роком, імпорт природного газу зменшився на 16% до 16,4 млрд. м^3. За 2016-й рік у порівнянні з 2015-м роком, імпорт природного газу зменшився на 32 % до 11,1 млрд. м^3 [1].

Обсяг власного видобутку природного газу за останні три роки з 2014-го по 2016-й рік дещо знизився. У 2014-му році видобуток природного газу знизився на 1,0 млрд. м^3 (до 20,5 млрд. м^3) або на 4,7 % порівняно з 2013-м роком (21,5-млрд. м^3). У 2015-му році видобуток природного газу знизився на 0,6 млрд. м^3 (до 19,9 млрд. м^3) або на 3 % порівняно з 2014-м роком. У 2016-му році видобуток природного газу збільшився на 0,2 млрд. м^3 (до 20,1 млрд. м^3) або на 1 % порівняно з 2015-м роком [1].

Проте, Україна на сьогоднішній день використовує значний об'єм природного газу. Тому необхідно працювати над зменшенням використання природного газу, а також збільшенням власного видобутку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією із актуальних проблем забезпечення енергетичної незалежності нашої держави залишається збільшення власного видобутку вуглеводнів. Основною компанією з видобування природного газу в Україні є ПАТ «Укргазвидобування». Так, до складу компанії входить десять філій. Три з них – це газопромислові управління, зокрема ГПУ «Шебелинкагазвидобування», ГПУ «Полтавагазвидобування», ГПУ «Львівгазвидобування», які забезпечують понад 70% видобутку природного газу в Україні. Враховуючи це, наведемо видобуток природного газу компанією ПАТ «Укргазвидобування» за останні п'ять років з 2012-го по 2016-й рік. У 2012-му році підприємствами компанії видобуто природного газу 15,0 млрд. м^3, у 2013-му році 15,1 млрд. м^3, у 2014-му році 15,1 млрд. м^3, у 2015-му році 14,5 млрд. м^3, у 2016-му році 14,6 млрд. м^3 [1–4].

© В. Б. Воловецький, С. В. Василенко, О. Ю. Витязь, В. С. Борин, О. М. Щирба, А. В. Гнітко, 2017

Слід відмітити, що не зважаючи на те, що більшість родовищ ПАТ «Укргазвидобування» виснажені і знаходяться на завершальній стадії розробки, вдається утримувати значний обсяг видобутку природного газу. У зв'язку з цим актуальною залишається задача забезпечення максимальних відборів вуглеводнів з родовищ задля зменшення імпорту природного газу.

Для забезпечення стабільного видобування газу, нафти та конденсату газопромисловими управліннями ПАТ «Укргазвидобування» створюються та реалізуються багато різних заходів. Крім цього, розробляються різні програми перспективного розвитку на наступні роки. Сьогодні перед ПАТ «Укргазвидобування» постало завдання не просто утримувати рівень видобутку вуглеводнів, а значно наростити його обсяги. Для цього фахівцями компанії створена програма «20/20», яка передбачає видобуток 20 млрд. $м^3$ природного газу в 2020-му році.

Необхідно зазначити, що особливим періодом розробки родовища є його завершальна стадія, яка потребує впровадження нових технологій видобутку і значних капіталовкладень. На завершальній стадії розробки родовищ виникають різні ускладнення, у зв'язку з чим фонд свердловин експлуатується періодично, що негативно впливає на обсяги видобування вуглеводнів. Тому в процесі розробки родовищ необхідно детально аналізувати параметри експлуатації свердловин з метою попередження можливих ускладнень [5, 6].

Для прикладу, на свердловинах родовищ Юліївського цеху з видобування нафти, газу та конденсату (ЮЦВНГК) було розроблено ряд заходів, спрямованих на стабілізацію видобування вугле-воднів, що дозволяло отримувати позитивний результат [7–9].

Зважаючи на те, що збільшується кількість виснажених родовищ і свердловини експлуатуються з періодичним відбором газу, важливим завданням є визначення альтернативних шляхів оптимізації періодичної експлуатації.

У [10] розглянуто оптимізацію періодичної експлуатації свердловин за рахунок автоматизованої зупинки і пуску шляхом монтажу системи регулювання. За допомогою системи регулювання, встановленої на вхідному газопроводі установки підготовки газу (УПГ), можна регулювати режим роботи свердловин.

Важливою проблемою на багатьох родовищах залишається періодична експлуатація двох, трьох газових або газоконденсатних свердловин, підключених одним шлейфом до установки підготовки газу [11]. У зв'язку з цим запропоновано встановити на усті комплекс регулювання роботи свердловин (КРРС) для забезпечення надійної експлуатації свердловин. За допомогою КРРС можна забезпечити регулювання режиму роботи, як однієї свердловини, так і декількох індивідуально, що підключені до одного шлейфу.

У [12] розглянуто чотири варіанти КРРС з аналоговою та дискретною системою управління, що дозволить регулювати режим роботи свердловини індивідуально.

Таким чином, можна забезпечувати ефективну періодичну експлуатацію газових та газоконденсатних свердловин за допомогою автоматизованих систем.

Формулювання цілей статті. Завдання цієї роботи полягає у виборі раціонального режиму експлуатації свердловин в умовах періодичного відбору газу за рахунок автоматизованого управління.

Виклад основного матеріалу досліджень. Газоконденсатні та газові свердловини експлуатуються згідно технологічного режиму на установку підготовки газу. Технологічний режим передбачає експлуатацію свердловин при встановлених оптимальних умовах. Під час експлуатації свердловини можуть виникати ускладнення, що пов'язані з відкладанням гідратів в колоні НКТ, по шлейфу, а також накопичення рідини на вибої та понижених ділянках шлейфу тощо. Вказані ускладнення призводять до зміни тисків трубного та затрубного простору (Ртр, Рзатр), тиску на вході Рвх в УПГ, а також зниження дебіту газу Qг не відповідає технологічному режиму. У зв'язку з цим персонал УПГ слідкує за дотриманням режиму експлуатації кожної свердловини. Контроль за параметрами експлуатації свердловин здійснюється за допомогою технічних манометрів та приладів обліку вуглеводнів.

При експлуатації свердловин на завершальній стадії розробки родовищ у зв'язку із низьким пластовим тиском, зниженням колекторських властивостей, великим тиском газозбірного колектора та інших причин технологічним режимом передбачено періодичний відбір газу.

Ефективність періодичної експлуатації свердловин залежить від вибору оптимальних технологічних режимів, які визначають після проведення ряду досліджень. За результатами аналізу їх експлуатації визначають фактичний період роботи та зупинки [13].

На промислах геологами спільно з майстрами та технологами складається графік їх періодичної експлуатації на квартал (місяць). В даному графіку для кожної свердловини вказується періодичність пуску в експлуатацію, наприклад, один або декілька раз на добу, тиждень тощо. Відповідно згідно з графіком здійснюється експлуатація цих свердловин [14]. У зв'язку з цим персонал УПГ, безпосередньо оператори з видобування нафти і газу, контролюють тиск на вході Рвх в УПГ кожної свердловини. Так, при зростанні тиску Рвх до максимального значення здійснюється пуск в експлуатацію свердловини і відповідно при зниженні тиску Рвх до мінімального значення – її зупинка.

На точність зняття даних впливає людський фактор, що може призвести до порушення технологічного режиму. Отже, різні суб'єктивні та об'єктивні причини можуть спонукати до передчасного пуску в експлуатацію або зупинки, що впливає на об'єм видобутого газу.

Виходячи з вище наведеного, необхідно зазначити, що важко здійснювати контроль за роботою свердловин, що експлуатуються періодично, та забезпечити необхідний видобуток газу. Тому доцільно розглянути варіанти підвищення ефективної експлуатації за рахунок автоматизованої зупинки і пуску свердловин.

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

Крім цього, доцільно розглянути можливість встановлення контрольно-вимірювальних приладів для дистанційного контролю параметрів роботи свердловин, а саме, встановити, як на усті, так і на вхідних нитках датчики тиску та температури [14].

Враховуючи вище викладене, актуальним в теперішній час є різні альтернативні варіанти автоматизованого пуску та зупинки свердловин періодичної експлуатації, що дозволить виключити ручне керування, яке здійснюється працівником УПГ і не завжди об'єктивно.

Розглянемо нижче три варіанти автоматизованої зупинки і пуску свердловин шляхом встановлення системи регулювання режиму експлуатації. Так, на прикладі схеми обв'язки вхідного газопроводу на УКПГ-2 Юліївського НГКР запропоновано різні варіанти автоматизованого управління свердловиною.

У зв'язку з цим запропоновано на вхідному газопроводі на УКПГ-2 виконати встановлення системи регулювання режиму експлуатації свердловин (рис. 1) з використанням різного обладнання, одну з яких можна вибрати як оптимальну.

Схема 1. За даним варіантом розроблено систему регулювання, яка включає: клапан запірний голчастий DN 15 PN 16 ПАТ «Конотопський арматурний завод» (поз. 1), датчик тиску ОВЕН ПД 100-115-EXD мікропроцесорний (напруга живлення 12–36 В, вихідний сигнал 4–20 мА) компанії «ОВЕН» (поз. 2), ПІД-регулятор мікропроцесорний ОВЕН ТРМ 210 з інтерфейсом RS-485 (змінний струм, напруга живлення 90–245 В, вихідний сигнал 4–20 мА) компанії «ОВЕН» (поз. 3), клапан регулюючий – пневматичний односідельний виконавчий пристрій ПОУ-7 (умовний діаметр Ду 15 мм, номінальний тиск до Ру 6,4 МПа) ПАТ «Конотопський арматурний завод» з позиціонером електропневматичним ПЕП-3 (вхідним сигналом 4–20 мА) ПАТ «НВП Теплоавтомат» (поз. 4), блок живлення ОВЕН БП04Б-Д2-24 (напруга живлення 90–264 В, вихідна напруга 24 В) компанії «ОВЕН» (поз. 5), зворотний клапан в комплекті (поз. 6).

Завдяки встановленню системи регулювання за схемою 1 при зростанні або зниженні вхідного тиску на УПГ відповідно здійснюється пуск в експлуатацію свердловини або її зупинка – шляхом відкривання або закривання клапана регулюючого – ПОУ-7. Діапазон зміни тиску контролюється за допомогою мікропроцесорного датчика тиску ОВЕН ПД 100-115-EXD, вихідний сигнал (4–20 мА) з якого подається на ПІД-регулятор мікропроцесорний ОВЕН ТРМ 210. Потім вихідний керуючий сигнал з ПІД-регулятора мікропроцесорного ОВЕН ТРМ 210 подається на позиціонер електропневматичний ПЕП-3, що забезпечує керування пневмоприводом ПОУ-7, який плавно відкривається або закривається.

ПІД-регулятор ОВЕН ТРМ 210 та блок живлення ОВЕН БП04Б-Д2-24 необхідно розмістити у операторну для захисту від впливу навколишнього середовища.

Схема 2. За даним варіантом розроблено систему регулювання, яка включає: клапан запірний сильфонний КС 1 DN 15 ПрАТ «Манометр-Харків» (поз. 1), датчик тиску «Сафір М» мікропроцесорний (напруга живлення 15–42 В, вихідний сигнал 4–20 мА) ПрАТ «Манометр-Харків» (поз. 2), регулятор мікропроцесорний МИК-111Н (напруга живлення 18–36 В, вихідний сигнал 4–20 мА, інтерфейс RS-485) ТОВ «Мікрол» (поз. 3), клапан регулюючий Fisher D4 з електричним приводом easy-Drive (напруга живлення 24 В, сигнал управління 4–20 мА, номінальний тиск до 29,3 МПа) компанії "Emerson Electric Co" (поз. 4), блок живлення «Сафір» БП2-24 (напруга живлення 100–250 В, вихідна напруга 24 В) ПрАТ «Манометр-Харків» (поз. 5), зворотний клапан в комплекті (поз. 6).

Завдяки встановленню системи регулювання за схемою 2 при зростанні або зниженні вхідного тиску на УПГ відповідно здійснюється пуск в експлуатацію свердловини або її зупинка – шляхом відкривання або закривання клапана регулюючого Fisher D4. Діапазон зміни тиску контролюється за допомогою мікропроцесорного датчика тиску «Сафір-М», вихідний сигнал (4–20 мА) з якого подається на регулятор мікропроцесорний МИК-111Н. Потім вихідний керуючий сигнал з регулятора мікропроцесорного МИК-111Н подається на електричний привід easy-Drive клапана регулюючого Fisher D4, який плавно відкривається або закривається.

Регулятор мікропроцесорний МИК-111Н та блок живлення «Сафір» БП2-24 необхідно розмістити у операторну для захисту від впливу навколишнього середовища.

Система регулювання за схемами 1 або 2 є лінійною. Так, за допомогою ПІД-регулятора ОВЕН ТРМ 210 або регулятора мікропроцесорного МИК-111Н забезпечується автоматичне підтримання заданого на регуляторі параметру тиску на вході Рвх в УПГ.

Схема 3. За даним варіантом розроблено систему регулювання, яка включає: вентиль 5VSP компанії BULK srl (поз. 1), манометр електроконтактний вибухозахищений ДМ2005фСг1Ех (клас точності 1,0) АО «ПО Физтех» (поз. 2), програмувальне реле ОВЕН ПР 200-24.1.1 з інтерфейсом RS-485 (напруга живлення 24 В) компанії «ОВЕН» (поз. 3), клапан електромагнітний КРТ 025.040.12 (Ду 25 мм, Ру 4,0 МПа, напруга живлення 24 В) компанії АО «ГСА-груп» (поз. 4), блок живлення «Сафір» БП2-24 (напруга живлення 100–250 В, вихідна напруга 24 В) ПрАТ «Манометр-Харків» (поз. 5), зворотний клапан в комплекті (поз. 6).

Програмувальне реле ОВЕН ПР 200-24.1.1 та блок живлення «Сафір» БП2-24 необхідно розмістити у операторну для захисту від впливу навколишнього середовища. Завдяки встановленню системи регулювання за схемою 3 при зростанні або зниженні вхідного тиску на УПГ відповідно здійснюється пуск в експлуатацію свердловини або її зупинка – шляхом відкривання або закривання клапана електромагнітного КРТ 025.040.12. Діапазон зміни тиску контролюється за допомогою манометра електроконтактного вибухозахищеного ДМ2005фСг1Ех, контактна система якого через програмувальне реле ОВЕН ПР 200-24.1.1 приймає участь в схемі керування клапана електромагнітного КРТ 025.040.12, який відкривається або закривається.

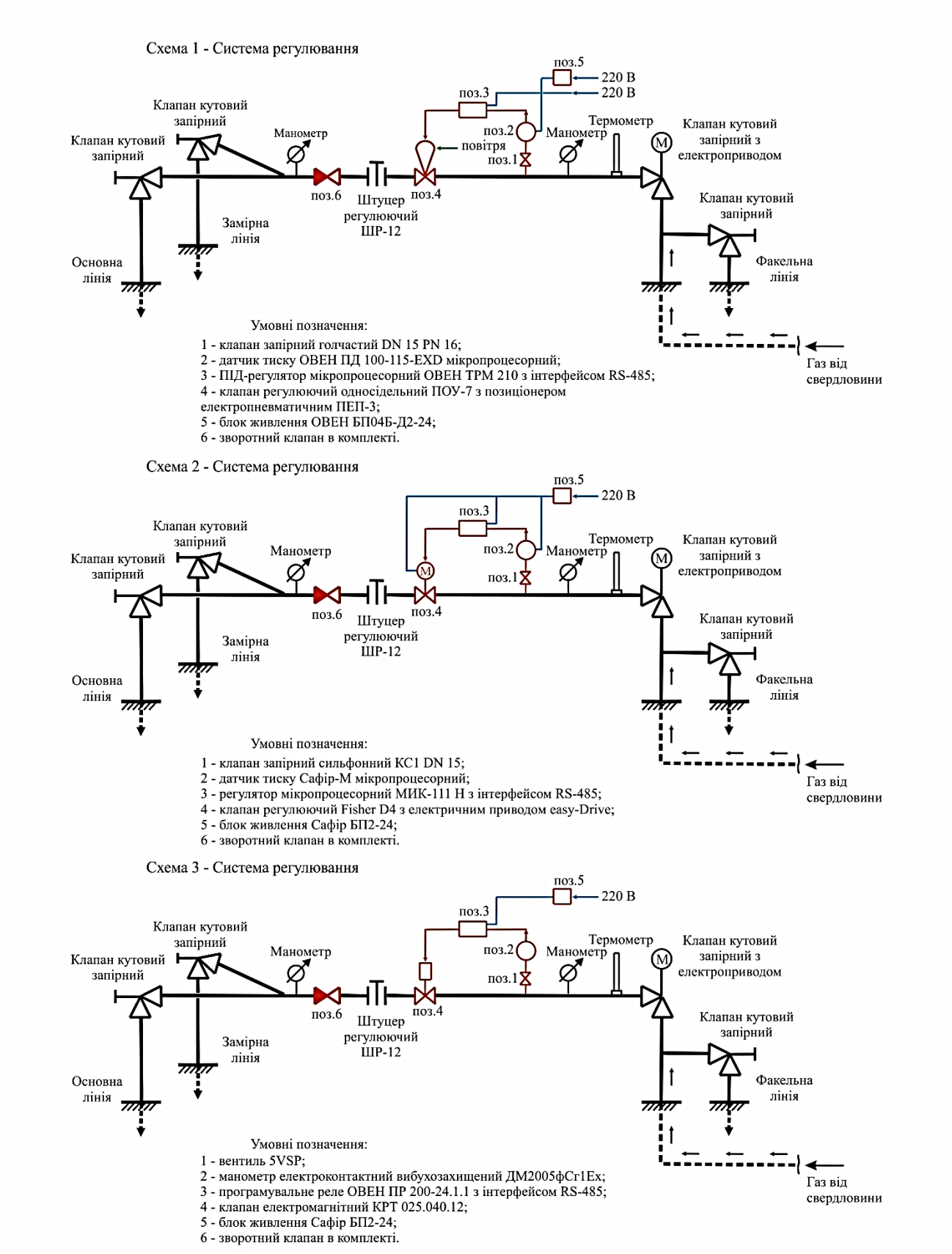


Рис. 1 – Схема обв'язки системи регулювання на вхідному газопроводі на УКПГ-2

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

Система регулювання за схемою 3 є нелінійною. Так, на манометрі електроконтактному ДМ2005фСг1Ех стрілками виставляють два положення Pmax та Pmin, тобто максимальний та мінімальний тиски, в межах яких буде працювати клапан електромагнітний. При зростанні тиску на вході Рвх УПГ до максимального Pmax клапан відкривається, при зниженні тиску на вході Рвх УПГ до Pmin клапан закривається. Pmax та Pmin можна змінювати на манометрі ДМ2005фСг1Ех.

Систему регулювання за схемою 3 можна виконати із живленням 220 В. Для цього слід (поз. 3, поз. 4) вибрати з іншими характеристиками на 220 В.

За наведеними схемами 1, 2, 3 забезпечується можливість регулювання роботи свердловин до певних необхідних параметрів. Враховуючи різну пропускну здатність клапана регулюючого, його можна підібрати з іншими технічними параметрами.

Крім цього, у схемах 1, 2, 3 можна (поз. 3) підключити до персонального комп'ютера і за допомогою спеціального програмного забезпечення та додаткового обладнання слідкувати за роботою клапана регулюючого на моніторі в реальному часі (on line) та проглядати архівні дані.

Необхідно відмітити, що при встановлені системи регулювання на вхідному газопроводу УКПГ-2 для експлуатації свердловин штуцер регулюючий ШР-12 слід відкрити повністю або зняти та встановити котушку.

Встановлення зворотного клапана на вхідному газопроводі УКПГ-2 виключить необхідність ручного керування, відкривання та закривання запірної арматури працівником для пуску та зупинки свердловини.

Впровадження будь-якого із розглянутих варіантів автоматизованого пуску та зупинки свердловин періодичної експлуатації дозволить вдосконалити технологію видобутку вуглеводнів.

Технологія автоматизації процесу видобування природного газу перебуває в початковій стадії і тому постає завдання постійної еволюції технологічної бази. Важливим напрямком такої еволюції є розроблення систем керування процесом видобування природного газу на базі методів нечіткої логіки – Fuzzy Logic Toolbox з розробкою правил-продукції Мамдані. Одна з головних переваг цих методів полягає у тому, що регулятор на основі нечіткої логіки можна створити за лінгвістичними правилами. Керування в цьому випадку здійснюється за допомогою набору умовних лінгвістичних операторів або правил (нечітких асоціативних матричних правил), які задають конкретні ситуації керування. Такі умовні лінгвістичні правила можна сформулювати, виходячи з досвіду та інтуїції експертів, з міркувань здорового глузду або технологічних даних про процес, які отримані шляхом експерименту. Регулятори на базі нечіткої логіки можуть працювати з неповністю описаними системами з невідомою динамікою, для них потрібна апріорна математична модель об'єкта керування. Ще одна перевага регулятора на основі нечіткої логіки полягає в тому, що його легко реалізувати на цифрових спеціалізованих великих інтегральних схемах. Видобування природного газу є досить складним і непередбачуваним процесом, особливо на завершальній стадії розробки родовищ. Прогнозування всіх можливих випадків і включення їх в автоматичну систему управління, яка буде базуватися на нечіткому регуляторі, може підвищити ефективність видобутку газу із свердловин і зменшити матеріальні затрати.

Висновки.

1. Для підвищення ефективності періодичної експлуатації газових та газоконденсатних свердловин необхідно впроваджувати технології автоматизованого видобування. У зв'язку з цим на вхідних газопроводах установки підготовки газу слід встановити систему регулювання для періодичної експлуатації свердловин.

2. Запропоновано встановити датчики тиску і температури на усті свердловин та на вхідних газопроводах установки підготовки газу, що дозволить здійснювати дистанційний контроль за параметрами роботи свердловин.

3. За рахунок автоматизованого пуску та зупинки свердловин можна підібрати раціональний технологічний режим їх експлуатації, що дозволить збільшити відбір газу.

4. В подальшому доцільним буде створення нечіткої математичної моделі для трьох варіантів автоматизованого відбору газу та на основі аналізу якісних показників вибрати режим експлуатації свердловин.

Список літератури

1. Сайт компанії НАК «Нафтогаз України». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.naftogaz.com. – Дата звернення : 07 листопада 2017.
2. Сайт компанії ПАТ «Укргазвидобування» [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://ugv.com.ua. – Дата звернення : 07 листопада 2017.
3. Сайт компанії ПАТ «Укртрансгаз». Офіційний сайт [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://utg.ua. – Дата звернення : 07 листопада 2017.
4. Сайт компанії «Енергосинтез» [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://energosintez.com.ua. – Дата звернення : 07 листопада 2017.
5. *Бойко В. С.* Довідник з нафтогазової справи [Текст] / *В.С. Бойко, Р. М. Кондрат, Р. С. Яремійчук* // Івано-Франків. нац. техн.ун-т нафти і газу. – Львів. 1996. – 620 с. – ISBN 5-335-01293-5.
6. *Воловецький В. Б.* Підвищення ефективності експлуатації газоконденсатних свердловин в ускладнених умовах / *В. Б. Воловецький, В. І. Коцаба, А. В. Дьомін, А. В. Гнітко, С. В. Василенко, О. М. Щирба* // Питання розвитку газової промисловості України. – Харків: УкрНДІгаз. – 2015. – Вип. XLIII. – С. 106–114.
7. *Воловецький В. Б.* Оптимізація роботи свердловин Наріжнянського та Юліївського НГКР / *В. Б. Воловецький, О. М. Щирба, В. В. Величко, О. Ю. Витязь, Я. В. Дорошенко* // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2013. – Вип. 4 (49). – С. 127–136.
8. *Воловецький В. Б.* Розроблення комплексних заходів, спрямованих на підвищення ефективності видобування вуглеводнів при розробці родовищ на виснаження / *В. Б. Воловецький, О. М. Щирба, О. Ю. Витязь* // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2014. – Вип. 3 (52). – С. 154–165.
9. *Воловецький В. Б.* Аналіз ускладнень при експлуатації газових і газоконденсатних свердловин та шляхи боротьби з ними / *В. Б. Воловецький, О. Ю. Витязь, В. І. Коцаба, О. М. Щирба, О. М. Витвицька* // Науковий вісник Івано-Франківського

національного технічного університету нафти і газу. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2015. – Вип. 2 (39). – С. 78–88.
10. *Воловецький В.Б.* Збільшення обсягів відбору газу в умовах періодичної експлуатації газоконденсатних свердловин / *В.Б. Воловецький, О.М. Щирба, О.Ю. Витязь, Я.В. Дорошенко* // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2013. – Вип. 2 (35). – С. 111–120.
11. *Воловецький В. Б.* Способи регулювання роботи газоконденсатних свердловин в умовах періодичної експлуатації / *В. Б. Воловецький, В. І. Коцаба, А. В. Дьомін, О. М. Щирба, А. В. Гнітко, С. В. Василенко* // Питання розвитку газової промисловості України. – Харків: УкрНДІгаз. – 2016. – Вип. XLIV. – С. 131–136.
12. *Воловецький В. Б.* Особливості експлуатації газових та газоконденсатних свердловин на завершальній стадії розробки родовищ / *В. Б. Воловецький, В. І. Коцаба, О. Ю. Витязь, О. М. Щирба, А. В. Дьомін, А. В. Гнітко, С. В. Василенко* // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2016. – Вип. 2 (41). – С. 39–51.
13. *Воловецький В. Б.* Комплексний підхід до збільшення видобутку вуглеводнів та вдосконалення систем підготовки та збору нафти і газу на Юліївському НГКР: Доповідь на IV конференції молодих спеціалістів ДК "Укргазвидобування", м. Полтава. – 2005 р.
14. *Воловецький В. Б.* Оптимізація роботи нафтових і газоконденсатних свердловин на Юліївському НГКР: Доповідь на VI конференції молодих спеціалістів ДК "Укргазвидобування", смт. Чорноморськ. – 2009 р.

References (transliterated)

1. Sayt kompanii NAK "Naftohaz Ukrainy" [Web-site of NJSC "Naftogaz of Ukraine"]. Available at: http://www.naftogaz.com (accessed 30.03.2014)
2. Sayt kompanii PAT "Ukrhazvydobuvannia" [Web-site of PJSC "UkrGasVydobuvannia"]. Available at: http://ugv.com.ua (accessed 30.03.2014)
3. Sayt kompanii PAT "Ukrtranshaz" [Web-site of PJSC "Ukrtransgaz"]. Available at: http://utg.ua (accessed 30.03.2014)
4. Sayt kompanii "Enerhosyntez" [Web-site of LLC "Energosyntez"]. – Available at: http://energosintez.com.ua (accessed 30.03.2014)
5. Boyko V. S., Kondrat R. M., Yaremiychuk R. S. *Dovidnyk z naftohazovoi spravy* [Petroleum Engineering Handbook]. Ivano-Frankiv. nats. tekhn.un-t nafty i hazu. – Lviv, 1996. 620 p.
6. Volovetskyi V. B., Kotsaba V. I., Diomin A. V., Hnitko A. V., Vasylenko S.V., Shchyrba O.M. Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii hazokondensatnykh sverdlovyn v uskladnenykh umovakh [Improving the operating efficiency of gas condensate wells in abnormal operating conditions]. *Pytannia rozvytku hazovoi promyslovosti Ukrainy* [Issues of gas industry development in Ukraine]. Kharkiv, UkrNDIhaz, 2015, no. XLIII, pp. 106–114.
7. Volovetskyi V. B., Shchyrba O. M., Velychko V. V., Vytiaz O. Yu., Doroshenko Ya. V. Optymizatsiia roboty sverdlovyn Narizhnianskoho ta Yuliivskoho NHKR [Optimization of well performance of the Narizhnianskyi and Yuliivskyi OGCF]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch* [Prospecting and development of oil and gas fields]. Ivano-Frankivsk, IFNTUNH, 2013, no. 4 (49), pp. 127–136.
8 Volovetskyi V. B., Shchyrba O. M., Vytiaz O. Yu. Rozroblennia kompleksnykh zakhodiv, spriamovanykh na pidvyshchennia efektyvnosti vydobuvannia vuhlevodniv pry rozrobtsi rodovyshch na vysnazhennia [Development of complex measures to increase the efficiency of the hydrocarbons production in the process of field development by natural pressure depletion]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch* [Prospecting and development of oil and gas fields]. Ivano-Frankivsk, IFNTUNH, 2014, no. 3 (52), pp. 154–165.
9. Volovetskyi V. B., Vytiaz O. Yu., Kotsaba V. I., Shchyrba O. M., Vytvytska O. M. Analiz uskladnen pry ekspluatatsii hazovykh i hazokondensatnykh sverdlovyn ta shliakhy borotby z nymy [Analysis of complications in the process of gas and gas condensate well operation and ways to prevent them]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu* [Scientific bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas]. Ivano-Frankivsk, IFNTUNH, 2015, no. 2 (39), pp. 78–88.
10. Volovetskyi V. B., Shchyrba O. M., Vytiaz O. Yu., Doroshenko Ya. V. Zbilshennia obsiahiv vidboru hazu v umovakh periodychnoi ekspluatatsii hazokondensatnykh sverdlovyn [Increasing gas production rates under the conditions of periodic operation of gas-condensate wells]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu* [Scientific bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas]. Ivano-Frankivsk, IFNTUNH, 2013, no. 2 (35), pp. 111–120.
11. Volovetskyi V. B., Kotsaba V. I., Diomin A. V., Shchyrba O. M., Hnitko A. V., Vasylenko S. V. Sposoby rehuliuvannia roboty hazokondensatnykh sverdlovyn v umovakh periodychnoi ekspluatatsii [Operation control methods of gas-condensate wells under the conditions of periodic operation]. *Pytannia rozvytku hazovoi promyslovosti Ukrainy* [Issues of gas industry development in Ukraine]. Kharkiv, UkrNDIhaz, 2016, no. XLIV, pp. 131–136
12. Volovetskyi V. B., Kotsaba V. I., Vytiaz O. Yu., Shchyrba O. M., Diomin A. V., Hnitko A. V., Vasylenko S. V. Osoblyvosti ekspluatatsii hazovykh ta hazokondensatnykh sverdlovyn na zavershalnii stadii rozrobky rodovyshch [Operation of gas and gas-condensate wells at the final stage of field development]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu* [Scientific bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas]. Ivano-Frankivsk, IFNTUNG, 2016, no. 2 (41), pp. 39–51.
13. Volovetskyi V. B. Kompleksnyi pidkhid do zbilshennia vydobutku vuhlevodniv ta vdoskonalennia system pidhotovky ta zboru nafty i hazu na Yuliivskomu NHKR [Complex approach to increasing the production of hydrocarbons and improving oil and gas purification and gathering systems in Yuliivskyi OGCF]. Dopovid na IV konferentsii molodykh spetsialistiv DK "Ukrhazvydobuvannia" [Report at the IV conference of young specialists of PJSC "UkrGasVydobuvannia"], Poltava, 2005.
14. Volovetskyi V. B. Optymizatsiia roboty naftovykh i hazokondensatnykh sverdlovyn na Yuliivskomu NHKR [Optimization of the operation of oil and gas-condensate wells in Yuliivskyi OGCF]. Dopovid na VI konferentsii molodykh spetsialistiv DK "Ukrhazvydobuvannya" [Report at the VI conference of young specialists of PJSC "UkrGasVydobuvannia"], Chornomorsk, 2009.

Надійшла (received) 13.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вибір раціонального режиму періодичної експлуатації газових та газоконденсатних свердловин / В. Б. Воловецький, С. В. Василенко, О. Ю. Витязь, В. С. Борин, О. М. Щирба, А. В. Гнітко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 14–20. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0023.

Выбор рационального режима периодической эксплуатации газовых та газоконденсатных скважин / В. Б. Воловецкий, С. В. Василенко, О. Ю. Витязь, В. С. Борын, О. Н. Щирба, А. В. Гнитко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 14–20. – Библиогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0023.

Selection of the rational periodic operation mode for gas and gas-condensate wells / V. B Volovetskyi, S.V. Vasylenko, O. Yu Vytiaz, V. S. Boryn, O. M. Shchyrba, A. V. Hnitko // Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 51 (1272). – P. 14–20. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Воловецький Володимир Богданович – старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІгаз», м. Харків; тел.: (057) 730-45-44; e-mail: vvb11@ukr.net

Воловецкий Владимир Богданович – старший научный сотрудник, Украинский научно-исследовательский институт природных газов «УкрНИИгаз», г. Харьков; тел.: (057) 730-45-44; e-mail: vvb11@ukr.net

Volovetskyi Volodymyr Bohdanovych – senior Research Worker, Ukrainian Scientific Research Institute of Natural Gases «UkrNDIgaz», Kharkiv; tel.: (057) 730-45-44; e-mail: vvb11@ukr.net

Василенко Сергій Вікторович – старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІгаз», м. Харків; тел.: (057) 730-45-44; e-mail: vasilenko.sergey@ndigas.com.ua.

Василенко Сергей Викторович – старший научный сотрудник, Украинский научно-исследовательский институт природных газов «УкрНИИгаз», г. Харьков; тел.: (057) 730-45-44; e-mail: vasilenko.sergey@ndigas.com.ua

Vasylenko Serhii Viktorovych – senior Research Worker, Ukrainian Scientific Research Institute of Natural Gases «UkrNDIgaz», Kharkiv; tel.: (057) 730-45-44; e-mail: vasilenko.sergey@ndigas.com.ua

Витязь Олег Юлійович – кандидат технічних наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу «ІФНТУНГ», м. Івано-Франківськ; тел.: (0342) 72-71-82; e-mail: o.vytyaz@gmail.com

Витязь Олег Юльевич – кандидат технических наук, доцент, Івано-Франковский национальный технический университет нефти и газа «ІФНТУНГ», г. Ивано-Франковск; тел.: (0342) 72-71-82; e-mail: o.vytyaz@gmail.com

Vytiaz Oleh Yuliiovych – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas «IFNTUOG», Ivano-Frankivsk, tel.: (0342) 72-71-82; e-mail: o.vytyaz@gmail.com

Борин Василь Степанович – кандидат технічних наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу «ІФНТУНГ», м. Івано-Франківськ; тел.: (0342) 72-71-67; e-mail: borynvs@ukr.net

Борын Василий Степанович – кандидат технических наук, доцент, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа «ІФНТУНГ», г. Ивано-Франковск; тел.: (0342) 72-71-67; e-mail: borynvs@ukr.net

Boryn Vasyl Stepanovych – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas «IFNTUOG», Ivano-Frankivsk, tel.: (0342) 72-71-67; e-mail: borynvs@ukr.net

Щирба Оксана Миколаївна – старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІгаз», м. Харків; тел.: (057) 730-46-55; e-mail: omschyrba@ukr.net

Щирба Оксана Николаевна – старший научный сотрудник, Украинский научно-исследовательский институт природных газов «УкрНИИгаз», г. Харьков; тел.: (057) 730-46-55; e-mail: omschyrba@ukr.net

Shchyrba Oksana Mykolaivna – senior Research Worker, Ukrainian Scientific Research Institute of Natural Gases «UkrNDIgaz», Kharkiv tel.: (057) 730-46-55; e-mail: omschyrba@ukr.net

Гнітко Андрій Володимирович – старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІгаз», м. Харків; тел.: (057) 730-45-45; e-mail: agnitko@ukr.net

Гнитко Андрей Владимирович – старший научный сотрудник, Украинский научно-исследовательский института природных газов «УкрНИИгаз», г. Харьков; тел.: (057) 730-45-45; e-mail: agnitko@ukr.net

Hnitko Anrii Volodymyrovych – senior Research Worker, Ukrainian Scientific Research Institute of Natural Gases «UkrNDIgaz», Kharkiv tel.: (057) 730-45-45; e-mail: agnitko@ukr.net

УДК 681.5.013

Ю. И. ДОРОФЕЕВ, А. А. НИКУЛЬЧЕНКО

ДЕСКРИПТОРНЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ГАРАНТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ В СЕТЯХ ПОСТАВОК С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ

Пропонується підхід до вирішення задачі синтезу гарантуючого управління запасами в мережах поставок з невизначеними транспортними запізненнями в умовах дії «невідомого, але обмеженого» попиту. На основі дескрипторного перетворення дискретної моделі вузла мережі поставок побудовано функціонал Ляпунова-Красовського, який залежить від максимальної величини запізнення. Доведено, що незростання значення функціоналу вздовж будь-якої траєкторії замкнутої локальної підсистеми гарантує її асимптотичну стійкість. Отримано умову існування регулятора, що реалізує локальний закон управління у вигляді лінійного зворотного зв'язку за станом. На основі методу інваріантних еліпсоїдів за допомогою техніки лінійних матричних нерівностей задачу синтезу регулятора, який мінімізує верхнє граничне значення квадратичного критерію якості, зведено до задачі напіввизначеного програмування. Розглянуто чисельний приклад.

Ключові слова: управління запасами, гарантуюче управління, метод інваріантних еліпсоїдів, функціонал Ляпунова-Красовського, лінійна матрична нерівність, задача напіввизначеного програмування.

Предлагается подход к решению задачи синтеза гарантирующего управления запасами в сетях поставок с неопределенными транспортными запаздываниями в условиях действия «неизвестного, но ограниченного» спроса. На основе дескрипторного преобразования дискретной модели узла сети поставок построен функционал Ляпунова-Красовского, зависящий от максимальной величины запаздывания. Доказано, что невозрастание значения функционала вдоль любой траектории замкнутой локальной подсистемы гарантирует ее асимптотическую устойчивость. Получено условие существования регулятора, реализующего локальный закон управления в виде линейной обратной связи по состоянию. На основе метода инвариантных эллипсоидов с помощью техники линейных матричных неравенств задача синтеза регулятора, который минимизирует верхнее граничное значение квадратичного критерия качества, сведена к задаче полуопределенного программирования. Рассмотрен численный пример.

Ключевые слова: управление запасами, гарантирующее управление, метод инвариантных эллипсоидов, функционал Ляпунова-Красовского, линейное матричное неравенство, задача полуопределенного программирования.

The approach for solving the decentralized guaranteed cost inventory control synthesis problem in supply chains with uncertain transport delays under the conditions of the "unknown but bounded" demand is proposed. The value of delays in each period is assumed to be unknown, but bounded by some maximum value. Using the descriptor transformation of the discrete model of the supply network node, the Lyapunov-Krasovskii functional that depends on the maximum value of the delay is constructed. It is proved that none increasing of this functional along any trajectory of the closed local subsystem guarantees asymptotic stability of such subsystem. The condition of existence for controller that implements a local control law in the form of linear feedback with respect to deviation between on hand and safety stock levels is obtained. The problem of the controller synthesis, which minimizes the upper boundary value of the quadratic quality criterion, is reduced to the problem of semidefinite programming on the basis of the invariant ellipsoids method using the technique of linear matrix inequalities. The vector Lyapunov functions method and the comparison method are used to analyze the stability of a decentralized inventory control system in supply chain. A numerical example is provided.

Keywords: inventory control, guaranteed cost control, invariant ellipsoids method, Lyapunov-Krasovskii functional, linear matrix inequality, semidefinite programming.

Введение. Характерной особенностью систем производства-хранения-распределения ресурсов является наличие запаздывания между моментом формирования заказа на пополнение запасов и поступлением ресурсов на склад. Запаздывания возникают вследствие затрат времени на переработку сырья и полуфабрикатов в узлах сети, на транспортировку ресурсов между узлами, наличия человеческого фактора. Поскольку наличие запаздывания по управлению является причиной потери устойчивости либо ухудшения качества работы системы, значительное внимание уделяется проблемам анализа устойчивости и синтеза регуляторов для систем с временными задержками (см. [1] и ссылки в ней).

В последнее время отмечается повышенный интерес к проблеме анализа устойчивости линейных дискретных систем с неизвестным, но ограниченным запаздыванием, для которых получен ряд условий устойчивости [2, 3]. В то время как для систем без запаздывания методы анализа устойчивости основаны на существовании строго убывающей функции энергии, названной функцией Ляпунова (ФЛ), классическая теория Ляпунова не применима напрямую к системам с запаздыванием. Это связано с тем, что влияние запаздывающих состояний может вызвать нарушение условия монотонного убывания, которому удовлетворяет стандартная ФЛ. Поэтому для анализа устойчивости систем с запаздыванием применяются обобщения методов Ляпунова. В частности, большое значение имеют работы, где рассматриваются функционалы Ляпунова-Красовского (ФЛК), обладающие аналогичными свойствами. Однако долгое время отсутствовали алгоритмы построения указанных функционалов. Только после того, как исследователи стали применять технику линейных матричных неравенств (ЛМН), а также были развиты вычислительные методы, основанные на идеях выпуклой оптимизации, удалось упростить процесс построения ФЛК, что способствовало развитию и применению данного метода.

Известно, что существование полного квадратичного ФЛК (ПКФЛК) для системы с запаздыванием является необходимым и достаточным условием ее асимптотической устойчивости [3]. Поскольку построение ПКФЛК приводит к сложным бесконечномерным ЛМН, многие авторы использовали специальные формы ФЛК, которые позволяют получить ЛМН конечной размерности. Полученные результаты основаны на достаточных условиях устойчивости, вследствие чего они приводят к «консервативным»

© Ю. И. Дорофеев, А. А. Никульченко, 2017

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

результатам. Основной причиной консерватизма является применение различных способов преобразования модели, описывающей систему с запаздыванием.

Поиск наиболее удобного преобразования привел к использованию дескрипторного представления системы [5], которое эквивалентно исходной системе и сводит к минимуму консерватизм. Если при построении моделей объектов управления вводятся дополнительные переменные состояний, которые алгебраически связаны с основными переменными, системы называют дескрипторными. Название подчеркивает, что дополнительные переменные имеют описательный смысл. Из-за наличия дополнительных алгебраических связей между переменными состояний дескрипторные модели приобретают свойства, не характерные для традиционного способа описания систем, что предоставляет разработчику дополнительные возможности.

Большинство работ, использующих дескрипторный подход, посвящены анализу и синтезу систем в непрерывном времени. Среди публикаций, в которых дескрипторное преобразование применяется для дискретных систем, следует отметить работу W. Zhang и др. [6].

На основе дескрипторного преобразования модели и построения ФЛК в статье предложен подход к синтезу системы децентрализованного управления запасами в дискретных сетях поставок с неопределенными запаздываниями в условиях неизвестного, но ограниченного внешнего спроса.

Постановка задачи. Рассмотрим дискретную модель производственной системы с задержками поставок, состоящей из n узлов, каждый из которых описывается разностным уравнением с запаздыванием

$$\boldsymbol{x}_i(k+1) = \boldsymbol{x}_i(k) + \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{u}_i(k-h_i(k)) + \boldsymbol{G}_i\boldsymbol{w}_i(k),\ i=\overline{1,n}, \quad (1)$$

где $k = 0,1,...$ – номер дискретного интервала;

$\boldsymbol{x}_i(k) \in \mathrm{R}^{n_i}$ – вектор состояний i-го узла, компоненты которого описывают уровни запасов ресурсов;

$\boldsymbol{u}_i(k) \in \mathrm{R}^{m_i}$ – вектор управляющих воздействий, компоненты которого описывают размеры заказов на поставку ресурсов;

$\boldsymbol{w}_i(k) \in \mathrm{R}^{n_i}$ – вектор внешних возмущений узла;

$\boldsymbol{B}_i \in \mathrm{R}^{n_i \times m_i}$, $\boldsymbol{G}_i \in \mathrm{R}^{n_i \times n_i}$ – матрицы влияния управлений и возмущений, соответственно;

$h_i(k)$ – целое положительное число, кратное выбранному периоду дискретизации, которое определяет величину задержки пополнения запасов и предполагается неизвестным, но удовлетворяющим неравенству $0 \le h_i(k) \le h_i^{\max}$, где $h_i^{\max}$ известно.

Составной вектор $\boldsymbol{x}(k) = \mathrm{col}\{\boldsymbol{x}_1(k), \boldsymbol{x}_2(k), ..., \boldsymbol{x}_N(k)\}$ размерности $N = \sum_{i=1}^{n} n_i$, построенный из векторов состояний отдельных узлов, является вектором состояний сети поставок.

Внешние воздействия каждого узла включают функции внешнего спроса и спроса, формируемого узлами сети, для которых данный узел является поставщиком ресурсов

$$\boldsymbol{w}_i(k) = \sum_{j=1, j\ne i}^{N} \boldsymbol{\Pi}_{ij}\,\boldsymbol{u}_j(k) + \boldsymbol{H}_i\boldsymbol{d}(k), \quad (2)$$

где $\boldsymbol{u}_j(k) \in \mathrm{R}^{m_j}$ – вектор управляющих воздействий j-го узла;

$\boldsymbol{d}(k) \in \mathrm{R}^{q}$ – вектор внешних возмущений, компоненты которого описывают размеры внешнего спроса;

$\boldsymbol{\Pi}_{ij} \in \mathrm{R}^{n_i \times m_j}$, $i, j = \overline{1,n}$ – продуктивные матрицы, которые формируются на основании описания технологического процесса, обеспечиваемого сетью поставок: значение элемента $[\boldsymbol{\Pi}_{ij}]_{pr}$ равно количеству единиц ресурса $p = \overline{1,n_i}$ узла i, необходимого для производства единицы ресурса $r = \overline{1,n_j}$ узлом j;

$\boldsymbol{H}_i \in \mathrm{R}^{n_i \times q}$ – матрица влияния внешних возмущений на вектор состояний узла i.

Блочная матрица $\boldsymbol{\Pi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Pi}_{11} & \cdots & \boldsymbol{\Pi}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{\Pi}_{n1} & \cdots & \boldsymbol{\Pi}_{nn} \end{bmatrix}$ размерности $N \times N$ полностью характеризует взаимодействие узлов, определяемое структурой сети поставок и заданным технологическим процессом.

На практике, как правило, отсутствует информация для построения адекватной модели спроса. Одним из подходов к решению задачи управления запасами в условиях неопределенности спроса является использование концепции «неизвестных, но ограниченных» воздействий, в соответствии с которой неопределенность спроса описывается с помощью набора интервалов, в пределах которых компоненты векторной функции $\boldsymbol{d}(k)$ принимают значения произвольным образом. Границы интервалов определяются на основании статистики прошлых продаж. В результате внешние возмущения удовлетворяют ограничениям

$$\boldsymbol{d}(k) \in D = \{\boldsymbol{d} \in \mathrm{R}^{q} :\ 0 \le \boldsymbol{d}^{\min} \le \boldsymbol{d} \le \boldsymbol{d}^{\max}\}, \quad (3)$$

где векторы $\boldsymbol{d}^{\min}$ и $\boldsymbol{d}^{\max}$, которые определяют граничные значения спроса, считаются известными.

Управление запасами заключается в определении моментов времени формирования заказов и размеров заказов на восполнение запасов. В работе используется модель периодической проверки, которая предполагает контроль уровня запасов и формирование заказов в каждом периоде.

Традиционным средством управления в условиях неопределенности спроса является создание страховых запасов. Размеры страховых запасов вычисляются с помощью продуктивной модели Леонтьева на основе верхних граничных значений спроса

$$\overline{\boldsymbol{x}}^{*} = (\boldsymbol{I}_N - \boldsymbol{\Pi})^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{H}_n \end{bmatrix} \boldsymbol{d}^{\max}. \quad (4)$$

Формула (4) имеет смысл, если матрица $\mathbf{\Pi}$ продуктивна, что имеет место тогда и только тогда, когда матрица, обратная матрице $(\boldsymbol{I}_N - \mathbf{\Pi})$, существует и ее элементы неотрицательны.

При построении модели сети поставок узлы нумеруются и группируются в соответствии со стадиями переработки сырья и полуфабрикатов, начиная с тех, на которые поступает внешний спрос. При этом любой узел слоя l является поставщиком ресурсов для узлов, принадлежащих слоям с номерами меньше l, либо узлов слоя l с номерами больше данного. Также предполагается, что ориентированный граф, представляющий модель сети поставок, не имеет циклов.

Утверждение 1. Достаточное условие продуктивности матрицы $\mathbf{\Pi}$ состоит в том, что она является нижней треугольной, на главной диагонали матрицы стоят нули, а значения элементов ниже главной диагонали являются неотрицательными.

Доказательство утверждения 1. Рассмотрим сеть поставок, состоящую из двух последовательно связанных узлов, размерности которых равны 1. Тогда $N = 2$, а матрица $\mathbf{\Pi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ удовлетворяет условиям утверждения. Матрица $(\boldsymbol{I}_N - \mathbf{\Pi}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ является унитреугольной, а значения элементов ниже главной диагонали являются неположительными. В результате получим $(\boldsymbol{I}_N - \mathbf{\Pi})^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, т.е. матрица $\mathbf{\Pi}$ является продуктивной.

Предположим, что при $N = n$, где n – произвольное натуральное число, значения элементов матрицы $(\boldsymbol{I}_N - \mathbf{\Pi})^{-1}$ являются неотрицательными. Докажем, что при $N = n+1$ элементы матрицы $\begin{bmatrix} (\boldsymbol{I}_N - \mathbf{\Pi}) & \mathbf{0}_{N\times 1} \\ \boldsymbol{V}_{1\times N} & 1 \end{bmatrix}^{-1}$ также являются неотрицательными,

где $\mathbf{0}_{n\times m}$ – нулевая матрица соответствующей размерности;

$\boldsymbol{V}$ – вектор-строка с неположительными элементами.

В соответствии с формулой Фробениуса для обращения невырожденной блочной матрицы получим $\begin{bmatrix} (\boldsymbol{I}_N - \mathbf{\Pi}) & \mathbf{0}_{N\times 1} \\ \boldsymbol{V}_{1\times N} & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} (\boldsymbol{I}_N - \mathbf{\Pi})^{-1} & \mathbf{0}_{N\times 1} \\ -\boldsymbol{V}(\boldsymbol{I}_N - \mathbf{\Pi})^{-1} & 1 \end{bmatrix}$. Нетрудно убедиться, что значения всех элементов полученной матрицы неотрицательны. Таким образом, согласно методу математической индукции, утверждение 1 справедливо для любого натурального числа N. Утверждение 1 доказано.

Для учета задержек в пополнении запасов размеры страховых запасов пересчитываются с учетом запаздываний

$$\boldsymbol{x}_i^* = h_i^{\max}\, \bar{\boldsymbol{x}}_i^*,\ i = \overline{1,n}. \qquad (5)$$

Предполагается, что наличные уровни запасов ресурсов доступны для непосредственного измерения. Тогда закон децентрализованного управления для узла i строится в виде обратной связи по рассогласованию между наличными и страховыми уровнями запасов ресурсов

$$\boldsymbol{u}_i(k) = \boldsymbol{K}_i(\boldsymbol{x}_i(k) - \boldsymbol{x}_i^*), \qquad (6)$$

где $\boldsymbol{K}_i \in \mathrm{R}^{m_i \times n_i}$ – матрица коэффициентов обратной связи.

Уравнение узла, замкнутого обратной связью (6), представим в виде

$$\boldsymbol{x}_i(k+1) = \boldsymbol{x}_i(k) + \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{K}_i\left(\boldsymbol{x}_i(k - h_i(k)) - \boldsymbol{x}_i^*\right) + \boldsymbol{G}_i\boldsymbol{w}_i(k). \qquad (7)$$

Локальный критерий качества в случае бесконечного временного горизонта выбран в виде

$$J_i^{\infty}(k) = \sum_{t=k}^{\infty} \beta^t \left((\boldsymbol{x}_i(t) - \boldsymbol{x}_i^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{W}_x (\boldsymbol{x}_i(t) - \boldsymbol{x}_i^*) + \boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}}(t) \boldsymbol{W}_u \boldsymbol{u}_i(t) \right), \qquad (8)$$

где $\boldsymbol{W}_x \in \mathrm{R}^{n_i \times n_i}$, $\boldsymbol{W}_u \in \mathrm{R}^{m_i \times m_i}$ – положительно определенные диагональные весовые матрицы;

$0 < \beta < 1$ – коэффициент дисконтирования.

Первое слагаемое в выражении (8) определяет размеры штрафов за отклонение текущих уровней запасов ресурсов от страховых, второе – стоимость производства и хранения ресурсов, наличие множителя β^t обеспечивает ограниченность критерия на бесконечном временном интервале.

Для системы (1), (2) с ограничениями (3) необходимо решить задачу синтеза управления (6), которое для любого допустимого спроса $\boldsymbol{d}(k) \in D$ $\forall k \geq 0$ и запаздывания $0 \leq h_i(k) \leq h_i^{\max}$ обеспечивает:

1) полное и своевременное удовлетворение спроса на ресурсы, то есть выполнение требования неотрицательности значений состояний

$$\boldsymbol{x}_i(k) \in X_i = \{\boldsymbol{x}_i \in \mathrm{R}^{n_i} : 0 \leq \boldsymbol{x}_i\},\ i = \overline{1,n}; \qquad (9)$$

2) робастную устойчивость замкнутой системы (7);

3) гарантированную стоимость управления, которая означает, что значение критерия качества (8) для замкнутого узла сети не превысит некоторого граничного значения J_i^*.

Дескрипторное преобразование модели. Чтобы упростить запись, в дальнейшем опустим индекс «i». Введем дополнительную переменную

$$\boldsymbol{y}(k) = \boldsymbol{x}(k+1) - \boldsymbol{x}(k) \qquad (10)$$

и выполним преобразование замкнутой модели (7)

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(k+1) \\ \mathbf{0}_{n\times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{y}(k) \\ -\boldsymbol{y}(k) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\left(\boldsymbol{x}(k - h(k)) - \boldsymbol{x}^*\right) + \boldsymbol{G}\boldsymbol{w}(k) \end{bmatrix}. \qquad (11)$$

Нетрудно убедиться, что выполняется равенство

$$\boldsymbol{x}(k-h(k)) = \boldsymbol{x}(k) - \sum_{j=k-h(k)}^{k-1} \boldsymbol{y}(j). \qquad (12)$$

Систему (11) с учетом (12) представим в виде

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(k+1) \\ \boldsymbol{0}_{n\times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(k) + \\ -\boldsymbol{y}(k) - \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{BKx}(k) - \\ + \boldsymbol{y}(k) \\ -\boldsymbol{BK}\sum_{j=k-h(k)}^{k-1} \boldsymbol{y}(j) - \boldsymbol{BKx}^* + \boldsymbol{Gw}(k) \end{bmatrix}. \qquad (13)$$

Построим составной вектор состояний дескрипторной модели $\xi(k) = \mathrm{col}\{\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{y}(k)\}$ и введем обозначения: $\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_n & \boldsymbol{0}_{n\times n} \\ \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_n & \boldsymbol{I}_n \\ \boldsymbol{BK} & -\boldsymbol{I}_n \end{bmatrix}$, $\overline{\boldsymbol{B}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{n\times n} \\ \boldsymbol{BK} \end{bmatrix}$, $\overline{\boldsymbol{G}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{n\times n} \\ \boldsymbol{G} \end{bmatrix}$.

Окончательно получим дескрипторную модель узла, замкнутого управлением (6)

$$\boldsymbol{E}\,\xi(k+1) = \boldsymbol{A}\xi(k) - \overline{\boldsymbol{B}} \sum_{j=k-h(k)}^{k-1} \boldsymbol{y}(j) + \overline{\boldsymbol{G}}\boldsymbol{w}(k). \qquad (14)$$

Таким образом, если последовательность $\boldsymbol{x}(k)$, $k = 0,1,...$ является решением системы (7), тогда $\mathrm{col}\{\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{y}(k)\}$, $k = 0,1,...$, где $\boldsymbol{y}(k)$ определяется в соответствии с (10), является решением системы (14) и наоборот.

Синтез гарантирующего управления запасами. Гарантирующими [7] называют управляющие воздействия, при которых гарантируется минимизация верхнего граничного значения показателя качества при любых допустимых возмущениях и любом варианте реализации неопределенности модели, то есть выполняется

$$J^* = \inf_{\boldsymbol{u}(k)\in U} \sup_{\boldsymbol{d}(k)\in D,\, 0\le h(k)\le h^{\max}} J^{\infty}(k).$$

Для того, чтобы функционал (8) был конечен, необходимо и достаточно, чтобы система (14) была устойчива.

Определим блочную матрицу $\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_1 & \boldsymbol{P}_2 \\ \boldsymbol{P}_2^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{P}_3 \end{bmatrix}$, где $0 \prec \boldsymbol{P}_j \in \mathrm{R}^{n\times n}$, $j = 1,2,3$, $\boldsymbol{P}_1 = \boldsymbol{P}_1^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{P}_3 = \boldsymbol{P}_3^{\mathrm{T}}$, и построим для дескрипторной системы (14) функционал Ляпунова-Красовского

$$V(k) = V'(k) + V''(k), \qquad (15)$$

$$V'(k) = \beta^k \xi^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{EPE}\,\xi(k) = \beta^k (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*), \qquad (16)$$

$$V''(k) = \beta^k \sum_{i=-h^{\max}}^{-1} \sum_{j=k+i}^{k-1} \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}(j)\boldsymbol{Z}\,\boldsymbol{y}(j),\ 0 \prec \boldsymbol{Z} = \boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}} \in \mathrm{R}^{n\times n}. \qquad (17)$$

Вычислим первую разность по k ФЛК (15-17) в силу системы (14):

$$\begin{aligned}
&\Delta V'(k) = V'(k+1) - V'(k) = \\
&= \beta^k \big[\beta\ (\boldsymbol{x}(k+1) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 (\boldsymbol{x}(k+1) - \boldsymbol{x}^*) - \\
&- (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*)\ \big] = \\
&= \beta^k \big[(\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} (\beta - 1)\boldsymbol{P}_1 (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*) + \\
&+ (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \beta \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{BK} (\boldsymbol{x}(k - h(k)) - \boldsymbol{x}^*) + \\
&+ (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \beta \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G} (\boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{d}^*) + (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \beta \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G}\boldsymbol{d}^* + \\
&+ (\boldsymbol{x}(k - h(k)) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \beta \boldsymbol{K}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*) + \\
&+ (\boldsymbol{x}(k - h(k)) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \beta \boldsymbol{K}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{BK} (\boldsymbol{x}(k - h(k)) - \boldsymbol{x}^*) + \\
&+ (\boldsymbol{x}(k - h(k)) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \beta \boldsymbol{K}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G} (\boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{d}^*) + \\
&+ (\boldsymbol{x}(k - h(k)) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \beta \boldsymbol{K}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G}\boldsymbol{d}^* + \\
&+ (\boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{d}^*)^{\mathrm{T}} \beta \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*) + \\
&+ (\boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{d}^*)^{\mathrm{T}} \beta \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{BK} (\boldsymbol{x}(k - h(k)) - \boldsymbol{x}^*) + \\
&+ (\boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{d}^*)^{\mathrm{T}} \beta \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G} (\boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{d}^*) + (\boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{d}^*)^{\mathrm{T}} \beta \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G}\boldsymbol{d}^* + \\
&+ \boldsymbol{d}^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*) + \boldsymbol{d}^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{BK} (\boldsymbol{x}(k - h(k)) - \boldsymbol{x}^*) + \\
&+ \boldsymbol{d}^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G} (\boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{d}^*) + \boldsymbol{d}^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G}\boldsymbol{d}^* \big],
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\Delta V''(k) = \beta^k \left[h^{\max} \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{Z}\boldsymbol{y}(k) - \sum_{j=k-h_m}^{k-1} \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}(j)\boldsymbol{Z}\boldsymbol{y}(j) \right] = \\
&= \beta^k \big[h^{\max} \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{Z}\boldsymbol{y}(k) + (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Z} (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*) - \\
&- (\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Z} (x(k - h^{\max}) - \boldsymbol{x}^*) + \\
&+ (\boldsymbol{x}(k - h^{\max}) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Z} (\boldsymbol{x}(k - h^{\max}) - \boldsymbol{x}^*) \big].
\end{aligned}$$

В результате получим

$$\Delta V(k) = \Delta V'(k) + \Delta V''(k) = \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{\Gamma}(h^{\max})\boldsymbol{s}(k),$$

где $\boldsymbol{s}(k) = \mathrm{col}\left\{\beta^{1/2}(\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*), \beta^{1/2}\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}(k - h(k)) - \boldsymbol{x}^*), \beta^{1/2}(\boldsymbol{x}(k - h^{\max}) - \boldsymbol{x}^*), \beta^{1/2}\boldsymbol{y}(k), \beta^{1/2}(\boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{d}^*), \beta^{1/2}\boldsymbol{d}^* \right\}$;

$$\boldsymbol{\Gamma}(h^{\max}) = \begin{bmatrix}
(\beta - 1)\boldsymbol{P}_1 + \boldsymbol{Z} & \beta \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{B} & -\boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \beta \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G} & \beta \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G} \\
* & \beta \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{B} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \beta \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G} & \beta \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G} \\
* & * & \boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} \\
* & * & * & h^{\max} \boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} \\
* & * & * & * & \beta \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G} & \beta \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G} \\
* & * & * & * & * & \beta \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{G}
\end{bmatrix};$$

символ «*» обозначает соответствующий блок в симметрической матрице неравенства.

Потребуем, чтобы значение ФЛК (15-17) с течением времени убывало с некоторой гарантированной скоростью, определяемой текущим значением критерия (8)

$$\Delta V(\boldsymbol{k}) \le -\beta^k (\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{W}_x + \boldsymbol{K}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{W}_u \boldsymbol{K})(\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}^*). \quad (18)$$

Просуммировав левые и правые части неравенства (18) по k от 0 до ∞, получим

$$J^{\infty}(k) \le (\boldsymbol{x}(0)-\boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 (\boldsymbol{x}(0)-\boldsymbol{x}^*) + + h^{\max} \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}(0) \boldsymbol{Z}\, \boldsymbol{y}(0) - \sum_{j=-h_m}^{-1} \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}(j) \boldsymbol{Z}\, \boldsymbol{y}(j), \quad (19)$$

то есть ФЛК (15-17), вычисленный в момент времени $k=0$, определяет верхнее граничное значение критерия (8). Тогда задача синтеза гарантирующего управления эквивалентна задаче

$$\boldsymbol{u}(k) = \arg \min_{\boldsymbol{u}(k)\in U} V(0). \quad (20)$$

Классический подход к решению задачи синтеза управления, минимизирующего квадратичный критерий качества, основан на решении алгебраического уравнения Риккати и гарантирует оптимальное решение для произвольных начальных условий. Этим управление, полученное в результате решения задачи (20), отличается от классического. Чтобы получить аналогичный результат применим метод инвариантных эллипсоидов [8].

Эллипсоид, описываемый уравнением

$$E(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{Q}) = \{\boldsymbol{x} \in \mathrm{R}^n : (\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q}^{-1} (\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}^*) \le 1\}, \quad (21)$$

называется инвариантным по состоянию для рассматриваемой системы, если любая траектория системы, начавшись в эллипсоиде, остается в нем для любого момента времени $k \ge 0$.

По аналогии с (21) определим семейство эллипсоидов, инвариантных по состоянию с запаздыванием

$$E_j(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{R}) = \{\boldsymbol{x} \in \mathrm{R}^n : (\boldsymbol{x}(k-j)-\boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{R}^{-1} (\boldsymbol{x}(k-j)-\boldsymbol{x}^*) \le 1\}, \quad \overline{j = 1, h^{\max}}. \quad (22)$$

Будем понимать сумму и разность эллипсоидов в смысле суммы и разности множеств по Минковскому [9]. Тогда сумма инвариантного эллипсоида (21) и семейства эллипсоидов (21) может рассматриваться в качестве аппроксимации множества достижимости дескрипторной системы (14), то есть позволяет характеризовать влияние внешних возмущений на траекторию системы.

Второе слагаемое в ФЛК (15-17) представим в виде

$$V''(k) = \beta^k \Big[h^{\max} (\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Z} (\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}^*) - - \sum_{i=-h^{\max}}^{-1} (\boldsymbol{x}(k-i)-\boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Z} (\boldsymbol{x}(k-i)-\boldsymbol{x}^*) \Big]. \quad (23)$$

Сравнение выражений (16) и (21), а также (23) и (22) позволяет утверждать, что если выполняются условия

$$\boldsymbol{P}_1 = \boldsymbol{Q}^{-1}, \quad \boldsymbol{Z} = \boldsymbol{R}^{-1} \quad (24)$$

то сумма эллипсоида (21) и семейства эллипсоидов (22) представляет множество, которое может рассматриваться в качестве верхней оценки множества уровня ФЛК (15-17).

Таким образом, задача сводится к построению регулятора, который обеспечивает минимизацию по некоторому критерию суммы инвариантных эллипсоидов при заданных ограничениях. В качестве критерия выбрана сумма квадратов полуосей эллипсоидов, то есть сумма следа матрицы $\boldsymbol{Q}$ и следа матрицы $\boldsymbol{R}$.

Результат решения задачи синтеза оптимального гарантирующего управления запасами в сетях поставок с неопределенными запаздываниями представлен в виде теоремы.

Теорема. Рассмотрим систему (1), (2) с ограничениями (3) и пусть матрицы $\hat{\boldsymbol{Q}} \in \mathrm{R}^{n\times n}$, $\hat{\boldsymbol{Y}} \in \mathrm{R}^{m\times n}$ и $\hat{\boldsymbol{R}} \in \mathrm{R}^{n\times n}$ получены в результате решения задачи

$$\mathrm{tr}\boldsymbol{Q} + \mathrm{tr}\boldsymbol{R} \to \min \quad (25)$$

при ограничении на матричные переменные $\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}} \succ 0$, $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}^{\mathrm{T}} \succ 0$, $\boldsymbol{Y}$ и скалярный параметр $\alpha > 0$

$$\begin{bmatrix}
-\boldsymbol{Q} & \beta^{1/2}\boldsymbol{Q} & \beta^{1/2}\boldsymbol{B} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \beta^{1/2}\boldsymbol{G} & \beta^{1/2}\boldsymbol{G} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times m} \\
* & -\boldsymbol{Q} & \boldsymbol{0}_{n\times m} & \boldsymbol{Q} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{Q} & \boldsymbol{Q}\boldsymbol{W}_x^{1/2} & \boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_u^{1/2} \\
* & * & \boldsymbol{0}_{m\times m} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times m} \\
* & * & * & -\boldsymbol{R} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times m} \\
* & * & * & * & -h^{\max}\boldsymbol{R} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times m} \\
* & * & * & * & * & -\alpha\boldsymbol{Q}_w^{-1} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times m} \\
* & * & * & * & * & * & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times m} \\
* & * & * & * & * & * & * & -\boldsymbol{R} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times m} \\
* & * & * & * & * & * & * & * & -\boldsymbol{I}_n & \boldsymbol{0}_{n\times m} \\
* & * & * & * & * & * & * & * & * & -\boldsymbol{I}_m
\end{bmatrix} \preceq 0, \quad (26)$$

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

где $\boldsymbol{Q}_w \in \mathrm{R}^{n\times n}$ – матрица эллипсоида наименьшего объема, который аппроксимирует множество значений внешних воздействий узла.

Если задача (25) минимизации линейной функции при ограничении, представленном в виде ЛМН (26), которая является задачей полуопределенного программирования, имеет решение $\hat{\alpha}$, $\hat{\boldsymbol{Q}}$, $\hat{\boldsymbol{R}}$, $\hat{\boldsymbol{Y}}$, то:

1) для любого начального состояния $\boldsymbol{x}(0) \ge \boldsymbol{x}^*$, любого допустимого внешнего спроса $\boldsymbol{d}(k) \in D$ $\forall k \ge 0$ и величины задержки $0 \le h(k) \le h^{\max}$ замкнутая дескрипторная система (14) является робастно устойчивой;

2) среди всех линейных управлений вида (6) регулятор с матрицей

$$\boldsymbol{K} = \hat{\boldsymbol{Y}}\,\hat{\boldsymbol{Q}}^{-1} \qquad (27)$$

доставляет минимум по критерию следа матрицы сумме инвариантного эллипсоида (21) и семейства эллипсоидов (22) в момент времени k;

3) значение локального критерия качества узла, замкнутого обратной связью с матрицей (27), удовлетворяет неравенству

$$J^{\infty}(k) \le \lambda^{\max}(\boldsymbol{Q}_x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{Q}_x) + h^{\max}\lambda^{\max}(\boldsymbol{Q}_x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{Q}_x) = J^*, \qquad (28)$$

где $\lambda^{\max}(\cdot)$ обозначает максимальное собственное число матрицы $(\cdot)$.

Доказательство Теоремы. Выполним аппроксимацию множества значений внешних воздействий для каждого узла эллипсоидом наименьшего объема, который задается уравнением

$$E(\boldsymbol{w}^*, \boldsymbol{Q}_w) = \{\boldsymbol{w} \in \mathrm{R}^n : (\boldsymbol{w}(k) - \boldsymbol{w}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_w^{-1}(\boldsymbol{w}(k) - \boldsymbol{w}^*) \le 1\}. \qquad (29)$$

Матрица эллипсоида $\boldsymbol{Q}_w \in \mathrm{R}^{n\times n}$ и вектор координат центра $\boldsymbol{w}^* \in \mathrm{R}^n$ определяются в результате решения задачи полуопределенного программирования аналогично тому, как это сделано в работе [10]. При этом верхние граничные значения воздействий равны $\boldsymbol{w}^{\max} = \bar{\boldsymbol{x}}^*$, а нижние вычисляются по формуле (4) с заменой вектора $\boldsymbol{d}^{\max}$ на вектор $\boldsymbol{d}^{\min}$.

Введем обозначения:

$$f_i(\boldsymbol{s}) = \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{s}, \quad \boldsymbol{M}_i \in \mathrm{R}^{(5n+m)\times(5n+m)}, \quad i = 0, 1,$$

$$\boldsymbol{M}_0 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega} & \beta\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{B} & -\boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \beta\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{G} & \beta\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{G} \\ * & \beta\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{B} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \beta\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{G} & \beta\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{G} \\ * & * & \boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times q} & \boldsymbol{0}_{n\times q} \\ * & * & * & h^{\max}\boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times q} & \boldsymbol{0}_{n\times q} \\ * & * & * & * & \beta\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{G} & \beta\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{G} \\ * & * & * & * & * & \beta\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{G} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\Omega} = (\beta - 1)\boldsymbol{P}_1 + \boldsymbol{Z} + \boldsymbol{W}_x + \boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_u\boldsymbol{K},$$

$$\boldsymbol{M}_1 = \mathrm{block\,diag}\{\boldsymbol{0}_{n\times n}, \boldsymbol{0}_{m\times m}, \boldsymbol{0}_{n\times n}, \boldsymbol{0}_{n\times n}, \boldsymbol{Q}_w^{-1}, \boldsymbol{0}_{n\times n}\}.$$

Тогда неравенство (18), обеспечивающее убывание ФЛК (15-17) вдоль любой траектории системы (14), замкнутой управлением (6), а также неравенство (29), описывающее эллипсоид, аппроксимирующий допустимое множество значений внешних воздействий, запишем в виде $f_0(\boldsymbol{s}) \le 0 \;\; \forall \boldsymbol{s}: \;\; f_1(\boldsymbol{s}) \le 1$.

С учетом неущербности *S*-процедуры при одном ограничении [8] достаточным условием знакоопределенности записанных квадратичных форм является выполнение для некоторого скалярного параметра $\alpha > 0$ матричного неравенства $\boldsymbol{M}_0 \preceq \alpha\boldsymbol{M}_1$, которое представим в виде

$$\begin{bmatrix} \beta^{1/2} \\ \beta^{1/2}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{0}_{1\times n} \\ \boldsymbol{0}_{1\times n} \\ \beta^{1/2}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \\ \beta^{1/2}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \boldsymbol{P}_1(k) \begin{bmatrix} \beta^{1/2} & \beta^{1/2}\boldsymbol{B} & \boldsymbol{0}_{n\times 1} & \boldsymbol{0}_{n\times 1} & \beta^{1/2}\boldsymbol{G} & \beta^{1/2}\boldsymbol{G} \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega} - \beta\boldsymbol{P}_1 & \boldsymbol{0}_{m\times m} & -\boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} \\ * & \boldsymbol{0}_{m\times m} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} \\ * & * & \boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} \\ * & * & * & h^{\max}\boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} \\ * & * & * & * & -\alpha\boldsymbol{Q}_w^{-1} & \boldsymbol{0}_{n\times n} \\ * & * & * & * & * & \boldsymbol{0}_{n\times n} \end{bmatrix} \preceq 0.$$

Используя модификацию леммы Шура для нестрогих матричных неравенств [8], последнее неравенство запишем в виде

$$\begin{bmatrix} -\boldsymbol{P}_1^{-1} & \beta^{1/2} & \beta^{1/2}\boldsymbol{B} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \beta^{1/2}\boldsymbol{G} & \beta^{1/2}\boldsymbol{G} \\ * & \boldsymbol{\Omega} - \beta\boldsymbol{P}_1 & \boldsymbol{0}_{n\times m} & -\boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} \\ * & * & \boldsymbol{0}_{m\times m} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} & \boldsymbol{0}_{m\times n} \\ * & * & * & \boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} \\ * & * & * & * & h^{\max}\boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0}_{n\times n} & \boldsymbol{0}_{n\times n} \\ * & * & * & * & * & -\alpha\boldsymbol{Q}_w^{-1} & \boldsymbol{0}_{n\times n} \\ * & * & * & * & * & * & \boldsymbol{0}_{n\times n} \end{bmatrix} \preceq 0.$$

Введем матричную переменную $\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{K}\,\boldsymbol{Q}$. Откуда в силу $\boldsymbol{Q} \succ 0$ матрица $\boldsymbol{K}$ восстанавливается единственным образом в соответствии с (27).

Вновь применив лемму Шура и использовав матричные переменные (24), а также применив к полученной матрице неравенства конгруэнтное преобразование с помощью блочно-диагональной матрицы $\mathrm{block\,diag}\{\boldsymbol{I}_n, \boldsymbol{P}_1^{-1}, \boldsymbol{I}_n, -\boldsymbol{Z}^{-1}, -\boldsymbol{Z}^{-1}, \boldsymbol{I}_n, \boldsymbol{I}_n\,\boldsymbol{I}_n, \boldsymbol{I}_n, \boldsymbol{I}_n\}$, получим ЛМН (26).

Таким образом, если задача (25) при ограничении (26) имеет допустимое решение $\hat{\alpha}$, $\hat{\boldsymbol{Q}}$, $\hat{\boldsymbol{R}}$, $\hat{\boldsymbol{Y}}$, то закон управления в виде обратной связи

$$\boldsymbol{u}(k) = \hat{\boldsymbol{Y}}\,\hat{\boldsymbol{Q}}^{-1}(\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}^*) \qquad (30)$$

обеспечивает оптимальное гарантирующее управление запасами локального узла сети поставок.

Верхнее граничное значение критерия качества в (19) зависит от начальных условий системы (1), (2). Чтобы устранить эту зависимость применим подход, предложенный в [11]. Предположим, что начальное состояние каждого узла сети произвольно, но принадлежит эллипсоиду

$$E(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{Q}_x) = \{\boldsymbol{x}(-i) \in \mathrm{R}^n : (\boldsymbol{x}(-i) - \boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q}_x^{-1} (\boldsymbol{x}(-i) - \boldsymbol{x}^*) \le 1, \quad i = 0,1,...,h^{\max}\}, \tag{31}$$

вектор координат центра которого совпадает с вектором страховых запасов $\boldsymbol{x}^*$, а матрица $\boldsymbol{Q}_x$ вычисляется из условия (9) в результате решения соответствующей задачи полуопределенного программирования. Тогда оценка (19) приводит к неравенству

$$J^{\infty}(k) \le \lambda^{\max}(\boldsymbol{Q}_x^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{Q}_x) + h^{\max} \lambda^{\max}(\boldsymbol{Q}_x^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Z} \boldsymbol{Q}_x),$$

откуда с учетом обозначений (24) следует неравенство (28) для оценки верхней границы J^* показателя качества узла, замкнутого управлением (30). Теорема доказана.

Анализ устойчивости сети поставок. После того, как для каждого узла сети найдены допустимые решения задачи (25) при ограничении (26), выполняется анализ устойчивости взаимосвязанной сети поставок. Для этого применяется метод векторных функций Ляпунова и метод сравнения.

Уравнение замкнутой дескрипторной модели узла с учетом взаимосвязей (2) примет вид

$$\boldsymbol{E}_i \xi_i(k+1) = \boldsymbol{A}_i \xi_i(k) - \tilde{\boldsymbol{B}}_i \sum_{j=k-h(k)}^{k-1} \xi_i(j) + \sum_{j=1, j\ne i}^{n} \boldsymbol{B}_{ij} \boldsymbol{u}_j(k) + \boldsymbol{F}_i \boldsymbol{d}(k), \tag{32}$$

где $\tilde{\boldsymbol{B}}_i = [\,\boldsymbol{0}_{2n_i \times n_i} \,\vdots\, \overline{\boldsymbol{B}_i}\,]$, $\boldsymbol{B}_{ij} = \overline{\boldsymbol{G}_i} \boldsymbol{\Pi}_{ij}$, $\boldsymbol{F}_i = \overline{\boldsymbol{G}_i} \boldsymbol{H}_i$, что после подстановки управления (6) дает

$$\boldsymbol{E}_i \xi_i(k+1) = \boldsymbol{A}_i \xi_i(k) - \tilde{\boldsymbol{B}}_i \sum_{j=k-h(k)}^{k-1} \xi_i(j) + \sum_{j=1, j\ne i}^{n} \boldsymbol{B}_{ij} \boldsymbol{K}_j (\boldsymbol{x}_j(k) - \boldsymbol{x}_j^*) + \boldsymbol{F}_i \boldsymbol{d}(k).$$

Выполним расширение пространства состояний дескрипторной модели узла, для чего построим составной вектор состояний $\overline{\xi_i}(k) = \mathrm{col}\{\xi_i(k), \xi_i(k-1), ..., \xi_i(k-h_i^{\max})\} \in \mathrm{R}^{\overline{N_i}}$, и введем блочные матрицы:

$$\overline{\boldsymbol{E}_i} = \mathrm{block\,diag}\{\boldsymbol{E}_i, \boldsymbol{E}_i, ..., \boldsymbol{E}_i\} \in \mathrm{R}^{\overline{N_i} \times \overline{N_i}},$$

$$\overline{\boldsymbol{A}_i} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_i & -\tilde{\boldsymbol{B}}_i & -\tilde{\boldsymbol{B}}_i & \cdots & -\tilde{\boldsymbol{B}}_i \\ \boldsymbol{0}_{2n_i \times 2n_i} & \boldsymbol{I}_{2n_i} & -\tilde{\boldsymbol{B}}_i & \cdots & -\tilde{\boldsymbol{B}}_i \\ \boldsymbol{0}_{2n_i \times 2n_i} & \boldsymbol{0}_{2n_i \times 2n_i} & \boldsymbol{I}_{2n_i} & \cdots & -\tilde{\boldsymbol{B}}_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{0}_{2n_i \times 2n_i} & \boldsymbol{0}_{2n_i \times 2n_i} & \boldsymbol{0}_{2n_i \times 2n_i} & \cdots & \boldsymbol{I}_{2n_i} \end{bmatrix} \in \mathrm{R}^{\overline{N_i} \times \overline{N_i}},$$

$$\overline{\boldsymbol{F}_{ij}} = \mathrm{block\,diag}\{\boldsymbol{B}_{ij} \boldsymbol{K}_j, \boldsymbol{0}_{2n_i \times 2n_j}, ..., \boldsymbol{0}_{2n_i \times 2n_j}\} \in \mathrm{R}^{\overline{N_i} \times \overline{N_j}},$$

$$\overline{\boldsymbol{F}_i} = \left[\boldsymbol{F}_i^{\mathrm{T}} \,\vdots\, \boldsymbol{0}_{2n_i \times q}^{\mathrm{T}} \,\vdots\, \ldots \,\vdots\, \boldsymbol{0}_{2n_i \times q}^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}} \in \mathrm{R}^{\overline{N_i} \times q},$$

где $\overline{N_i} = 2n_i(1 + h_i^{\max})$.

Расширенную дескрипторную модель узла представим в виде

$$\overline{\boldsymbol{E}_i}\,\overline{\xi_i}(k+1) = \overline{\boldsymbol{A}_i}\,\overline{\xi_i}(k) + \sum_{j=1, j\ne i}^{n} \overline{\boldsymbol{F}_{ij}}\,\overline{\xi_j}(k) + \overline{\boldsymbol{F}_i} \boldsymbol{d}(k). \tag{33}$$

Для сети поставок, состоящей из взаимосвязанных узлов, описываемых уравнением (33), построим векторную функцию Ляпунова

$$\Psi(k) = \mathrm{col}\{V_1(k), ..., V_n(k)\}, \tag{34}$$

компонентами которой являются ФЛК отдельных узлов в форме (15-17). На основе векторной функции (34) строится общая функция Ляпунова

$$V_0(k) = \sum_{i=0}^{n} p_{0i} V_i(k) = \boldsymbol{P}_0 \Psi(k), \tag{35}$$

где $\boldsymbol{P}_0 = [p_{01}, ..., p_{0n}] \in \mathrm{R}^{1 \times n}$, $p_{0i} > 0$, $i = \overline{1,n}$.

Сопоставим набору локальных подсистем линейную систему сравнения, обусловленную разностными уравнениями:

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{\upsilon}(k+1) = \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\upsilon}(k), \quad \boldsymbol{\upsilon}(0) = \Psi(0), \\ &\eta(k) = \boldsymbol{P}_0 \boldsymbol{\upsilon}(k), \end{aligned} \tag{36}$$

где $\boldsymbol{\upsilon}(k) \in \mathrm{R}^n$ – вектор состояний системы сравнения;

$\eta(k)$ – скалярная функция, которая является выходом системы сравнения;

$\boldsymbol{\Lambda} \in \mathrm{R}^{n \times n}$ – матрица динамики с неотрицательными элементами.

Квадратичные формы $V_i\left(\overline{\boldsymbol{F}_{ij}}(k)\right)$ и $V_j(k)$ определяют пучок форм $V_i\left(\overline{\boldsymbol{F}_{ij}}(k)\right) - \mu V_j(k)$, где μ – некоторый параметр. Вычисление элементов матрицы $\boldsymbol{\Lambda}$ выполняется по характеристическим уравнениям пучков квадратичных форм [12]:

$$\begin{aligned} &\det(\overline{\boldsymbol{A}_i}^{\mathrm{T}} \overline{\boldsymbol{P}_i}\,\overline{\boldsymbol{A}_i} - \mu_{ii}\,\overline{\boldsymbol{P}_i}) = 0, \quad i = \overline{1,n}, \\ &\det(\overline{\boldsymbol{F}_{ij}}^{\mathrm{T}} \overline{\boldsymbol{P}_i}\,\overline{\boldsymbol{F}_{ij}} - \mu_{ij}\,\overline{\boldsymbol{P}_j}) = 0, \quad i, j = \overline{1,n}, \quad j \ne i, \end{aligned}$$

где $[\boldsymbol{\Lambda}]_{ij} = \left(\mu_{ij}^{\max}\right)^{1/2}$, $\mu_{ij}^{\max}$ – максимальное значение корня соответствующего уравнения;

$$\overline{\boldsymbol{P}_i} = \mathrm{block\,diag}\{\boldsymbol{E}_i \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{1i} & \boldsymbol{P}_{2i} \\ \boldsymbol{P}_{2i}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{P}_{3i} \end{bmatrix} \boldsymbol{E}_i, \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{n_i} & \boldsymbol{Z}_i \\ \boldsymbol{0}_{n_i} & \boldsymbol{0}_{n_i} \end{bmatrix}, ..., \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{n_i} & \boldsymbol{Z}_i \\ \boldsymbol{0}_{n_i} & \boldsymbol{0}_{n_i} \end{bmatrix}\},$$

$\overline{\boldsymbol{P}_i} \in \mathrm{R}^{\overline{N_i} \times \overline{N_i}}$, матрицы $\boldsymbol{P}_{1i}$ блочных матриц $\boldsymbol{P}_i$ вычисляются в соответствии с (24) после решения задач (25), матрицы $\boldsymbol{P}_{2i}$ и $\boldsymbol{P}_{3i}$ выбираются произвольно, так как они не оказывают влияния на результат.

В результате для векторной (34) и общей (35) функций Ляпунова сети поставок выполняются неравенства:

$$\Psi(k) \le \boldsymbol{\upsilon}(k), \quad V_0(k) \le \eta(k).$$

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

Таким образом, система сравнения (36) покомпонентно мажорирует векторную и общую функции Ляпунова, построенные для управляемой сети поставок. В результате анализ устойчивости децентрализованной системы управления запасами в сети поставок сводится к анализу устойчивости линейной положительной системы сравнения (36). Следовательно для обеспечения устойчивости управляемой сети поставок, узлы которой замкнуты обратными связями с регуляторами, матрицы которых вычисляются на основании (27), необходимо выбирать такие значения весовых матриц локальных критериев качества (8), при которых выполняется условие

$$\sigma(\mathbf{\Lambda}) < 1, \qquad (37)$$

где $\sigma(\cdot)$ – спектральный радиус матрицы $(\cdot)$.

Численный пример. В качестве примера исследуется компания, занимающаяся продажей алкогольной продукции. Данные для моделирования предоставлены компанией CloudWorks LTD, г. Харьков (http://www.cloudwk.com/), которая разрабатывает программное обеспечение для автоматизированных систем управления запасами. Для моделирования выбраны два наиболее популярных вида продукции, продажи которых осуществляются независимо друг от друга. Структура сети поставок представлена на рис. 1.

В настоящее время узел 1 реализует два вида продукции x_{11} и x_{12}, и пополняет их запасы напрямую со склада 3. Период дискретизации равен 1 суткам. Время выполнения заказа h_{13} составляет от 2 до 6 суток. Узел 2 реализует продукцию x_2 и пополняет запасы со склада 3. Время выполнения заказа h_{23} составляет от 2 до 4 суток. Дуги d_1, d_2 и d_3, изображенные пунктиром, обозначают внешний спрос (см. рис. 1, *а*).

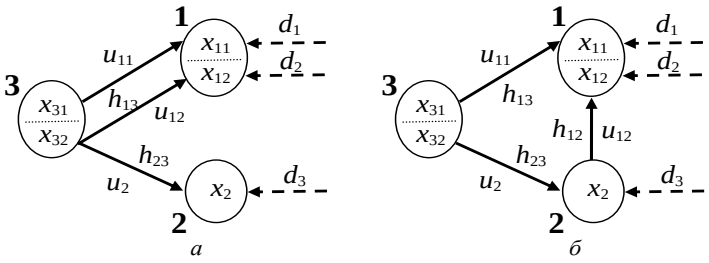


Рис. 1 – Структура сети поставок: *а* – существующая; *б* – предлагаемая

Компанию интересует вопрос оптимизации процесса транспортировки путем отправки продукции x_{12} в узел 2, для которого узел 1 будет формировать заказы на ее поставку (см. рис. 1, *б*). Время выполнения заказов h_{12} составляет от 1 до 2 суток.

Размерности модели равны $n_1 = m_1 = 2$, $n_2 = m_2 = 1$, $n_3 = m_3 = 2$, $N = 5$. Варианту *а* соответствуют следующие значения матриц, описывающих взаимосвязи между узлами: $\mathbf{\Pi}_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{\Pi}_{31} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{\Pi}_{32} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$; варианту *б*: $\mathbf{\Pi}_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{\Pi}_{31} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{\Pi}_{32} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$. Матрицы влияния внешнего спроса равны: $\boldsymbol{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{H}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{H}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$.

На основе информации об объемах продаж за первые 50 дней 2017 года определены граничные значения спроса $\boldsymbol{d}^{\max} = \mathrm{col}\{112; 326; 263\}$ и $\boldsymbol{d}^{\min} = \mathrm{col}\{6; 19; 22\}$.

В соответствии с (4), (5) определены размеры страховых запасов ресурсов для обоих вариантов, которые выбраны в качестве начального состояния системы $x_a(0) = x_a^* = \mathrm{col}\{672; 1956; 1052; 112; 589\}$, $x_б(0) = x_б^* = \mathrm{col}\{672; 652; 2356; 112; 589\}$. Нетрудно убедиться, что суммарные размеры страховых запасов в обоих вариантах совпадают, они лишь по разному распределены между узлами сети.

Численное решение соответствующих задач полуопределенного программирования выполнено в среде MATLAB с помощью свободно распространяемого пакета cvx [13]. В результате определены параметры эллипсоидов (29), аппроксимирующих множества значений внешних воздействий для каждого узла сети.

Для 1-го узла получены такие результаты: вариант *а*:

$$\boldsymbol{Q}_{w_1} = \mathrm{diag}\{5{,}616 \cdot 10^3; 4{,}713 \cdot 10^4\}, \boldsymbol{w}_1^* = \mathrm{col}\{59; 172{,}5\};$$

вариант *б*: для разных видов продукции задачи решены независимо (величины запаздывания отличаются), в результате эллипсоиды вырождаются в отрезки:

$$\boldsymbol{Q}_{w_{11}} = 2{,}809 \cdot 10^3, \ \boldsymbol{w}_{11}^* = 59,$$

$$\boldsymbol{Q}_{w_{12}} = 2{,}356 \cdot 10^4, \ \boldsymbol{w}_{12}^* = 172{,}5.$$

Для 2-го узла эллипсоид также вырождается в отрезок: вариант *а*: $\boldsymbol{Q}_{w_2} = 1{,}452 \cdot 10^4$, $\boldsymbol{w}_2^* = 142{,}5$; вариант *б*: $\boldsymbol{w}_2^* = 315$, $\boldsymbol{Q}_{w_2} = 7{,}508 \cdot 10^4$.

Для 3-го узла параметры эллипсоида в обоих вариантах совпадают:

$$\boldsymbol{w}_3^* = \mathrm{col}\{59; 315\}, \ \boldsymbol{Q}_{w_3} = \mathrm{diag}\{5{,}616 \cdot 10^3; 1{,}502 \cdot 10^5\}.$$

Величины запаздываний $h_{13}(k) \in [2; 6]$, $h_{23}(k) \in [2; 4]$ и $h_{12}(k) \in [1; 2]$ в каждом периоде генерировалась случайным образом, $\beta = 0{,}8$.

Используя результаты решения для каждого узла задачи (25) при ограничении (26), в соответствии с (27) вычислены матрицы регуляторов для варианта *а*:

$\boldsymbol{K}_1 = \begin{bmatrix} 0{,}139 & -0{,}167 \\ -0{,}033 & -0{,}192 \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{K}_2 = -0{,}243$,

$\boldsymbol{K}_3 = \begin{bmatrix} -0{,}143 & -0{,}243 \\ 0{,}341 & -0{,}699 \end{bmatrix}$; и варианта *б*: $\boldsymbol{K}_{11} = -0{,}242$,

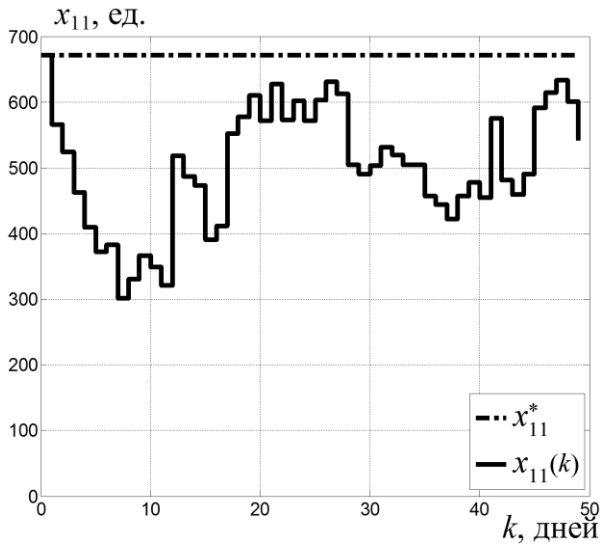
$\boldsymbol{K}_{12} = -0{,}420$, $\boldsymbol{K}_2 = -0{,}222$, $\boldsymbol{K}_3 = \begin{bmatrix} -0{,}119 & -0{,}201 \\ 0{,}341 & -0{,}699 \end{bmatrix}$.

Для модели сети поставок в обоих вариантах построена система сравнения. Матрица динамики системы сравнения для варианта *б* равна

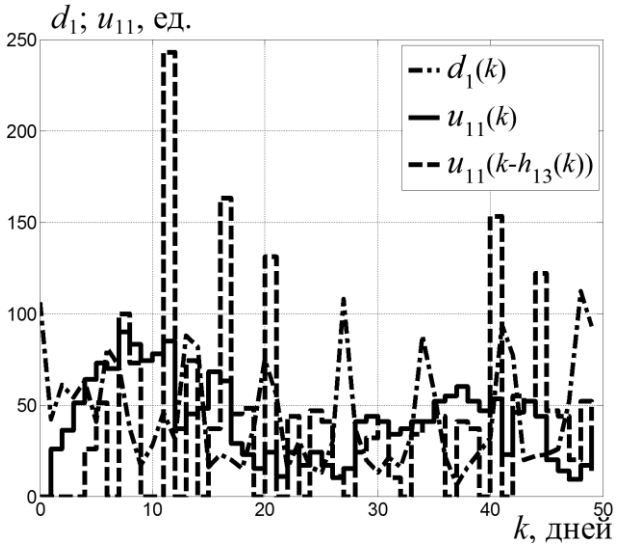
$$\boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} 5{,}145 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5{,}050 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 4{,}164 \cdot 10^{-1} & 5{,}010 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 3{,}353 \cdot 10^{-1} & 0 & 3{,}333 \cdot 10^{-1} & 7{,}646 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}.$$

Нетрудно убедиться, что условие устойчивости (37) выполняется. Таким образом, система сравнения, а, следовательно, и управляемая сеть поставок являются устойчивыми.

Результаты моделирования для варианта *б* приведены на рис. 2 – рис. 4, где *а* – значения страхового и наличного уровней запасов; *б* – значения спроса, номинального и реального (с учетом запаздывания) управляющих воздействий.

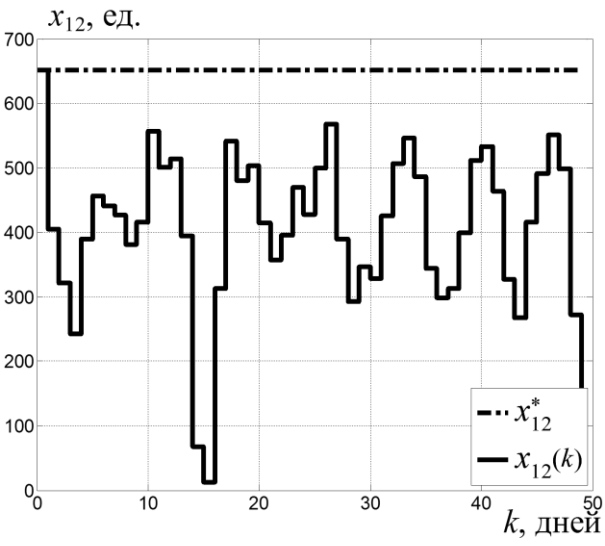


а

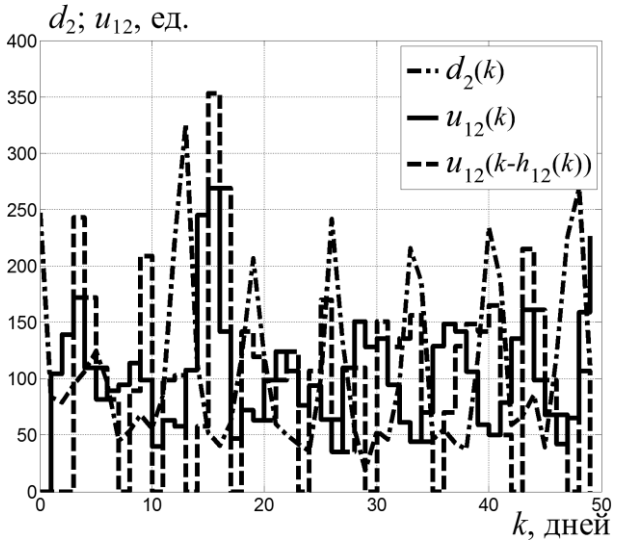


б

Рис. 2 – Графики изменения размеров запасов продукции x_{11}



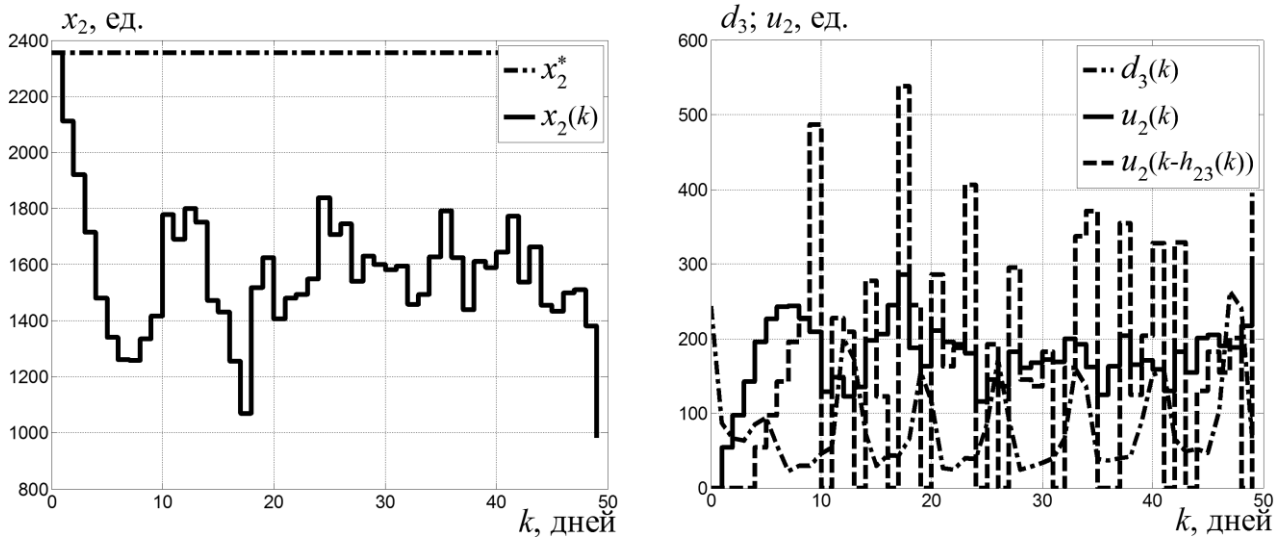
а



б

Рис. 3 – Графики изменения размеров запасов продукции x_{12}

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)



а *б*

Рис. 4 – Графики изменения размеров запасов продукции x_2

Из графиков видно, что наличие запаздываний приводит к пропускам в поставках и неравномерности размеров поставок вследствие объединения заказов, сделанных в разных периодах. Однако, предложенная стратегия управления запасами обеспечивает отсутствие дефицита ресурсов в узлах сети, а также гарантированные размеры затрат на производство и хранение ресурсов.

Значение критерия качества, полученное путем суммирования значений локальных критериев, вычисленных в соответствии с (8), для варианта *б* равно $J_\Sigma^\infty(k) = 2{,}585 \cdot 10^6$, что на 40,8 % меньше значения, полученного для варианта *а*. Таким образом, схема транспортировки ресурсов, представленная на рис. 1, *б*, является более выгодной. Верхнее граничное значение критерия, полученное путем суммирования локальных граничных значений, вычисленных в соответствии с (28), равно $J_\Sigma^* = 3{,}157 \cdot 10^7$.

Выводы. В статье предложен подход к решению задачи синтеза децентрализованного гарантирующего управления запасами в сетях поставок с неопределенными транспортными запаздываниями в условиях действия «неизвестного, но ограниченного» спроса. С помощью дескрипторного преобразования дискретной модели узла сети поставок в пространстве состояний получена модель без запаздываний. Путем построения для дескрипторной модели узла функционала Ляпунова-Красовского, зависящего от максимальной величины запаздывания, получено условие существования гарантирующего регулятора, реализующего локальный закон управления в виде линейной обратной связи по рассогласованию между наличными и страховыми уровнями запасов ресурсов. На основе метода инвариантных эллипсоидов с помощью техники ЛМН задача синтеза гарантирующего регулятора, который минимизирует верхнее граничное значение квадратичного критерия качества, сведена к задаче полуопределенного программирования. Для анализа устойчивости управляемой сети поставок применяется метод векторных функций Ляпунова и метод сравнения.

Список литературы

1. *Zhu X. L.* New results of stability analysis for systems with time-varying delay / *X. L. Zhu, G. H. Yang* // Int. J. Robust Nonlinear Control. – 2010. – Vol. 20. – P. 596–606.
2. *Liu X. G.* Delay-dependent robust stabilization of discrete-time systems with time-varying delay / *X. G. Liu, R. R. Martin, M. Wu, M. L. Tang* // IEE Proc.: Control Theory and Applications. – 2006. – Vol. 153(6). – P. 689–702.
3. *Wu V.* Stability analysis and robust control of time-delay systems / *V. Wu, Y. He, J.-H. She* // New York : Springer, 2010. – 335 p.
4. *Баландин Д. В.* Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств / *Д. В. Баландин, М. М. Коган*. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 280 с.
5. *Fridman E.* A descriptor system approach to H_∞ control of linear time-delay systems / *E. Fridman, U. Shaked* // IEEE Trans. Automat. Control. – 2002. – Vol. 47. – P. 253–270.
6. *Zhang W.* Robust stability test for uncertain discrete-time systems: a descriptor system approach / *W. Zhang, H. Su, Y. Liang, Z. Han* // Lat. Am. Appl. Res. – 2011. – Vol. 41. – No. 4. – P. 359–364.
7. *Афанасьев В. Н.* Гарантирующее управление нелинейными объектами / *В. Н. Афанасьев*. – М. : Московский государственный институт электроники и математики, 2012. – 170 с.
8. *Поляк Б. Т.* Управление линейными системами при внешних возмущениях (техника линейных матричных неравенств) / *Б. Т. Поляк, М. В. Хлебников, П. С. Щербаков*. – М. : ЛЕНАНД, 2014. – 560 с.
9. *Половинкин Е. С.* Элементы выпуклого и сильно выпуклого анализа / *Е. С. Половинкин, М. В. Балашов*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 416 с.
10. *Дорофеев Ю. И.* Синтез системы оптимального управления запасами с дискретным ПИД-регулятором с использованием линейных матричных неравенств / *Ю. И. Дорофеев* // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Харків : ХУПС, 2014. – Вип. 4(41). – С. 34–41.
11. *Petersen I. R.* Optimal guaranteed cost control of discrete-time uncertain linear systems / *I. R. Petersen, D. C. McFarlane, M. A. Rotea* // Int. J. Robust Nonlinear Control. – 1998. – Vol. 8. – P. 649–657.
12. *Бобцов А. А.* Управление непрерывными и дискретными процессами / *А. А. Бобцов, Г. И. Болтунов, С. В. Быстров, В. В. Григорьев*. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2010. – 175 с.
13. *Grant M.* CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 2.1 / *M. Grant, S. Boyd*. – Режим доступа : http://cvxr.com/cvx. – Дата обращения: 20 сентября 2017.

References (transliterated)

1. Zhu X. L., Yang G. H.. New results of stability analysis for systems with time-varying delay. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, 2010, vol. 20, pp. 596–606.
2. Liu X. G., Martin R. R., Wu M., Tang M. L. Delay-dependent robust stabilization of discrete-time systems with time-varying delay. *IEE Proc.: Control Theory and Applications*, 2006, vol. 153, no. 6, pp. 689–702.
3. Wu V., He Y., She J.-H. *Stability analysis and robust control of time-delay systems.* New York, Springer, 2010. 335 p.
4. Balandyn D. V., Kohan M. M. *Sintez zakonov upravleniya na osnove linejnykh matrichnykh neravenstv* [Synthesis of control laws based on linear matrix inequalities]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 280 p.
5. Fridman E., Shaked U. A descriptor system approach to H_∞ control of linear time-delay systems. *IEEE Trans. Automat. Control*, 2002, vol. 47, pp. 253–270.
6. Zhang W., Su H., Liang Y., Han Z. Robust stability test for uncertain discrete-time systems: a descriptor system approach. *Lat. Am. Appl. Res.*, 2011, vol. 41, no. 4, pp. 359–364.
7. Afanas'ev V. N. *Garantiruyushhee upravlenie nelinejnymi ob"ektami* [Guaranteed cost control of nonlinear objects]. Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj institut ehlektroniki i matematiki Publ., 2012. 170 p.
8. Polyak B. T., Hlebnikov M. V., Shcherbakov P. S. *Upravlenie linejnymi sistemami pri vneshnih vozmushcheniyah (tekhnika linejnyh matrichnyh neravenstv)* [Control of linear systems under external perturbations (the technique of linear matrix inequalities)]. Moscow, LENAND Publ., 2014. 560 p.
9. Polovinkin E. S., Balashov M. V. *Elementy vypuklogo i sil'no vypuklogo analiza* [Elements of convex and strongly convex analysis]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 416 p.
10. Dorofieiev Y. I. Sintez sistemy optimal'nogo upravleniya zapasami s diskretnym PID-regulyatorom s ispol'zovaniem LMN [Synthesis of the optimal inventory control system with a discrete PID-controller using LMI]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl* [Collection of scientific works of Kharkiv University of Air Forces]. Kharkiv, 2014, vol. 4 (41), pp. 34–41.
11. Petersen I. R., McFarlane D. C., Rotea M. A. Optimal guaranteed cost control of discrete-time uncertain linear systems. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, 1998, vol. 8, pp. 649–657.
12. Bobtsov A. A., Boltunov G. I., Bystrov S. V., Grigor'ev V. V. *Upravlenie nepreryvnymi i diskretnymi protsessami* [Control of continuous and discrete processes]. Sankt-Peterburg, SPbGU ITMO Publ., 2010. 175 p.
13. Grant M., Boyd S. (2017), CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 2.1. Available at: http://cvxr.com/cvx. (accessed 20.09.2017).

Поступила (received) 01.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дескрипторний підхід до синтезу децентралізованого гарантуючого управління запасами в мережах поставок з невизначеними запізненнями / Ю. І. Дорофєєв, А. О. Нікульченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 21–31. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0023.

Дескрипторный подход к синтезу децентрализованного гарантирующего управления запасами в сетях поставок с неопределенными запаздываниями / Ю. И. Дорофеев, А. А. Никульченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 21–31. – Библиогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0023.

Descriptor system approach to the synthesis of decentralized guaranteed cost inventory control in supply networks with uncertain delays / Y. I. Dorofieiev, A. A. Nikulchenko // Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 51 (1272). – P. 21–31. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дорофєєв Юрій Іванович – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: dorofeev@kpi.kharkiv.edu.

Дорофеев Юрий Иванович – доктор технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: dorofeev@kpi.kharkiv.edu.

Dorofieiev Yuri Ivanovych – Doctor of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of System Analysis and Informative - Analytical Technologies; tel.: (057) 707-61-03; e-mail: dorofeev@kpi.kharkiv.edu.

Нікульченко Артем Олександрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри комп'ютерної математики та аналізу даних; тел.: (057) 707-63-51; e-mail: an@cloudwk.com.

Никульченко Артем Александрович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры компьютерной математики и анализа данных; тел.: (057) 707-63-51; e-mail: an@cloudwk.com.

Nikulchenko Artem Aleksandrovych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Assistant at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis; tel.: (057) 707-63-51; e-mail: an@cloudwk.com.

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

UDC 004.9

M. D. GODLEVSKYI, A. A. GOLOSKOKOVA, A. A. CHIPIZHENKO

MEDIUM-TERM PLANNING INFORMATION TECHNOLOGY FOR QUALITY IMPROVMENT OF THE SOFTWARE DEVELOPMENT PROCESS BASED ON THE CMMI MODEL

Розглядається технологія для вирішення задачі середньострокового планування (динамічна постановка задачі) покращення якості процесу розробки програмного забезпечення на основі моделі CMMI. Розглянуто тестовий приклад для другого рівня зрілості організації розробника програмного забезпечення. Плановий період складається з трьох підперіодів, а цільовий профайл може містити довільну кількість практик. Проведено аналіз отриманих результатів, які є вихідною інформацією для статичної постановки задачі.
Ключові слова: динамічна постановка задачі, розробка програмного забезпечення, модель CMMI, другий рівень зрілості, цільовий профайл.

Рассматривается технология решения задачи среднесрочного планирования (динамическая постановка задачи) улучшения качества процесса разработки программного обеспечения на основе модели CMMI. Рассмотрен тестовый пример для второго уровня зрелости организации разработчика программного обеспечения. Плановый период состоит из трёх подпериодов, а целевой профайл может содержать произвольное количество практик. Проведен анализ полученных результатов, которые являются выходной информацией для статической постановки задачи.
Ключевые слова: динамическая постановка задачи, разработка программного обеспечения, модель CMMI, второй уровень зрелости, целевой профайл.

Information technology is considered for medium-term planning for quality improvement of the software development process based on the CMMI model for the dynamic problem statement. The information system forms a rational plan for the software development process improvement and also allows, within the defined planning period, to determine precisely those practices and focus areas of the maturity model, for which it is necessary to increase the capability level, under conditions of limited resources. The test case for the second level of maturity of the software company is considered. The scheduled period consists of three sub periods, and the target profile may contain any quantity of practices. The analysis of the obtained results, which are the input data of the information system that solves the static problem, is carried out.
Keywords: dynamic problem statement, software development, CMMI model, the second level of maturity, target profile.

Introduction. The qualitative characteristics of software are paid more and more attention all over the world. The competitiveness of the software company depends directly on the quality of the software development process, and for this reason, software quality assurance issues are one of the top priorities for such companies. The issues related to the organization and improvement of the software development process, the management of the developers team, the development, and implementation of software tools to support the software development lifecycle fall into the field of software engineering. Software development process has a hierarchical architecture, including a number of life cycle processes of the software system. At present, there are various standards governing the sets of lifecycle process of software systems, such as ISO-12207, CMMI [1, 2] and other. The purpose of these standards is to ensure the end product to meet market requirements and to satisfy end users needs. The flexibility of the continuous CMMI model [3] allows the developer company to evaluate the most important stages of the software development process, as well as the maturity level of the entire software development process.

CMMI model was formalized in work [4]. Also, mathematical dynamic model and algorithm for planning the improvement of the software development process quality were developed.

Studies have shown that the problem is NP-complex. Therefore, relevant studies are devoted to the further revision of the model and algorithm according to the adequacy of the software and the speed of work, as well as designing and developing an information system for solving the problem of medium-term planning directly.

Problem statement. The task of planning for the quality improvement of the software development process can be presented by a rolling planning problem, which involves the synthesis of static and dynamic models (models of current and medium-term planning). In work [5] static models of planning for the quality improvement of the software development process were developed on the basis of the CMMI maturity model, the initial information for which is the result of solving the dynamic problem.

In a dynamic problem description statement, the task is to determine the first choice of the software development process progress within a planned [0, *T*] to a higher quality level, where T is the duration of the planned period. According to the dynamic problem statement, quality is characterized by alternative options for the progress of the software development process to a higher level of maturity in accordance with the CMMI model, as well as strategies for using different types of resources to achieve a certain level of maturity.

The aim of the research is to develop an information technology of planning for the quality improvement of software development process based on a dynamic model.

Model and algorithm for medium-term planning under dynamic problem statement. During the development of information technology for solving the problem of medium-term planning to improve the quality of the software development process, a mathematical model was developed in work [6].

A model analysis of medium term planning for improving the quality of the software development process by the algorithms which can be used in the problem solution showed the relevance of the time-series

© M. D. Godlevskiy, A A. Goloskokova, A. A. Chipizhenko, 2017

technique.

This method features a multi-step process, at each *t*-th step of which many uncompetitive options are ignored.

An algorithm "Kiev broom" was implemented by Ukrainian scientists V. S. Mikhalevich and N. Z. Shor on the basis of the time-series technique. The idea of this algorithm was used in the work to solve the problem of quality management process of software development. When using this algorithm for real data it has been shown that modern computers can not cope with the task since it is NP-complex. Therefore, there was a need to improve it in order to reduce the time for the task implementation. It was suggested to formulate and solve individual optimization problems in the course of the works of the "Kiev broom" algorithm.

Quality management technology of the software development process. When designing the system, the diagram of the processes IDEF0 (Fig. 1) was used as the basis. This diagram describes the high-level representation of the quality management of the software development process based on the maturity model.

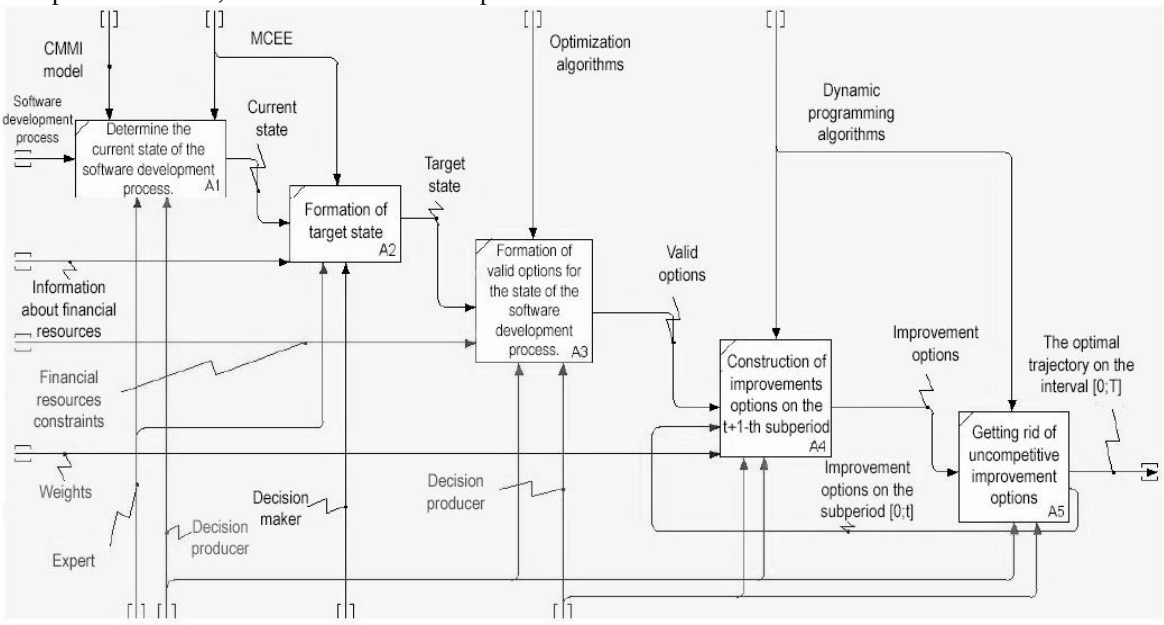


Fig. 1 – Process diagram

According to the technology of solving the problem, the first business process A1 determines the current state of the software development process. As an input data, the initial state of the software development process of the investigated software company is proposed. The software development process is evaluated according to the CMMI model. At the same time, the evaluation is carried out at the level of the initial state of the individual practices, which are defined by such a concept as the "level of capability" [7] in the range from zero to three.

In this work, the experts from the investigated software company who assessed the "level of capability" for practices were involved assess the current state of the software development process and the performance testing of the developed technology. The processing of this information was carried out by analysts-individuals who formulate solutions based on the methodology of collective expert evaluation [8]. The result of the business process A1 is the current state of the software development process.

Business process A2 is intended for the formation of a target profile, which defines the software company goals to improve the quality of the software development process. These goals are set by the decision-maker basing on the financial constraints, as well as the expert assessments of the required resources to achieve the goals set separately for each practice of the focus areas.

The aforementioned dynamic model and algorithm for quality management of software development process based on the model of maturity of CMMI are used for the formation of an optimal plan for the improvement of the software development process (business processes A3–A5). The initial state of the software development process, the target profile, the necessary financial resources for each practice belonging to the target profile; and the restrictions on financial resources that can be used in this planning period are used as input data.

The business process A3 is intended to form the sets of valid options of the state of the software development process on each considered scheduled sub period, taking into account the constraints on the financial resources allocated in each planning sub period, these resources can be carried over to the next (t+1) sub period, if they are not spent on t-th sub period.

Business processes A4, A5 implement the dynamic model of a task, which is an additive target function with financial constraints and variables that determine the level of capabilities for individual practices that are part of the target profile. An algorithm for sequential analysis of options is used for the formation of the optimal plan of the software development process improvement program. At each step of this algorithm, uncompetitive options for the improvement of the software development process are rejected. In the course of the quality management

technology for software development process, an optimal trajectory for the software development process is formed.

Tools for information technology building. To construct an information system that solves the investigated problem, it was necessary to transform the mathematical model and algorithms of its processing into the corresponding components of the software.

The main programming language was C #, which is an object-oriented, strongly typed programming language for the .NET platform, it was developed by Anders Gailsberg, Scott Wiltamut, and Peter Gold, under the auspices of Microsoft Research.

Most of the calculations necessary for solving the problem are related to the solution of complex optimization problems, therefore all mathematical operations of the information system are performed using the Microsoft Solver Foundation 3.1 package – a set of development tools for mathematical programming, modeling and solving optimization problems.

To construct the information system, an appropriate data model was created. This data model accurately describes the mathematical and algorithmic models which were used in this work. ERWin Modeler [9] is a tool for designing and documenting databases. ERWin Modeler allows to create, document, and maintain databases. This tool was used as a tool for designing the necessary data model.

MS SQL Server served for storing and processing the data. The main advantages of this tool is high-speed of data processing, as well as the presence of built-in debugging capabilities of data models.

The Microsoft Visual Studio 2015 product was taken as an integrated development environment (IDE).

When designing the information system, 3-level "client-server" architecture with a dedicated application server was selected as an architecture model of the software system. This architecture model has another node called Application Server, which hosts the entire business logic, resulting in the database server being unloaded and only used for the data accessing. This model was chosen basing on the following benefits:

1) maximum scalability;

2) unloading the database server, opportunity to increase the performance of the entire system by configuring the application server according to the tasks that are being solved.

Fig. 2 shows the component deployment diagram within the client-server architecture with a dedicated application server. This diagram shows the physical relationships between software and hardware components of the system.

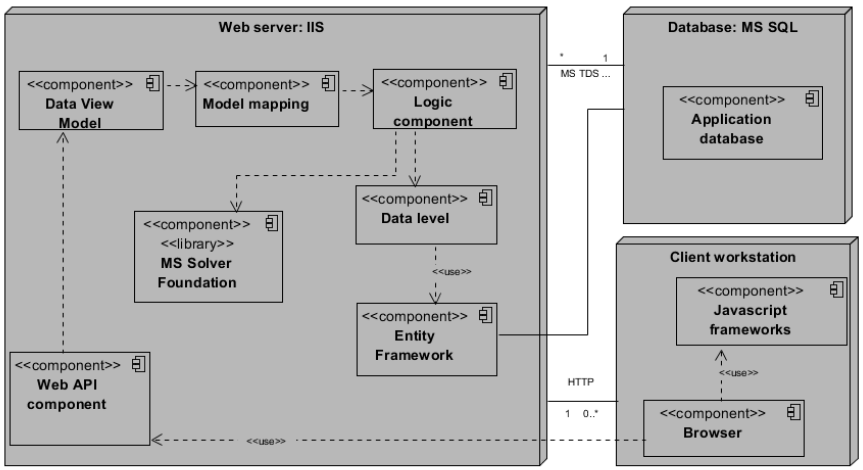


Fig. 2 – Component diagram of the information system

We will briefly consider the placement diagram of the software system main components. Within the database server (Database: MS SQL) Application Database component that encapsulates the database and all the necessary configuration components has been dedicated. The application server (IIS Web Server) includes the following components required for the system:

- Entity Framework – ORM library;
- Data Level – this component works with the input data;
- MS Solver Foundation – library for mathematical calculations;
- Logic Component – a component that contains the basic mathematical and algorithmic logic of the software system;
- Data View Model i Model Mapping – infrastructure-level components that act as a middleware between business logic and the presentation level of the system (Web API component).
- The Client WorkStation includes two components:
- JS Frameworks – a set of tools for implementing a part of business logic on the client side;
- Browser – customer-side software, which aims to provide the user with the ability to interact with resources that are located on a web server using a graphical user interface.

Software testing. For a test example, the software development process of an "N" IT company is considered. The input data, as well as the target profile of the software

development process, are shown in Table 1. The initial and target state of practice is measured in the "level of capability" scale in the range from zero to three. In our case, the initial state of the practice of local areas for the

Table 1 – The target profile of the software development process of an "N" IT company.
The software development process target profile

Maturity level	2					
Категорія	Project management					
Focus area (FA)	**SAM – Supplier Agreement Management**					
Goasl	SAM1			SAM2		
Practices (P)	1	2	3	4	5	6
Initial state	0	0	0	0	0	0
Target profile	2	2	2	2	2	2
Needed resources, c.u. (first/second levels)	1000/2200	1000/ 2200	1000/2200	1000/2200	1000/2200	1000/2200
Weights for P	0.5	0.25	0.25	0.3	0.3	0.4
Weights for goals	0.5			0.5		
Weights for FA	0.4					
Focus area (FA)	**REQM – Requirements Management**					
Goasl	REQM1					
Practices (P)	4			5		
Initial state	1			1		
Target profile	2			2		
Needed resources, c.u. (first/second levels)	4300			4300		
Weights for P	0.6			0.4		
Weights for goals	1					
Weights for FA	0.3					
Focus area (FA)	**PMC – Project Monitoring and Control**					
Goasl	PMC1					
Practices (P)	1			2		
Initial state	2			2		
Target profile	3			3		
Needed resources, c.u. (first/second levels)	2200			2200		
Weights for P	0.8			0.2		
Weights for goals	1					
Weights for FA	0.3					

second level of maturity and the target one at the end of the planning period are determined basing on experts' assessments. The "Required Resources" column shows funding needed to move from zero/ first to the second/third level of capability. The decision of the dynamic task of forming a plan for improving the software development process is considered in the planning period, consisting of three sub periods. As it can be seen from the given data, 32200 c.u. of resources are needed for the full transfer of all practices to the required level. For this example, 25700 c.u. of resources (~80 %) were allocated for all sub periods. The investigated period was divided into 3 sub periods for each of them 8000, 10 000 and 7700 units of resources were allocated, respectively.

Based on the above initial data, the following results were obtained. As a result of the first sub period, the following practices were promoted: PMC_1_1; SAM_2_5; SAM_2_6; SAM_1_1.

Four practices have moved to a new level of capability, two of them (SAM_1_1, SAM_2_6) have moved from 0 to 2 level of capability. It cost 7600 c.u. of resources, 400 c.u. were moved to the next sub period.

As a result of the second sub period, the following practices were promoted: REQM_1_4; SAM_2_4; SAM_1_2; SAM_1_3.

Four practices have moved to a new level of capability, two of them (SAM_2_4, SAM_1_2) have moved from 0 to 2 level of capability, 10400 c.u. of resources were spent, 700 c.u. were moved to the next sub period.

As a result of the third sub period, the following practices were promoted: REQM_1_5; PMC_1_2.

Two practices have moved to a new level of capability, 8400 c.u. of resources were spent, 1900 c.u. of resources remained. Figure 3 depicts a histogram showing the process of raising the level of capability for specified practices during the three test sub periods.

Conclusions. The developed information technology solves the problem of medium-term planning of improving the quality of the software development process based on the CMMI model and forms a rational plan for developing the software development process. This allows within the defined planning period, under conditions of limited resources, to determine precisely those practices and focus areas of the CMMI model for which it is necessary to increase the level of capability. The mentioned above technology compared with the system [10] is characterized by higher productivity by solving individual optimization tasks at each step of the

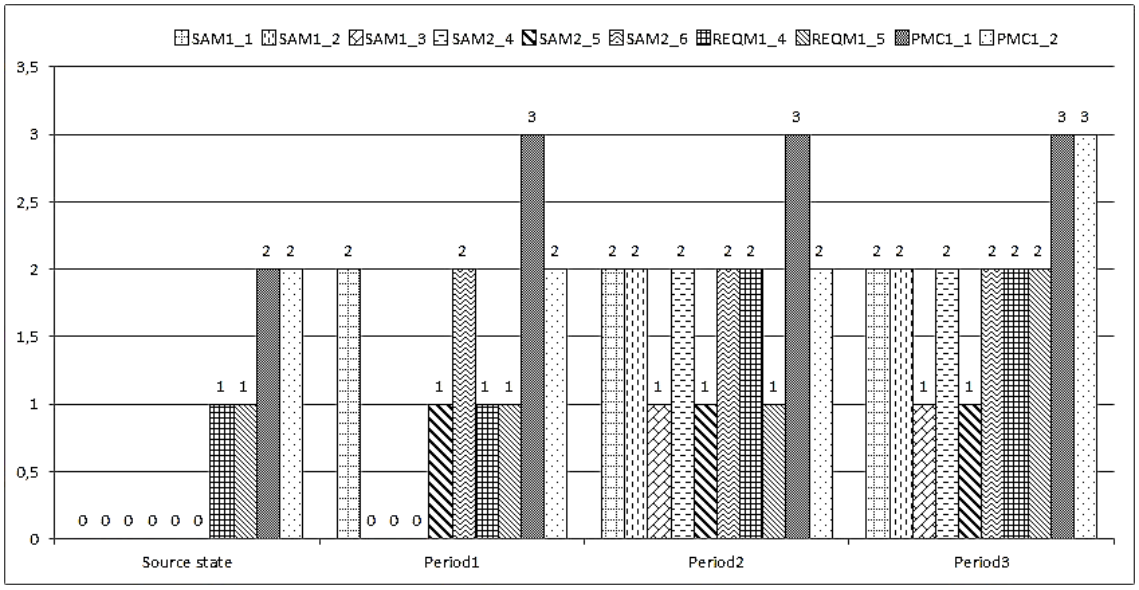


Fig. 3 – Results of calculations for the category "Project Management"

algorithm to identify uncompetitive options for the improvement of the software development process. This question is particularly relevant because the problem under consideration is NP-complete. The results obtained in the first sub period are the input data of the information system that solves the static problem.

The purpose of further research is to test the developed information system on full-scale data volumes, as well as to study the information system in terms of the problem solution speed when increasing its dimensionality.

As part of the further research, it is planned to design and develop an information system that will integrate the developed system and the system for solving static problems.

References

1. ISO/IEC 12207:2008, Information technology – Software life cycle processes / ISO/IEC 12207:2008, Information technology – Software life cycle processes. International Organization for Standardization. – 2008. – 122 p.
2. *Chrissis M. B.* CMMI: Guidelines for Process Integration and Product Improvement / *M. B. Chrissis, M. Konrad, S. Shrum.* – Addison-Wesley. – 2003. – 688 p.
3. *Mutafelija, B.* Process improvement with CMMI v1.2 and ISO standards / *B. Mutafelija.* – Auerbach Pubs. – 2009. – 406 p.
4. *Годлевский М. Д.* Динамическая модель и алгоритм управления качеством процесса разработки программных систем на основе модели зрелости / *М. Д. Годлевский, И. Л. Брагинский* // Проблемы информационных технологий. – Херсон : ОЛДИ-Плюс, 2012. – С. 6–13.
5. *Годлевский М. Д.* Синтез статических моделей планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения / *М. Д. Годлевский, А. А. Голоскокова* // Східно–Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 3/2 (75). – С. 23–29.
6. *Годлевский М. Д.* Динамическая модель планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения / *М. Д. Годлевский, Э. Е. Рубин, А. А. Голоскокова* // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ» – 2015. – № 58 (1167). – С. 3–6.
7. *Годлевский М. Д.* Принципы моделирования оценки и управления качеством процесса разработки программного обеспечения / *М. Д. Годлевский, В. А. Шеховцов, И. Л. Брагинский* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков. – 2012. – № 5/3 (59). – С. 45–49.
8. *Крючковский В. В.* Интроспективный анализ. Методы и средства экспертн
9. ого оценивания / *В. В. Крючковский, Э. Г. Петров, Н. А. Соколова, В. Е. Ходаков.* – Херсон : Гринь Д. С., 2011. – 168 с.
10. *Павловская Т. А.* C#. Программирование на языке высокого уровня / *Т. А. Павловская* – СПб. : Питер, 2009 – 432с.
11. *Годлевский М. Д.* Информационная технология управления качеством процесса разработки программного обеспечения / *М. Д. Годлевский, И. Л. Брагинский* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков. – 2013. – № 2/9 (62). – С. 63–67.

References (transliterated)

1. *ISO/IEC 12207:2008, Information technology – Software life cycle processes / ISO/IEC 12207:2008, Information technology – Software life cycle processes. International Organization for Standardization*, 2008, 122 p.
2. Chrissis M. B., Konrad M., Shrum S. *CMMI: Guidelines for Process Integration and Product Improvement*. Boston, MA, USA, Addison-Wesley Publ, 2003, 688 p.
3. Mutafelija, B. *Process improvement with CMMI v1.2 and ISO standards.* Boca Raton, FL, USA, Auerbach Publ., 2009, 406 p.
4. Godlevskiy M. D., Braginskiy I. L. Dinamicheskaya model' i algoritm upravleniya kachestvom processa razrabotki programmnykh sistem na osnove modeli zrelosti [Dynamic model and quality management algorithm of software systems development process based on maturity models]. *Problemy informatsionnykh tekhnologiy*. Herson, OLDI-Pljus Publ., 2012, pp. 6–13.
5. Godlevskiy M. D., Goloskokova A. A. Sintez staticheskikh modeley planirovaniya uluchsheniya kachestva protsessa razrabotki programmnogo obespecheniya [Static planning models synthesis of quality improvement of software development process]. *Shidno–Єvropejs'kij zhurnal peredovih tehnologij*. Kharkiv, NPP ChP «Tekhnologicheskiy Tsentr» Publ., 2015, no. 3/2 (75), pp. 23–29.
6. Godlevskiy M. D., Rubin Je. E., Goloskokova A. A Dinamicheskaya model' planirovaniya uluchsheniya kachestva protsessa razrabotki programmnogo obespecheniya [Dynamic planning model of quality improvement of software development process].*Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 58, pp. 3–6.
7. Godlevskiy M. D., Shehovcov V. A., Braginskiy I. L. Printsipy modelirovaniya otsenki i upravleniya kachestvom protsessa razrabotki programmnogo obespecheniya [Modeling principles of assessment and control of quality in software development process]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. Kharkiv, NPP ChP «Tekhnologicheskiy Tsentr» Publ., 2012, no. 5/3 (59), pp. 45-49.

8. Krjuchkovskiy V. V., Petrov Je. G., Sokolova N. A., Hodakov V. E. *Introspektivnyy analiz* [Introspective analysis]. *Metody i sredstva ekspertnogo otsenivaniya* [Methods and techniques of the expert estimation]. Herson, Grin' D. S. Publ., 2011. 168 p.
9. Pavlovskaya T. A. *C#. Programmirovanie na jazyke vysokogo urovnya* [C#. High-level language programming]. SPb, Piter Publ., 2009. 432 p.
10. Godlevskiy M. D., Braginskiy I. L. Informatsionnaya tekhnologiya upravleniya kachestvom protsessa razrabotki programmnogo obespecheniya [Information technology for the quality management of the software development process]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* Kharkiv. NPP ChP «Tekhnologicheskiy Tsentr» Publ., 2013, no 2/9 (62), 63–67pp.

Received 15.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Інформаційна технологія середньострокового планування покращення якості процесу розробки програмного забезпечення на основі моделі CMMI / М. Д. Годлевський, А. О. Голоскокова, А. О. Чипіженко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 3–7. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Информационная технология среднесрочного планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения на основе модели CMMI / М. Д. Годлевский, А. А. Голоскокова, А. А.Чипиженко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 3–7. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Medium-term planning information technology for quality improvement of the software development process based on the CMMI model / M. D. Godlevskyi, A A. Goloskokova, A. A. Chipizhenko // Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 51 (1272). – P. 3–7. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Годлевський Михайло Дмитрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідуючий кафедри «Програмна інженерія та інформаційні технології управління»; тел.: (057) 707-64-74; e-mail: god_asu@kpi.kharkov.ua

Годлевский Михаил Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедры «Программная инженерия и информационные технологии управления»; тел.: (057) 707-64-74; e-mail: god_asu@kpi.kharkov.ua

Mykhailo D. Godlevskyi – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the department of "Software Engineering and Management Information Technologies"; tel.: (057) 707-64-74; e-mail: god_asu@kpi.kharkov.ua

Голоскокова Анна Олександрівна – Національній технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Програмна інженерія та інформаційні технології управління»***;*** тел.: (057) 707-64-74; e-mail: semit.department.16@gmail.com.

Голоскокова Анна Александровна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры «Программная инженерия и информационные технологии управления», тел.: (057) 707-64-74; e-mail: semit.department.16@gmail.com

Anna A. Goloskokova – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer of the department of "Software Engineering and Management Information Technologies"; tel.: (057) 707-64-74; e-mail: semit.department.16@gmail.com

Чипіженко Олександр Олександрович – Національній технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Програмна інженерія та інформаційні технології управління»; тел.: (095) 692-80-04; e-mail: alex.chipizhenko@hotmail.com

Чипиженко Александр Александрович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры «Программная инженерия и информационные технологии управления», тел.: (095) 692-80-04; e-mail: alex.chipizhenko@hotmail.com

Alexandr A. Chipizhenko – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student of the department of "Software Engineering and Management Information Technologies"; tel.: (095) 692-80-04; e-mail: alex.chipizhenko@hotmail.com

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

УДК 681.518.658.519

V. E. SOKOL, M. V. TKACHUK, Y. M. VASETSKA

ADAPTIVE TRAINING SYSTEM FOR IT-COMPANIES PERSONNEL: DESIGN PRINCIPALS, ARCHITECTURAL MODELS AND IMPLEMENTATION TECHNOLOGY

Досліджені проблеми, пов'язані з корпоративним навчанням персоналу IT-компаній, вивчено актуальність та мету створення адаптивних систем тренінгів. Переглянуті існуючі системи для перегляду основних функціональних можливостей. Досліджені засоби визначення компетенції та навичок, зокрема, e-CF та SFIA. Переглянуті архітектури та моделі, які можуть бути використані для систем тренінгів. Запропонована онтологія та алгоритм створення тренінгу.
Ключові слова: адаптація, адаптивна система, корпоративне навчання, IT-компанія, e-CF, SFIA.

Исследованы проблемы, связанные с корпоративным обучением персонала IT-компаний, изучены актуальность и цель создания адаптивных систем тренингов. Рассмотрены существующие системы для анализа основных функциональных возможностей. Исследованы способы определения компетенции и навыков, в частности, e-CF и SFIA. Рассмотрены архитектуры и модели, которые могут быть использованы для систем тренингов. Предложена онтология и алгоритм создания тренинга.
Ключевые слова: адаптация, адаптивная система, корпоративное обучение, IT-компания, e-CF, SFIA.

Investigated problems and not resolved issues related to corporate training for IT-companies personnel, explored the actuality and goal of creating adaptive training and learning systems r to improve the quality and speed of competence growth of IT-companies' personnel. Reviewed learning and training systems structures and main differences. Reviewed existing top learning and training systems and selected two of them – Explore Gate and Forma LMS – to be basically tested to explore the common requirements, functionality and not resolved issues. Investigated frameworks for IT competences and skills, exactly e-CF (European e-Competence Framework) and SFIA (Skills Framework for the Information Age). These frameworks are proposed to be used in training system for IT companies' personnel. Reviewed architectures and models that can be used for adaptive learning and training systems. Proposed ontology of adaptive training system for IT-companies personnel and algorithm to create the training track for employee according to the selected competence, current level of knowledge and skills, aim level of competence and preferences.
Keywords: Adaptation, adaptive system, corporate training, IT-company, e-CF, SFIA.

Introduction: Problem Actuality and Research Goal. The theory of adaptive systems arose due to the necessity to solve a large number of applied problems, for which it is impossible to use traditional methods that require knowledge of an adequate mathematical model of an object. The quality of traditional (non-adaptive) ways of managing depends on the amount of priory information about the object and its operating conditions. In practice, it is quite difficult to provide an exact mathematical description of the object of management. And for educational systems, adaptability provides such an important advantage as the individualization of the learning process. In the process of classical learning in the "person – person" format, an experienced teacher can identify the strengths and weaknesses of the student evaluate his overall erudition and level of knowledge of a particular discipline – and, based on these data, determine the volume and the optimal presentation of the material [1].

The main issue of the adaptive learning systems is the individual characteristics of each particular student highlighting and representing the data exactly according it. The construction of the training systems is also connected with the support of high reliability.

The idea of such systems is to create algorithms and tools for collecting information about the user in order to use this information for determining the learning track of the trainees. In addition, taking into account the student's knowledge of the course, the amount of submitted teaching material and the form of its presentation may be regulated: text format, hypermedia, presentation of the image, etc. [2].

Learning and training systems structure. Considering the problem of developing computer training systems in general, distinguish two main processes: "studying as learning" and "studying as tutoring" [3]. The direction of *learning* (learning systems) implies self-education, mentoring, adaptation, self-organization, etc. Therefore, in the development of educational systems, models that demonstrate the ability to adapt to the environment through the accumulation of information are explored. The direction of *tutoring* (educational systems) is closely linked with the questions of "who to teach?" (model of learner), as well as "what to teach?" (model of learning) and even "how to teach" (model of explanation), that is here models of information and knowledge transfer from mentor through computer. The heuristic learning model is displayed on fig. 1.

Existing systems overview. Nowadays there are a lot of learning systems. Some of them were investigated deeply to get information about main functional areas of learning systems. Explore Gate [5] and Forma LMS [6] systems were reviewed (some features are summarized in table 1).

Table 1 – The main features existing learning systems [5–6]

	Explore Gate	Forma LMS
Learning with mentor	-	+
Training auto-generation	-	-
Career track constructor	+	-
Courses constructor	+	+

It is basically web-based corporate training systems that allow tailoring individual training plans for employees, clients and partners. Additionally, systems may include automated administration, evaluation, certification and no integration problems. System should provide correct knowledge sets according to competence.

© V. E. Sokol, M. V. Tkachuk, Y. M. Vasetska, 2017

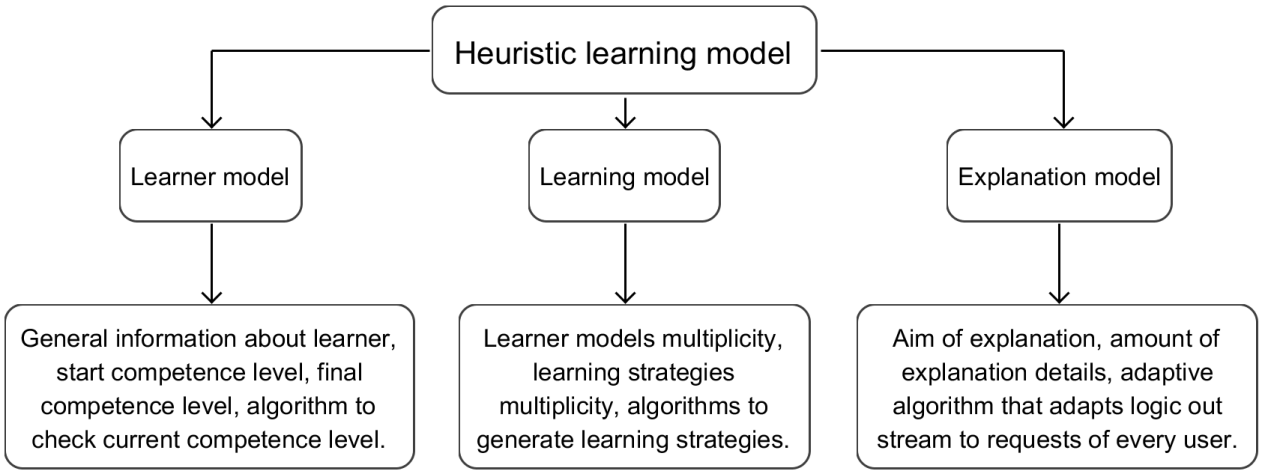


Figure 1 – Heuristic learning model [4]

But the main idea of adaptive training systems for IT companies personnel is to provide ability automatically build the learning track of every employee according to the current level of knowledge and to the expected level of knowledge (current competence and expected competence). This functionality does still not exist as the common approach.

Competences and skills frameworks. For the IT companies' personnel several documents are developed to combine information about competences and levels of competences and for IT skills. Such frameworks as e-CF ("The European e-Competence Framework") [7–9] and SFIA ("The Skills Framework for the Information Age") [10] can be used for the developing of training as the base proofed knowledge about IT competences and necessary skills.

Architectural models for adaptive solutions of training systems. In scope of work several architecture models were investigated [11]:

(1) AHAM: A Reference Model to Support Adaptive Hypermedia Authoring [11].
(2) LAOS: Layered AHS Authoring-Model and Operators [11].

AHAM model describes an adaptive hypermedia system consisting of several layers. AHAM focuses on Storage Levels that include the Domain Model, User Information Model, and Adaptation Model [11]. The domain model of the adaptive system consists of a set of concepts and concepts of relationships. Relationships can be used to create a hierarchy of concepts, which is used to represent the structure of small and large themes, perhaps small concepts, sections and chapters, the text of the course. Another common use of relationships is the notion of reason where hypermedia wants to provide as much navigation as the set of available links can be adapted or annotated with the user having previously visited. The prior requirements help the user avoid the following links to information that cannot (yet) be clear or help the system decide whether or not to include additional explanations [11].

The LAOS model [11] is a common basis for authoring adaptive hypermedia based on the AHAM model. Its main components are shown in Figure 2: Domain Model (DM), Goal and Limit Model (GM), User Model (UM), Adaptation Model (AM), and Model Representation (PM). The structure defines the elements of each model based on conceptual map representations, except for the adaptive model based on the LAG adaptability model [11]. The main difference from AHAM (and other models) is the clear division of information about the primitive information (content) and the purpose of the presentation.

For example, since the preconditions are not leading in the domain model, the domain elements can be used in different settings and orders than originally intended. Thus, LAOS promotes a high degree of reuse of information by separating fragments information from a specific context. This division is expressed by the presence of two different models, rather than one: domain model (DM) and target model and limitations (GM). Separation can be easily understood if we use the metaphor of the encyclopedia: DM represents the book (book) on which the presentation is based (for example, PowerPoint presentation, represented by GM) [11].

DM contains knowledge resources. From DM different presentations can be built (in GM), depending on the purpose. The presentation does not contain the entire book, only part (limited) of it. In addition, the presentation may contain information from several books. Thus, the separation provides a high degree of flexibility, based on the multicomponent DM-GM dependency. Another important difference from AHAM is the notion of "concept" used in the domain model. In LAOS, concepts have different representations, defined through attributes, and are limited to representing semantic unity (as opposed to AHAM). This is provided if only stand-alone attributes are allowed (without direct or indirect dependencies). This option allows you to flexibly change the order of the attributes. Therefore, the links are external and can be dynamic [11].

The LAOS model for adaptive training purposes can be transformed and used for corporate training areas as presented on fig. 2. Architecture that can be used for system is presented on fig. 3.

Common ontology of adaptive training system. Basic concepts of the subject area:

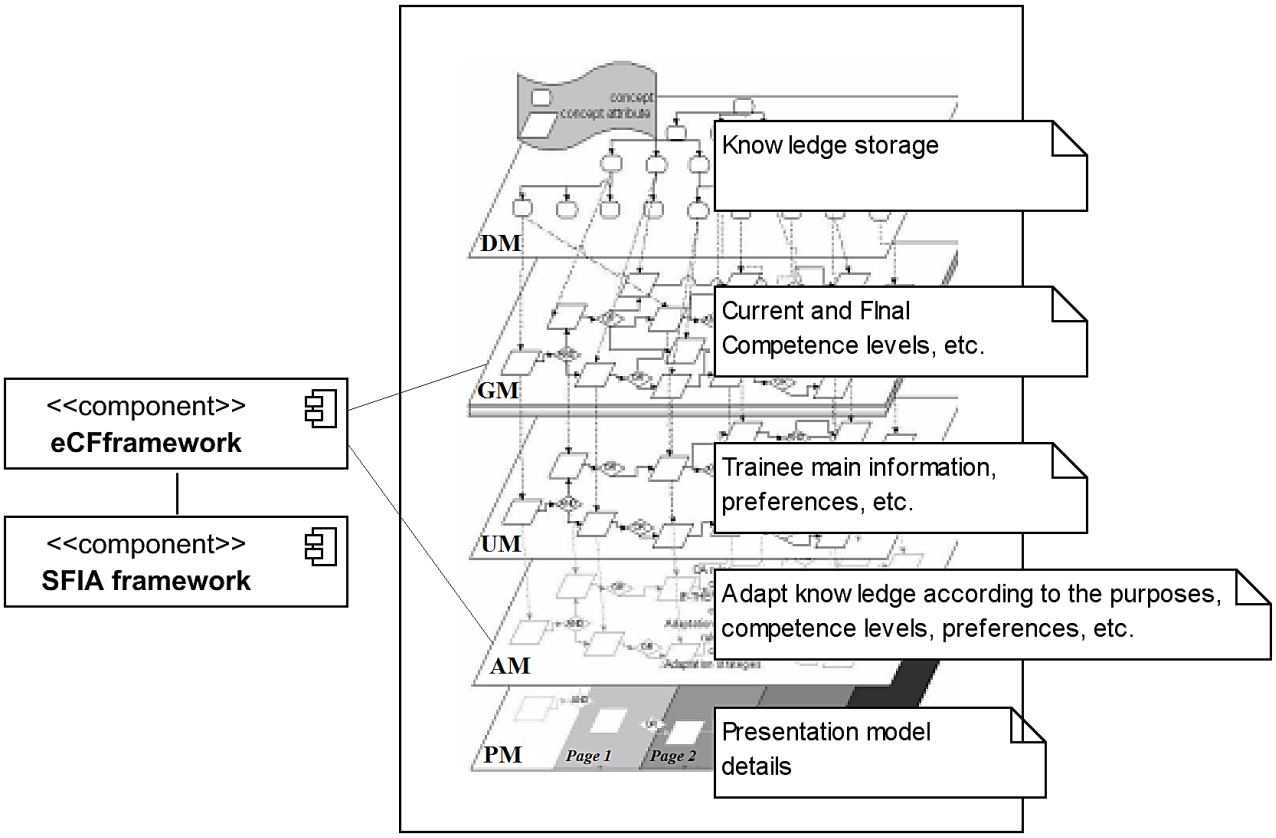


Figure 2 – LAOS model using for corporate training system (to compare with the scheme given in [11])

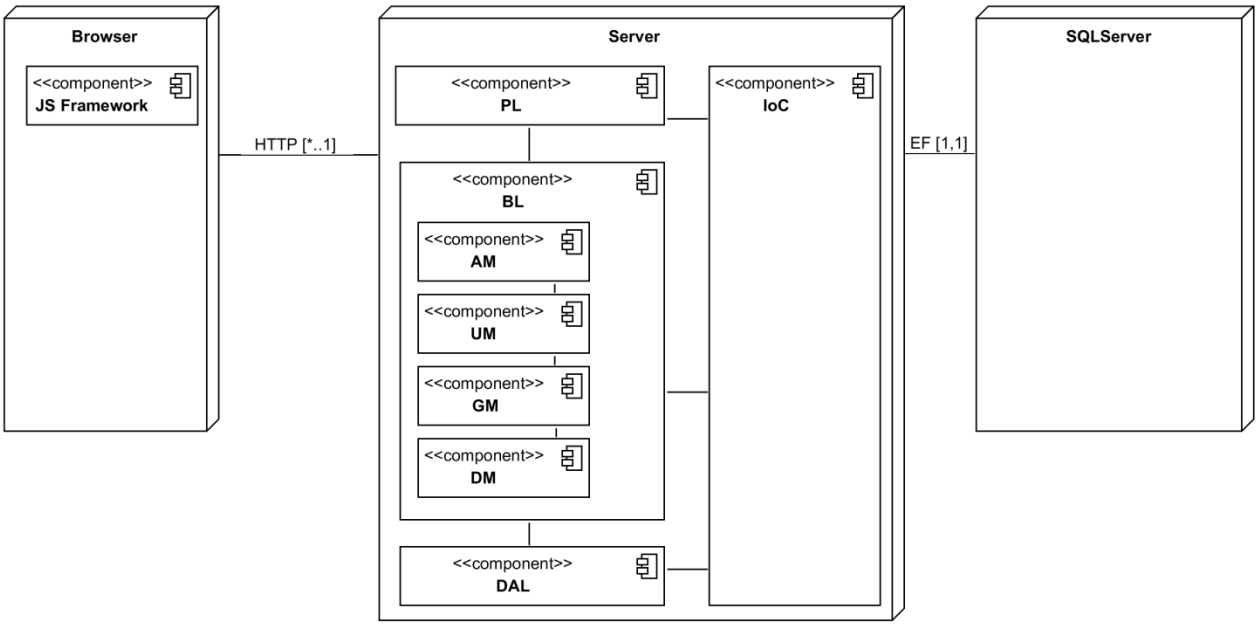


Figure 3 – Training system architecture based on LAOS model [11]

(1) Competence.
(2) Employee.
(3) Form of presentation of the content.
(4) Initial level of competence.
(5) Final level of competence.
(6) Training.
(7) Skill.

Relationships in terms of hyponym/hyperonium, holonym/meronym:

(1) “Competence” meronyms: “skill”, “initial level of competence”, “final level of competence”.
(2) “Competence” is a holonym for “ability”, “initial level of knowledge of competence”, “the final level of competence”.

(3) “Employee” meronyms: “initial level of compliance”, “final level of competence”, “skill”.
(4) “Employee” is a holonym for “initial level of competence”, “final level of competence”, “ability”.
(5) “Competence” hyponyms: “the initial level of competence”.
(6) “Competence” is a hyperonium for “the initial level of competence”.
(7) “Initial level of competence” is a holonym for “ability”.
(8) “Initial level of competence” meronyms: “skill”.
(9) “Competence” hyponyms: “the final level of competence”.
(10) “Competence” is a hyperonium for “final level of competence”.
(11) “Final level of competence” is a holonym for “ability”.
(12) “Final level of competence” meronyms: “skill”.
(13) “Training” meronyms: “skill”.

Also additional entities and relationships can be added in future work.

Proposed approach. The system should provide several levels of access: the administrator and the user (employee).

Each employee has his or her profile, which contains the basic information about it, as well as information about the current level of competence and the competence to be achieved. Then system creates a training, which contains a set of courses for necessary skills to achieve the selected competence level of each employee.

Also, for each user, system allows selecting a setting that will describe the user's priorities, for example: quick study, the most complete study, and more. In accordance with these priorities training is under way.

Each level of competence contains set of skills and set of knowledge. Thus, in order to acquire skills to achieve a certain level of competence, the employee is given a set of courses, compiled in a single training.

To analyze and track the progress of employee growth, there are reports that are available to users at the level of the administrator.

Summarized algorithm to create the training track from the Administrator view is presented on fig. 4 in the form of a sequence diagram.

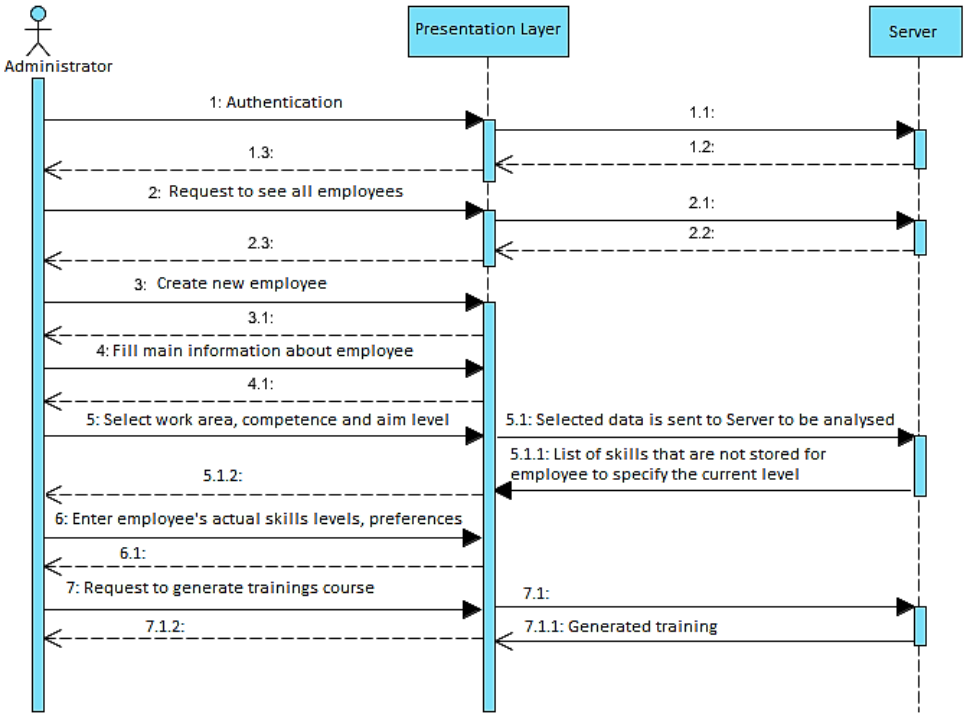


Figure 4 – Summarized algorithm from the Administrator view

Algorithm to create training for employee:

(1) Select area and competence to improve level from the list of e-CF [7–9] competences.
(2) Set final competence level that should be achieved. Competence levels are taken from e-CF [7–9].
(3) Select current level of skills that needed for the selected competence (levels are got from the e-CF framework [7–9]). Only knowledge and skills levels with no information for the current employee should be configured/selected in this step.
(4) Select preferences: quick learning, only main data, deep learning.
(5) System checks the necessary levels of all skills for the selected competence and final level of competence.
(6) System checks user preferences and select corresponding courses. There are such proposed preferences to be selected: *quick learning* – there are only courses that have time frames less than 1 (system has 3 levels of time: 1 – minimum time, 3 – maximum time) and with importance level more than 2 (system has 5 levels of importance: 1 – minimum importance, 5 –

maximum importance); *deep learning* – all courses that user don't have knowledge and experience; *only main data* – all courses with importance more than 2.

(7) System gives the user a list of courses (generated according to preferences) that are necessary for the selected competence and selected level of competence, current level of knowledge and skills.

(8) After running the course by user system updates the levels of knowledge and the statistics about ran courses are saved into database. Then for the future quizzes (when new competence is selected to improve knowledge and skills) user will not be asked about levels of knowledge and skills that are already stored in database. So the system will know about what user has already known and what he should learn additionally.

Quality metrics. A designed adaptive learning system should provide such benefits as minimizing time to support the training of each employee (by avoiding extra time of mentors' support), improving the content provided to a particular user according to the employee preferences, matching employees' competencies to European standards (e-CF [7–9] and SFIA [10]).

Also, according to business statistics [12], automation of training and training systems should increase such indicators as employee satisfaction, productivity and performance of work commitments [12].

Conclusions and Future Work. In this paper some existing approaches for training systems were described and main functionality of such systems was analyzed.

The proposed approach is based on the combined usage of the competence framework e-CF [7–9], skills framework SFIA [10] and LAOS model [11] as the base of architectural structure.

The proposed algorithm allows creating of adaptive training for every employee based on selected competence, current levels of knowledge and skills, the start and the aim competence levels. Also the adaptation algorithm should be configurable by preferences that give opportunity to manipulate the time of achieving the aim competence level, the depth of knowledge. Owing to the fact of using recognized frameworks as e-CF [7–9] and SFIA [10] training track for every person should be built with all necessary skills and knowledge courses.

Future work concerns final implementation of prototype of the proposed tool, as well as creating improved adaptive algorithm to achieve necessary levels of competence skills and knowledge. This tool should be tested to meet quality levels that are necessary for such types of systems.

References

1. *Пупков К. А.* Методы классической и современной теории автоматического управления / *К. А. Пупков, Н. Д. Егупов*. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.
2. *Растригин Л. А.* Адаптация сложных систем / *Л.А. Растригин*. – Рига : Зинатне, 1981. – 375 с.
3. *Рыбина Г. В.* Обучающие интегрированные экспертные системы: некоторые итоги и перспективы / *Г. В. Рыбина* // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2008. – № 1. – С. 22–46.
4. *Растригин Л. А.* Адаптивное обучение с моделью обучаемого / *Л.А. Растригин*. – Рига : Зинатне, 1988. – 160 с.
5. *Zvi Dror, Dr. Josef Ben-Ezra, Yehuda Holtzman, Luca Bercovici, Misty Remington, Sandy Erez, Sagi Dror, Tal Cohen.* Explore Gate/ *Zvi Dror, Dr. Josef Ben-Ezra, Yehuda Holtzman, Luca Bercovici, Misty Remington, Sandy Erez, Sagi Dror, Tal Cohen*. – 2013. – Available at : https://www.exploregate.com. – Date of reference : 10 of October 2017.
6. *Elearnit, Joint Technologies, Purple Network, Grifo Multimedia.* Forma LMS / *Elearnit, Joint Technologies, Purple Network, Grifo Multimedia*. – 2017. – Available at : https://www.exploregate.com.– Date of reference : 15 of October 2017.
7. *CEN* European e-Competence Framework / *CEN*. – 2016. – Available at : http://www.ecompetences.eu/methodology – Date of reference : 03 of November 2017.
8. *CEN* European e-Competence Framework 3.0. A Common European Framework for ICT Professionals in all industry sectors. / *CEN* – CWA 16234, 2014. – Part 1.
9. *CEN* European e-Competence Framework 3.0. A Common European Framework for ICT Professionals in all industry sectors. / *CEN* – CWA 16234, 2014. – Part 2.
10. *Adam Thilthorpe, Michelle Richmond, Mark Lillycrop, Dean Cascar, Robert Deri, Ian Seward, Lucy Ryan* SFIA Foundation / *Adam Thilthorpe, Michelle Richmond, Mark Lillycrop, Dean Cascar, Robert Deri, Ian Seward, Lucy Ryan*. – 2003 – 2007. – Available at : https://www.sfia-online.org. – Date of reference : 11 of October 2017.
11. *Alexandra C., Paul De Bra, Daniel B., Stefano C., Hugh Charles D.* Interfacing adaptive solutions with corporate training systems / *Alexandra Cristea, Paul De Bra, Daniel Burgos, Stefano Ceri, Hugh Charles Davis* // ProLearn Network of Excellence (IST 507310). – 2006. – Deliverable 1.9.
12. *Ellis P. F., Mackie B., Kuznia K. D.* Corporate e-Learning impact on employees / *P. F. Ellis, B. Mackie, K. D. Kuznia* // Global journal of business research. – 2014. – № 4.

References (transliterated)

1. Pupkov K. A., Egupov N.D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern theory of automatic control].Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2004. 784 p.
2. Rastrigin L. A. *Adaptatsiya slozhnykh sistem* [Adaptation of complex systems]. Riga, Zinatne, 1981. 375 p.
3. Rybina G. V. Obuchayushchie integrirovannye ekspertnye sistemy: nekotorye itogi i perspektivy [Educational Integrated Expert Systems: Some Results and Prospects]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy*. 2008, no. 1, pp. 22–46.
4. Rastrigin L. A. *Adaptivnoe obuchenie s model'yu obuchaemogo* [Adaptive training with the model of the trainee]. Riga, Zinatne, 1988. 160 p.
5. Zvi Dror, Dr. Josef Ben-Ezra, Yehuda Holtzman, Luca Bercovici, Misty Remington, Sandy Erez, Sagi Dror, Tal Cohen. *Explore Gate* [Explore Gate]. Available at: https://www.exploregate.com. (accessed 10.10.2017)
6. Elearnit, Joint Technologies, Purple Network, Grifo Multimedia. *Forma LMS* [Forma LMS]. Available at : https://www.exploregate.com. (accessed 15.10.2017)
7. CEN *European e-Competence Framework* [European e-Competence Framework]. Available at : http://www.ecompetences.eu/methodology (accessed 03.11.2017)
8. CEN *European e-Competence Framework 3.0. A Common European Framework for ICT Professionals in all industry sectors* [European e-Competence Framework 3.0. A Common European Framework for ICT Professionals in all industry sectors.]. CWA 16234, 2014. Part 1.
9. CEN *European e-Competence Framework 3.0. A Common European Framework for ICT Professionals in all industry sectors* [European e-Competence Framework 3.0. A Common European Framework for ICT Professionals in all industry sectors.]. CWA 16234, 2014. Part 2.
10. Adam Thilthorpe, Michelle Richmond, Mark Lillycrop, Dean Cascar, Robert Deri, Ian Seward, Lucy Ryan *SFIA Foundation* [SFIA Foundation]. Available at : https://www.sfia-online.org. (accessed 11.10.2017)
11. Alexandra C., Paul De Bra, Daniel B., Stefano C., Hugh Charles D. Interfacing adaptive solutions with corporate training systems

[Interfacing adaptive solutions with corporate training systems]. *ProLearn Network of Excellence (IST 507310)* [ProLearn Network of Excellence (IST 507310)]. Welfengarten, 2006, Deliverable 1.9.

12. Ellis P. F., Mackie B., Kuznia K. D. Corporate e-Learning impact on employees [Corporate e-Learning impact on employees]. *Global journal of business research* [Global journal of business research]. Ashford, 2014, vol. 8, no. 4.

Received 17.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Adaptive training system for IT-companies personnel: design principals, architectural models and implementation technology / V. E. Sokol, M. V. Tkachuk, Y. M. Vasetska // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 38–43. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Адаптивная система тренингов персонала ИТ-компаний: принципы проектирования, архитектурные модели и технология реализации / В. Е. Сокол, Н. В. Ткачук, Я. Н. Васецкая // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 38–43. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Adaptive training system for IT-companies personnel: design principals, architectural models and implementation technology / V. E. Sokol, M. V. Tkachuk, Y. M. Vasetska // Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 51 (1272). – P. 38–43. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сокол Володимир Євгенович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Програмна інженерія та інформаційні технології управління»; тел.: (096) 491-69-61; e-mail: vlad.sokol@gmail.com.

Сокол Владимир Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Программная инженерия и информационные технологии управления»; тел.: (096) 491-69-61; e-mail: vlad.sokol@gmail.com.

Sokol Volodymyr Evhenovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Software engineering and information technology management"; tel.: (096) 491-69-61; e-mail: vlad.sokol@gmail.com.

Ткачук Микола В'ячеславович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Програмна інженерія та інформаційні технології управління»; тел.: (057) 7076-086; e-mail: tka@kpi.kharkov.ua.

Ткачук Николай Вячеславович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Программная инженерия и информационные технологии управления»; тел.: (057) 7076-086; e-mail: tka@kpi.kharkov.ua.

Tkachuk Mykola Vyacheslavovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Full Professor at the Department of "Software engineering and information technology management"; tel.: (057) 7076-086; e-mail: tka@kpi.kharkov.ua.

Васецька Яна Миколаївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (099) 611-67-22; e-mail: y.vasetskaya@gmail.com.

Васецкая Яна Николаевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (099) 611-67-22; e-mail: y.vasetskaya@gmail.com.

Vasetska Yana Mykolaivna – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; tel.: (099) 611-67-22; e-mail: y.vasetskaya@gmail.com

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

УДК 658.511.3

A. M. KOPP, D. L. ORLOVSKYI, D. O. KUKA

AN APPROACH TO FORMING DASHBOARDS FOR BUSINESS PROCESSES STATE ANALYSIS

Розглядаються основні особливості панелей індикаторів, їх місце та роль в управлінні бізнес-процесами, основні типи, різноманітні рекомендації з побудови, а також основні інструменти візуалізації. Пропонується підхід до формування панелей індикаторів, призначених для аналізу стану бізнес-процесів. Застосування запропонованого підходу розглядається для аналізу стану бізнес-процесу поставки продукції. В результаті застосування запропонованого підходу був розроблений прототип панелі індикаторів, призначеної для аналізу стану бізнес-процесу поставки продукції.
Ключові слова: управління бізнес-процесами, панель індикаторів, показники ефективності, система шкал, аналіз.

Рассматриваются основные особенности панелей индикаторов, их место и роль в управлении бизнес-процессами, основные типы, различные рекомендации по построению, а также основные инструменты визуализации. Предлагается подход к формированию панелей индикаторов, предназначенных для анализа состояния бизнес-процессов. Применение предложенного подхода рассматривается для анализа состояния бизнес-процесса поставки продукции. В результате применения предложенного подхода был разработан прототип панели индикаторов, предназначенной для анализа состояния бизнес-процесса поставки продукции.
Ключевые слова: управление бизнес-процессами, панель индикаторов, показатели эффективности, система шкал, анализ.

There have been considered basic features of dashboards, their place and role in business process management concept, considered basic dashboards types, considered various recommendations of dashboards construction, and also considered basic visualization tools such as bar and line graphs, pie and scatter charts, bullet graphs and dials. An approach to formation of dashboards, used for the analysis of product supply business process state, has been proposed. Therefore, a set of performance indicators and a related system of scales have been defined. In order to solve the problem of dashboard design which means definition of number, type and place of visualization tools, mathematical models of unbounded and continuous knapsack problems have been applied. As a result of the proposed approach application, a prototype of a dashboard used for the analysis of product supply business process state has been developed.
Keywords: business process management, dashboard, performance indicators, system of scales, analysis.

Introduction. Today Business Process Management (BPM) is a dominate concept of an organizational management. BPM includes a set of methods, techniques, and tools, intended to modeling, execution, and analysis of organization's business processes [1].

Recently, BPM is supported by a set of tools, integrated in order to support business processes life cycle (fig. 1). Hence, business analysts can create business process models which further will be transformed into executable models by IT specialists. Executable process models are deployed in a process engine which is intended to execute processes by delegating tasks to humans and services. Usually the process execution is based on using of Service Oriented Architecture (SOA) concept [2].

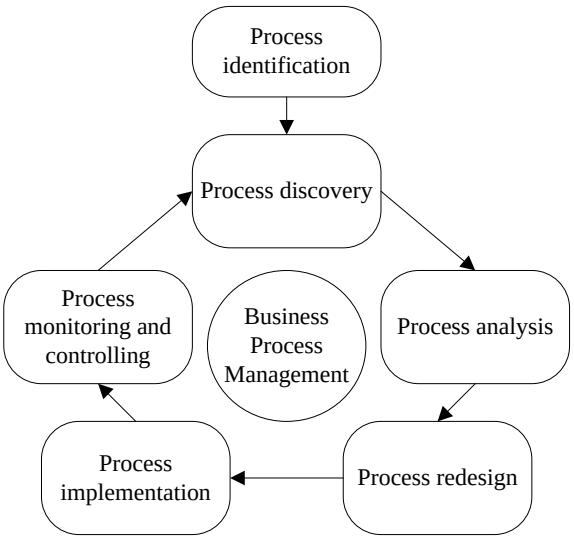


Fig. 1 – BPM lifecycle

An important aspect of BPM lifecycle is continuous analysis of business processes state. It is usually supported by Business Activity Monitoring (BAM) technology which allows performing continuous, literally real-time, business processes monitoring [2].

Therefore analysts define a set of Key Performance Indicators (KPI) and their target values, based on organization's business goals. One of the main features of BAM is presentation of KPIs as dashboards which provide visibility of business performance [2].

Literature review. According to [3], a dashboard is a multilayer application based on business analysis and data integration infrastructure which allows organization performing measurement, monitoring, and business management in more efficient way.

A dashboard allows users tracking organization's performance by comparing actual indicators with indicators defined by a corporate strategy [3].

Difference between dashboards and Balancing Score Cards (BSC) is that dashboards are used to tracking operational business processes, while BSC are used to tracking achievement of analytical and strategic goals [3].

Usually a frequency of data insights depends on business process and how critical data is. Hence there have been defined three types of dashboards: operational, analytical, and strategic (tab. 1) [3, 4].

Table 1 – Dashboard types

Category	Timeline for insights	Update frequency
Strategic	Months or years	Moderate
Operational	Minutes or days	High
Analytical	Minutes to years	Low

Operational level allows users controlling primary business processes: sales, supplies, manufacturing etc. Most of indicators on operational dashboards is repeatedly

© A. M. Kopp, D. L. Orlovskyi, D. O. Kuka, 2017

updating with frequency from several minutes to several hours during the day. Therefore, operational dashboards are focused on monitoring, rather than analysis and management [3].

While the analytical and strategic dashboards are focused on analysis and management, rather than monitoring. The analytical dashboards are intended comparing indicators to plans, forecasts, and results, while the strategic dashboards allow tracking the achievement of the strategic goals and often are based on BSC [3, 4].

Usually, dashboards present KPIs in visual form using diagrams or plain images, for example using images of measuring instruments [3]. Recommendations that allow creating efficient and usable dashboard have been proposed in work [4].

It is necessary to choose data visualization techniques which are clear, easy interpretable, space efficient, attractive, and legible, lead user to the further steps (analysis, decision, action) and allow user performing tasks to achieve its goal (e.g., perform comparisons or monitor performance) [4].

An approach considered in work [5] includes following steps:

- define data and reasons why this data should be measured – it allows interpreting correctly and reusing data in further projects;
- define visualization techniques which allow reducing time that need to understand the data.

Moreover, a dashboard is considered as a system which performing visualization of data which is used for decision making [5].

The most common visualization tools are various graphs and diagrams. Each tool has its own purpose, while some tools are more efficient than others [6, 7]:

- bar graphs;
- line graphs;
- pie charts;
- scatter charts;
- bullet graphs;
- speedometer dials or gauges.

Bar graphs are used to visualize nominal or ordinal scales. Horizontal bar graphs (fig. 2) are considered the most appropriate in a way of information perception [7].

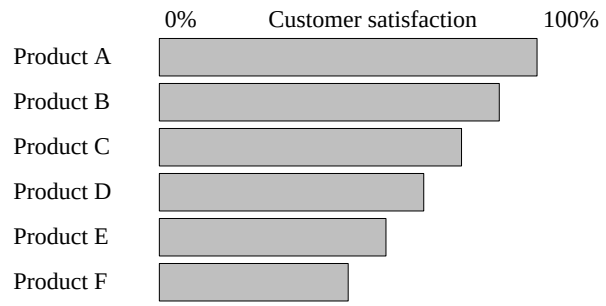


Fig. 2 – Example of a horizontal bar graph

Some bar graphs which are known as grouped bar graphs, allow illustrating more than one measured value, while stacked bar graphs allow illustrating the accumulation effect [6, 7].

Line graphs (fig. 3) are perfect to display time-related data. They are good in illustration of trends, fluctuations, cycles, rates of changes, and allow comparing several sets of time-related data [6].

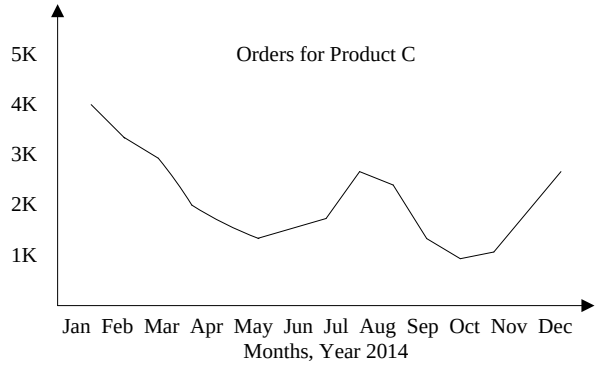


Fig. 3 – Example of a line graph

Pie charts (fig. 4) demonstrate various segments which are presenting data as a percentage of total volume [6]. In most cases bar graphs are better choice, because pie charts are recommended to be used if there are less than six segments. Otherwise they become too complicated for perception of difference between displayed values [7].

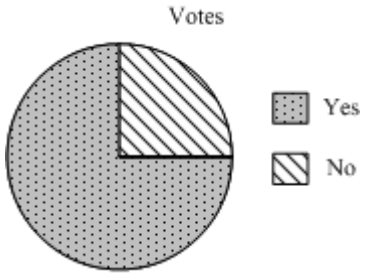


Fig. 4 – Example of a pie chart

To demonstrate the correlation between two datasets, and also illustrate the strength and direction of this relationship, scatter charts are used (fig. 5) [6].

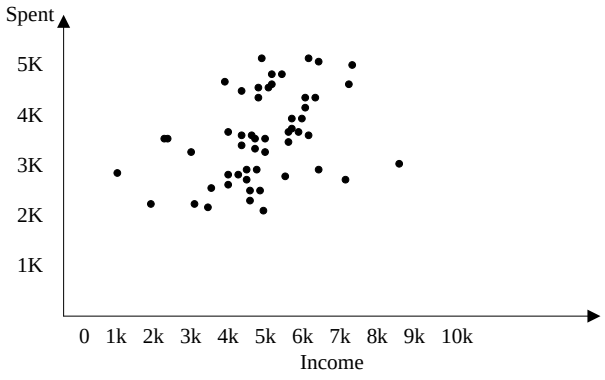


Fig. 5 – Example of a scatter chart

Despite of a huge popularity of speedometer dials (fig. 6) in various KPI reports and dashboards, in most cases their usage isn't appropriate. Unlike the car speed, KPIs are more static and don't increase or decrease continuously in time.

Besides, speedometer dials aren't space efficient and can obstruct the indicators comparison [6]. Authors of works [6, 7] recommend avoiding usage of speedometer dials whenever it's possible.

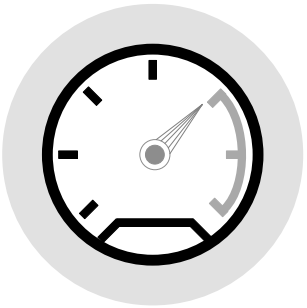


Fig. 6 – Example of a speedometer dial

Bullet graphs (fig. 7) are more appropriate for dashboards than speedometer dials. They have been developed by visualization expert Stephen Few. Bullet graphs are more space efficient, which makes them simple for perception and comparison to other tools [6, 7].

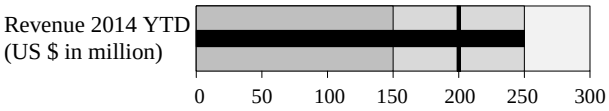


Fig. 7 – Example of a bullet graph

Two main principles which define the choice of one or another visualization tool have been proposed in work [7]:

- it has to be the best tool for displaying the data of a certain type on a dashboard;
- it has to be capable of serving its purpose even when its size is changed in order to place it into the small space.

Besides the recommendations, work [7] considers the basic mistakes of dashboards construction. Errors associated with the choice of inappropriate visualization tools are the most common.

According to the research [8], the prevalence and value for each of the considered visualization tools has been defined (tab. 2).

Table 2 – Prevalence and value of visualization tools

Visualization tools	Prevalence, %	Value, %
Bar graphs	55	53
Line graphs	38	46
Pie charts	8	10
Scatter charts	3	23
Bullet graphs	20	25
Speedometer dials	5	12

Hence, the most prevalent and informative visualization tools used to create dashboards are bar graphs, line graphs, and bullet graphs [8].

Another research [4] also notes that bar graphs, line graphs, and bullet graphs are the most efficient visualization tools which are appropriate for a quick comparison.

Besides the using of efficient visualization tools, it's necessary to use a color codes to draw user's attention to the KPIs values [4, 5, 7]:

- red code illustrates the serious divergence of actual and target values of KPIs and hence necessity of immediate actions;
- green code shows good performance;
- yellow code could be used to display that no actions are required.

Development of the efficient and usable dashboards is necessary to support the analysis of business processes state according to the BPM lifecycle [1, 2].

According to the BPM concept, dashboards should provide users real-time data, using measuring tools that are easy to use and perception [9].

Besides KPIs which are used to measure business processes are often grouped into categories of quality, time, flexibility, and cost [10]. It's recommended to use considered visualization tools, such as bar graphs, line graphs etc, to illustrate KPIs values of each category [4, 8].

Four types of KPIs with recommended visualization tools have been considered according to the best practices of dashboards design [11]:

- quantitative – bar graphs;
- directional – line graphs, scatter charts;
- actionable – bullet graphs, speedometer dials;
- distribution – pie charts.

Most of BPM systems provide business process monitoring. They allow obtaining data about business process events. BAM tools allow using simulation techniques or Business Intelligence (BI) to extract patterns from data and display information using real-time dashboards [12].

Real-time Event Processing which is base of BAM concept allows timely processing and reacting to critical KPIs changes [10].

According to a research [12], organizations are interested in application of business processes monitoring. The interest which declined in 2013 began to grow again (fig. 8). Of the 116 organizations that participated in the survey in 2016, 20 organizations are already using and another 15 are planning to use dashboards to monitor business process performance.

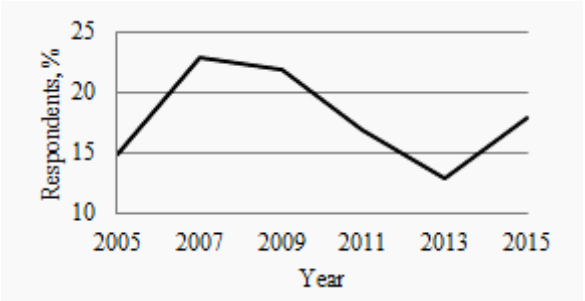


Fig. 8 – Organizations interested in process monitoring

Therefore, the problem of the dashboard design, which is intended for the analysis of organizational business processes state, becomes relevant. It requires

placing various visualization tools in a small space, while keeping it accessible and easy to understand.

Formulation of the problem. The research goal is to develop an approach to forming dashboards which are intended to analyze business processes state.

To accomplish the goal, the following tasks should be considered:

- to choose a business process which state is supposed to be analyzed, and its KPIs;
- to define a system of scales that will be used to measure the KPIs in order to analyze the business process state;
- to choose the mathematical models intended to solve the problem of the dashboard design, which allow defining the number, types and placement of the visualization tools.

An approach to forming dashboards for business processes state analysis. One of the primary organizational business processes which requires continuous monitoring and enhancement, is the products supply process. There have been accumulated a lot of experience in order to solve such problems, which has to be analyzed and applied considering features of the specific enterprise. Using of reference models is one of such approaches [13].

Today SCOR (Supply-Chain Operations Reference) is an international inter-industrial standard of supply chains planning and management. It defines three levels of processes and related KPIs (fig. 9). First level is used for diagnostics of the supply chain state. Second level includes indicators are used to diagnosis of the first level's processes. Third level includes indicators are used to diagnosis of the second level's processes respectively. Analysis of indicators through these three levels allows defining business processes that have to be considered more detailed [13, 14].

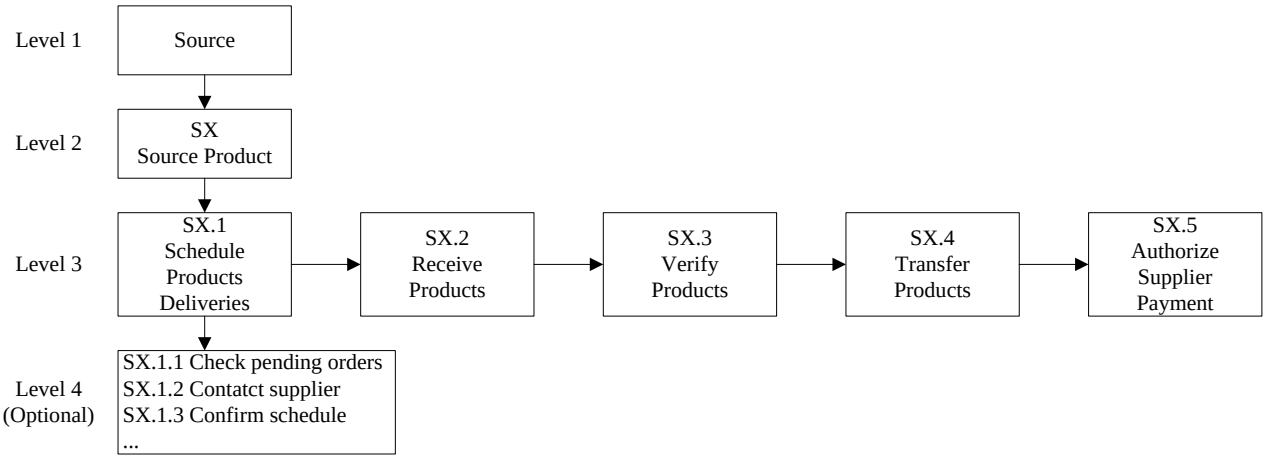


Fig. 9 – Supply process according to the SCOR model

According to the SCOR model, the products supply process is measured by following second-level KPIs [13, 14]:

- cost to supply CtS;
- supply cycle time SCT;
- percentage of supplies delivered in full $OSF_{\%}$;
- percentage of supplies delivered in time $OST_{\%}$.

Hence, the cost to supply indicator CtS is decomposed to following third-level indicators [13]:

- cost to schedule product deliveries $CoSS$ (about 12 % of CtS);
- cost to receive products $CoRS$ (about 26 % of CtS);
- cost to verify products $CoVS$ (about 10% of CtS);
- cost to transfer products $CoTS$ (about 46% of CtS);
- cost to authorize supplier payment $CoASP$ (about 6% of CtS).

In its turn, supply cycle time SCT is decomposed to following third-level indicators [13]:

- time to schedule product deliveries $SSCT$;
- time to receive products $RSCT$;
- time to verify products $VSCT$;
- time to transfer products $TSCT$;
- time to authorize supplier payment $ASPCT$.

Structure of the products supply business process can be changed according to requirements of the specific organization, considering its KPIs [13].

Formally, measurement of the business processes KPIs includes determination of the sign system corresponding to the measured KPIs. Thus, the scale of measure can be defined as a tuple [15]:

$$< \text{KPI}, f, Y >, \quad (1)$$

here $\text{KPI} = \{x_1, x_2, \ldots, x_n, R_x\}$ – the indicator that includes the set of attributes x_i, $i = \overline{1,n}$ with the ratio R_x is determined according to the measurement purposes;

$Y = \{f(x_1), f(x_2), \ldots, f(x_n), R_y\}$ – the system with the ratio R_y which is mapping the KPI to the numerical system corresponding to the measured indicator;

$f(x)$ – the function which is determining correspondence between the KPI and Y.

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

During the measurement of business process KPI it is necessary to map the attributes $x_i \in X$ and numbers characterizing these attributes.

Types of scales (1) are determined using the set of allowable transformations $x_i \to y_i$, $i = \overline{1,n}$. According to the scales of measurement classification, there are several types of scales [16]:

- nominal;
- ordinal;
- interval and ratio;
- absolute.

To measure the cost to supply CtS and the supply cycle time SCT it's necessary to use ratio scales which are invariant related to the linear transformations [15, 16]:

$$f_{\text{linear}}(x) = a \cdot x,$$
$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{f_{\text{linear}}(x_1)}{f_{\text{linear}}(x_2)} = \frac{a \cdot x_1}{a \cdot x_2} = \text{const}, \quad (2)$$

here $x \in Y$ – the scaling values from the definition area Y;

a – the real number, $a > 0$.

To measure the percentage of supplies delivered in full $\text{OSF}_{\%}$ and the percentage of supplies delivered in time $\text{OST}_{\%}$ it's necessary to use absolute scales which are invariant related to the invariant transformations [15, 16]:

$$f_{\text{identic}}(x) = \{e\}, e(x) = x. \quad (3)$$

Thus, the following system of scales will be used to measure KPIs of products supply business process:

$$\begin{aligned} &\{< \text{CtS}, f_{\text{linear}}(x) = a_{\text{CtS}} \cdot x, Y_{\text{CtS}} >, \\ &< \text{SCT}, f_{\text{linear}}(x) = a_{\text{SCT}} \cdot x, Y_{\text{SCT}} >, \\ &< \text{OSF}_{\%}, f_{\text{identic}}(x) = \{e\}, Y_{\text{OSF}_{\%}} >, \\ &< \text{OST}_{\%}, f_{\text{identic}}(x) = \{e\}, Y_{\text{OST}_{\%}} >\}. \end{aligned} \quad (4)$$

For example, the conversion of minutes to hours when measuring the supply cycle time SCT will be performed according to the linear transformation $f_{\text{linear}}(x)$, where the $a_{\text{SCT}} \approx 0{,}0167$. For the measurement of the percentage of supplies delivered in full $\text{OSF}_{\%}$, x are integers (3).

If the measurement of KPIs requires obtaining aggregated information, the average could be calculated for the homogeneous characteristics y_i, $i = \overline{1,n}$, calculated in the same scale of measure [15]:

$$y_{\text{average}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i. \quad (5)$$

Event Processing allows processing and reacting to the critical changes of KPIs in a timely manner, using the mapping between the $f(x)$ and Y. Each event belongs to the specific process definition (model) and correspondent process instance [10].

To perform continuous monitoring of the KPIs of the products supply process, which is based on the system of scales (4) and Event Processing, it's necessary to design the correspondent dashboard.

As was noted, the main problem of the dashboard design is placing various visualization tools in a small space, while keeping it accessible and easy to understand [7]. The visualization tools considered above should be used to display information on the dashboard. Prevalence and informativeness values have been defined in the study [8] for each of the considered visualization tools.

It has been also recommended to place all the visualization tools used on the dashboard into the space that suites to the size of a single screen [17].

Usually space becomes a deficit resource due to an unavoidable growth of the processed KPIs amount. This problem could be formalized using the Knapsack Problem with the space as the limited resource and informativeness of the visualization tools as the cost [18].

Therefore to solve the dashboard design problem a following mathematical model has been proposed:

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{n} v_i x_i \to \max, \\ &\sum_{i=1}^{n} s_i x_i \le S, \\ &x_i \ge 0, i = \overline{1,n}, \end{aligned} \quad (8)$$

here n – the number of the visualization tools that could be used to design the dashboard;

S – the percentage of the workspace that could be used to place the visualization tools, $S \in [0,1]$;

s_i – the percentage of the workspace, required to place the i th visualization tool, $s_i \in [0,1]$, $i = \overline{1,n}$;

v_i – the informativeness of the i th visualization tool, $v_i \in [0,1]$, $i = \overline{1,n}$;

x_i – the amount (integer value) of instances of the i th visualization tool that has been chosen to design the dashboard.

Each of the n visualization tools can be picked multiple times in order to design the dashboard.

The problem (8) can be solved as the Unbounded Knapsack Problem using the dynamic programming technique [19].

The informativeness values v_i for each of the considered visualization tool (tab. 3) have been obtained using the results of the study [8].

Table 3 – Value and informativeness of visualization tools

Visualization tools	Value, %	Informativeness, v_i
Bar graphs	53	0,53
Line graphs	46	0,46
Pie charts	10	0,10
Scatter charts	23	0,23
Bullet graphs	25	0,25
Speedometer dials	12	0,12

The values S and s_i should be defined according to a project features and capabilities of the software and devices used to design the dashboard.

The proposed mathematical model (8) is universal and could be used to provide recommendations in order to design the dashboard intended for the analysis of various business processes state.

Approbation of research results. To solve the problem of the dashboard design, which is intended to the analysis of the products supply process state, the second-level KPIs of the SCOR reference model (7) are used.

According to the recommendations [11], the CtS and SCT indicators could be displayed using the following visualization tools:

- bar graph – x_1;
- line graph – x_2.

While the $OSF_{\%}$ and $OST_{\%}$ indicators could be displayed using the following visualization tools:

- pie chart – x_3;
- bullet graph – x_4;
- speedometer dial – x_5.

Thus, the proposed model (8) should be completed with the following bounds:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 &= 2, \\ x_3 + x_4 + x_5 &= 2. \end{aligned} \tag{9}$$

Considering usage of an 80% of the screen space to place the dashboard visualization tools (considering S = 0,8), while the others 10% are using to place the dashboard toolbar, and the s_i values based on the recommendations [4, 6, 7], the solving of the problem (8) with the bounds (9) respectively has given the following results (tab. 4).

Table 4 – Obtained results

i	Visualization tools	Size, s_i	Amount, x_i^*
1	Bar graphs	0,35	1
2	Line graphs	0,25	1
3	Pie charts	0,20	0
4	Bullet graphs	0,10	2
5	Speedometer dials	0,20	0

Thus, the bar graph and line graph could be used to display the CtS and SCT indicators, while the two bullet graphs could be used to display the $OSF_{\%}$ and $OST_{\%}$ indicators respectively (fig. 10).

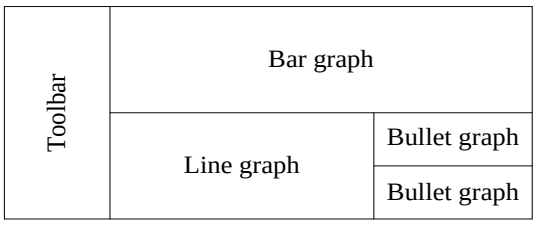


Fig. 10 – Dashboard structure according to the results in tab. 4

Existing BAM and BI solutions [10, 12] provide users with the flexible dashboards customization, including the placing and sizing options.

Therefore, to take the account of these features, the proposed mathematical model (8) should be transformed in the following manner:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n} v_i y_i &\to \max, \\ \sum_{i=1}^{n} s_i y_i &\le S, \\ 0 \le y_i &\le 1,\ i = \overline{1,n}, \end{aligned} \tag{10}$$

here y_i – the amount of instances of the i th visualization tool (real value) that has been chosen to design the dashboard.

This problem (10) can be solved as the Continuous Knapsack Problem using the Greedy algorithm that allows obtaining optimal solution in that case [19].

Thus, the transformed model (10) should be completed with the following bounds:

$$\begin{aligned} y_1 + y_2 &> 0, \\ y_3 + y_4 + y_5 &> 0. \end{aligned} \tag{11}$$

As a result of solving the problem (10) with the bounds (11) and the same input conditions, the following results have been obtained (tab. 5).

Table 5 – Obtained results for the modified model

i	Visualization tools	Size, s_i	Amount, y_i^*
1	Bar graphs	0,35	1,0
2	Line graphs	0,25	1,0
3	Pie charts	0,20	0,0
4	Bullet graphs	0,10	1,0
5	Speedometer dials	0,20	0,5

According to the results, obtained as a result of solving problem (10) with bounds (11), bullet graph and speedometer dial, which is reduced in size by 50%, could be used to display the $OSF_{\%}$ and $OST_{\%}$ indicators respectively (fig. 11).

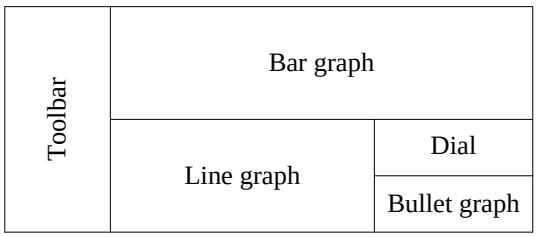


Fig. 11 – Dashboard structure according to the results in tab. 5

However according to the recommendations [6, 7], using of bullet graph instead of speedometer dial is more informative, which is confirmed by the objective function values of the problems (8) and (10):

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

$$\sum_{i=1}^{5} v_i x_i^* = 1,49 > \sum_{i=1}^{5} v_i y_i^* = 1,3, \qquad (12)$$

here x_i^* – the i th element of the problem's (8) optimal solution vector;

y_i^* – the i th element of the problem's (10) optimal solution vector.

Thus, to design the dashboard which is intended for the analysis of the products supply process state, the following visualization tools are recommended according to the obtained results (12):

- bar graph to display CtS indicator;
- line graph to display SCT indicator;
- two bullet graphs to display the $OSF_{\%}$ and $OST_{\%}$ indicators respectively.

A prototype of the designed dashboard (fig. 12) has been developed using Microsoft Power BI according to the obtained recommendations.

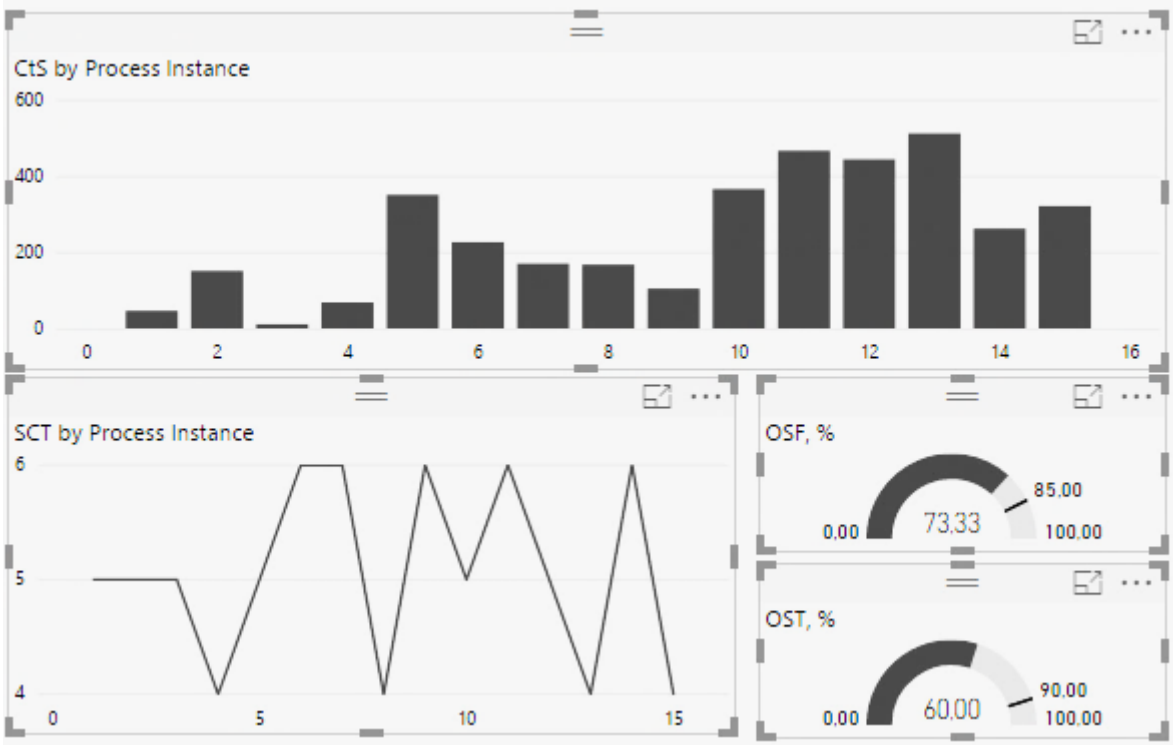


Fig. 12 – Dashboard prototype

To compare (tab. 6) the designed dashboard to the existing solutions presented on market, we have used the supply chain dashboard examples (fig. 13) provided by the online dashboard platform Klipfolio [20]:

- "Supply Chain KPI Dashboard" which contains the line graph, bar graph, and pie chart;
- "Shipping Status Dashboard" which contains the bar graph and pie chart;
- "Warehouse Order Performance Dashboard" which contains the bar graph, line graph, and speedometer dial.

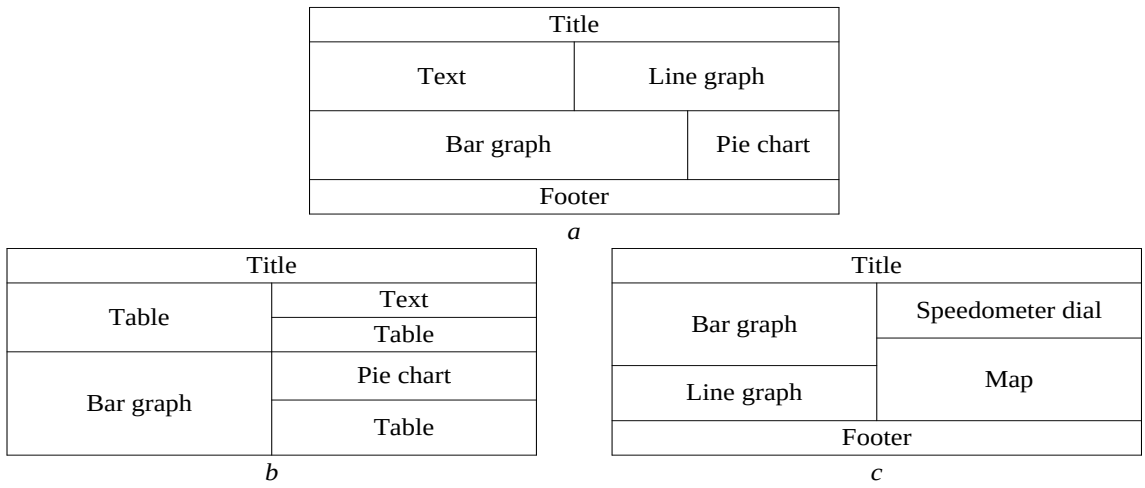


Fig. 13 – Structure of Klipfolio supply chain dashboard examples:
a – "Supply Chain KPI Dashboard"; *b* – "Shipping Status Dashboard"; *c* – "Warehouse Order Performance Dashboard"

Table 6 – Comparison of dashboard solutions

Rank	Dashboard solutions	Objective function
1	Proposed design	1,49
2	Whs. Order Performance	1,11
3	Supply Chain KPI	1,09
4	Shipping Status	0,63

According to the objective function (8) values, the proposed dashboard design (fig. 12) is more informative than supply chain dashboard examples provided by the Klipfolio.

Additional visualization tools and formal approaches used to solve the dashboard design problem will be considered in future research on this problem.

Conclusion. As the result of this study, the approach to forming dashboards which are intended to analyze business processes state, has been developed.

As a business process which state is supposed to be analyzed, we have chosen the products supply process and its second-level KPIs according to the reference SCOR model.

To measure the KPIs in order to analyze the products supply process state, we have defined the system of scales which includes the ratio scales used to measure the cost to supply and the supply cycle time as well as the absolute scales used to measure the percentage of supplies delivered in full and the percentage of supplies delivered in time.

To solve the problem of the dashboard design, we have chosen the mathematical models represented the Unbounded and Continuous Knapsack Problems, which allowed defining the number, types, and placement of the visualization tools.

As a result of the proposed approach application, the prototype of the dashboard which is intended to analyze the products supply process state has been developed.

References

1. *Weske M.* Business process management: concepts, languages, architectures / *M. Weske.* – Springer Publishing Company, Incorporated, 2010. – 368 p.
2. *Wetzstein B.* Monitoring and analyzing influential factors of business process performance / *B. Wetzstein [et al.].* // Enterprise Distributed Object Computing Conference, 2009. EDOC'09. IEEE International. – IEEE, 2009. – P. 141–150.
3. *Eckerson W. W.* Performance dashboards: measuring, monitoring, and managing your business / *W. W. Eckerson.* – John Wiley & Sons, 2010. – 321 p.
4. *Pappas L.* Riding the technology wave: Effective dashboard data visualization / *L. Pappas, L. Whitman* //Human Interface and the Management of Information. Interacting with Information. – 2011. – P. 249–258.
5. *Janes A.* Effective dashboard design / *A. Janes, A. Sillitti, G. Succi* // Cutter IT Journal. – 2013. – Vol. 26. – Issue 1. – P. 17–24.
6. *Marr B.* Key performance indicators for dummies / *B. Marr.* – John Wiley & Sons, 2015. – 320 p.
7. *Few S.* Information dashboard design / *S. Few.* – O'Reilly Media, 2006. – 211 p.
8. *Eckerson W.* Visual Reporting and Analysis: Seeing Is Knowing: Asset Page / *W. Eckerson, M. Hammond* // TDWI-The Data Warehousing Institute, 2011. – 24 p.
9. Data mining methods and applications / *ed. K. D. Lawrence, S. Kudyba, R. K. Klimberg.* – CRC Press, 2007. – 336 p.
10. *Vera-Baquero A.* Real-time business activity monitoring and analysis of process performance on big-data domains / *A. Vera-Baquero, R. Colomo-Palacios, O. Molloy* // Telematics and Informatics. – 2016. – Vol. 33. – Issue 3. – P. 793–807.
11. *Briggs J.* Management reports & dashboard best practice / *J. Briggs* // Target Dashboard. Retrieved, 2013. – 18 p.
12. *Harmon P.* The state of business process management 2016 / *P. Harmon, C. Wolf* // Business process trends, 2016. – 50 p.
13. *Орловський Д. Л.* Про один підхід до формування рекомендацій щодо удосконалення бізнес-процесів, пов'язаних з постачанням продукції / *Д. Л. Орловський, А. М. Конп* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 55. – С. 32–41.
14. *Council S. C.* Supply Chain Operations Reference Model Revision 11.0 / *S. C. Council* // Washington, DC : APICS, 2012. – 976 p.
15. *Соловьев Н. А.* Основы теории принятия решений для программистов / *Н. А. Соловьев, Е. Н. Чернопрудова, Д. А. Лесовой.* – Litres, 2012. – 187 с.
16. *Новиков Н. Ю.* Теория шкал: Принципы построения эталонных процедур измерения, кодирования и управления / *Н. Ю. Новиков.* – Fizmatlit, 2009. – 502 с.
17. *Ashwini G. S.* Designing a dashboard for sales enhancement using KPI's / *G. S. Ashwini, B. Manjuprasad, B. S. Sarath* // National Level PG Project Symposium On Electronics & Communication, Computer Science. – Mysuru, 2016. – P. 1–5.
18. Building intuition: insights from basic operations management models and principles / *ed. D. Chhajed, T. J. Lowe.* – Springer Science & Business Media, 2008. – 186 p.
19. *Kellerer H.* Introduction to NP-Completeness of knapsack problems / *H. Kellerer, U. Pferschy, D. Pisinger* // Knapsack problems. – Springer Berlin Heidelberg, 2004. – P. 483–493.
20. Supply Chain Dashboard Examples. – Available at : https://www.klipfolio.com/resources/dashboard-examples/supply-chain. – Accessed : 20 october 2017.

References (transliterated)

1. Weske M. *Business process management: concepts, languages, architectures.* Springer Publishing Company, Incorporated, 2010. 368 p.
2. Wetzstein B., Leitner P., Rosenberg F., Brandic I., Dustdar S., Leymann F. Monitoring and analyzing influential factors of business process performance. *Enterprise Distributed Object Computing Conference, 2009. EDOC'09. IEEE International.* IEEE, 2009, pp. 141–150.
3. Eckerson W. W. *Performance dashboards: measuring, monitoring, and managing your business*. John Wiley & Sons, 2010. 321 p.
4. Pappas L., Whitman, L. Riding the technology wave: Effective dashboard data visualization. *Human Interface and the Management of Information. Interacting with Information*, 2011, pp. 249–258.
5. Janes A., Sillitti A., Succi G. Effective dashboard design. *Cutter IT Journal*. 2013, vol. 26, no. 1, pp. 17–24.
6. Marr B. *Key performance indicators for dummies*. John Wiley & Sons, 2015. 320 p.
7. Few S. *Information dashboard design*. O'Reilly Media, 2006. 211 p.
8. Eckerson W., Hammond M. *Visual Reporting and Analysis: Seeing Is Knowing: Asset Page*. TDWI-The Data Warehousing Institute, 2011. 24 p.
9. Lawrence K. D., Kudyba S., Klimberg R. K., ed. *Data mining methods and applications*. CRC Press, 2007. 336 p.
10. Vera-Baquero A., Colomo-Palacios R., Molloy O. Real-time business activity monitoring and analysis of process performance on big-data domains. *Telematics and Informatics*. 2016, vol. 33, no. 3, pp. 793–807.
11. Briggs J. *Management reports & dashboard best practice*. Target Dashboard. Retrieved, 2013. 18 p.
12. Harmon P., Wolf C. *The state of business process management*. Business process trends, 2008. 50 p.
13. Orlovskyi D. L., Kopp A. M. Pro odyn pidkhid do formuvannya rekomendatsiy shchodo udoskonalennya biznes-protsesiv, pov'yazanykh z postachannyam produktsiyi [About the approach to the development of recommendations for the improvement of business processes related to supply of products]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"], Kharkiv, 2014, no. 55, pp. 32–41.
14. Council S. C. *Supply Chain Operations Reference Model Revision 11.0.* Washington, DC: APICS, 2012. 976 p.

15. Solov'ev N. A., Chernoprudova E. N., Lesovoj D. A. *Osnovy teorii prinjatija reshenij dlja programmistov* [Fundamentals of decision theory for programmers]. Litres, 2012. 187 p.
16. Novikov N. Ju. *Teorija shkal: Principy postroenija jetalonnyh procedur izmerenija, kodirovanija i upravlenija* [Theory of Scales: Principles for the construction of reference procedures for measurement, coding and control]. Fizmatlit, 2009. 502 p.
17. Ashwini G. S., Manjuprasad B., Sarath B. S. Designing a dashboard for sales enhancement using KPI's. *Mysuru: National Level PG Project Symposium On Electronics & Communication, Computer Science*. 2016, pp. 1–5.
18. Chhajed D., Lowe T. J., ed. *Building intuition: insights from basic operations management models and principles*. Springer Science & Business Media, 2008. 186 p.
19. Kellerer H., Pferschy U., Pisinger D. Introduction to NP-Completeness of knapsack problems. *In Knapsack problems*. Springer Berlin Heidelberg, 2004, pp. 483–493.
20. *Supply Chain Dashboard Examples*. Available at: https://www.klipfolio.com/resources/dashboard-examples/supply-chain. (accessed 20.10.2017)

Received 23.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Про один підхід до формування панелей індикаторів для аналізу стану бізнес-процесів / А. М. Копп, Д. Л. Орловський, Д. О. Кука // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 44–52. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-0023.

Об одном подходе к формированию панелей индикаторов для анализа состояния бизнес-процессов / А. М. Копп, Д. Л. Орловский, Д. А. Кука // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 44–52. – Библиогр.: 20 назв. – ISSN 2079-0023.

An approach to forming dashboards for business processes state analysis / A. M. Kopp, D. L. Orlovskyi, D. O. Kuka // Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 51 (1272). – P. 44–52. – Bibliogr.: 20. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Копп Андрій Михайлович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; тел.: (093) 796-09-54; e-mail: kopp93@gmail.com.

Копп Андрей Михайлович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; тел.: (093) 796-09-54; e-mail: kopp93@gmail.com.

Kopp Andrii Mykhailovych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Postgraduate Student at the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; tel.: (093) 796-09-54; e-mail: kopp93@gmail.com.

Орловський Дмитро Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; тел.: (050) 301-64-33; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua.

Орловский Дмитрий Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; тел.: (050) 301-64-33; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua.

Orlovskyi Dmytro Leonidovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; tel.: (050) 301-64-33; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua.

Кука Данило Олександрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; тел.: (098) 973-68-42; e-mail: danbkabest805@gmail.com.

Кука Даниил Александрович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; тел.: (098) 973-68-42; e-mail: danbkabest805@gmail.com.

Kuka Danylo Oleksandrovych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Student at the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; tel.: (098) 973-68-42; e-mail: danbkabest805@gmail.com.

УДК 004.82

С. Ф. ЧАЛИЙ, І. В. ЛЕВИКІН

МЕТОДИ ДИНАМІЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТІВ ДОСТУПУ ДО РЕСУРСІВ В ЗАДАЧАХ ПРЕЦЕДЕНТНОГО УПРАВЛІННЯ НАСКРІЗНИМИ БІЗНЕС-ПРОЦЕСАМИ

В роботі розглянуто проблему прецедентного управління множиною наскрізних бізнес-процесів. Показано, що реалізація прецедентного управління потребує упорядкування доступу до ресурсів шляхом визначення пріоритетів для дій цих процесів. Запропоновано методи динамічного визначення пріоритетів доступу до ресурсів. Перший метод призначений для визначення пріоритетів доступу до ресурсів для наскрізних БП без урахування обмежень на час їх виконання. Метод дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів підприємства шляхом мінімізації сумарного часу очікування кожного з цих ресурсів.Другий метод направлений на корегування пріоритетів доступу до ресурсів для наскрізних БП з урахуванням обмежень на час їх виконання. Метод враховує абсолютне значення відхилення прогнозуємого строку виконання кожного бізнес-процесу від запланованого, та послідовно коригує пріоритети доступу до ресурсів для окремих дій кожного процесу з тим, щоб зменшити вказане відхилення.

Ключові слова: наскрізний бізнес-процес, процесне управління, ресурси, інтервал очікування.

В работе рассмотрена проблема прецедентного управления множеством сквозных бизнес-процессов. Показано, что реализация прецедентного управления требует упорядочения доступа к ресурсам путем определения приоритетов для действий этих процессов. Предложены методы динамического определения приоритетов доступа к ресурсам. Первый метод предназначен для определения приоритетов доступа к ресурсам для сквозных БП без учета ограничений на время их выполнения. Метод позволяет повысить эффективность использования ресурсов предприятия путем минимизации суммарного времени ожидания каждого из этих ресурсов. Второй метод направлен на корректировку приоритетов доступа к ресурсам для сквозных БП с учетом ограничений на время их выполнения. Метод учитывает абсолютное значение отклонения прогнозируемого срока выполнения каждого бизнес-процесса от запланированного, и последовательно корректирует приоритеты доступа к ресурсам для отдельных действий каждого процесса с тем, чтобы уменьшить указанное отклонение.

Ключевые слова: сквозной бизнес-процесс, процессное управление, ресурсы, интервал ожидания.

The paper considers the problem of precedent management of a set of cross-cutting business processes. It has been shown that the implementation of case management requires streamlining of access to resources by identifying priorities for the actions of these processes. The methods of dynamic determination of priorities of access to resources are offered. The first method is intended to determine the priorities of access to resources for cross-border BP without taking into account the restrictions at the time of their implementation. The method allows to increase the efficiency of using enterprise resources by minimizing the total waiting time for each of these resources. The second method is aimed at adjusting the priorities of access to resources for cross-cutting BP, taking into account restrictions at the time of their implementation. The method takes into account the absolute value of the deviation of the predicted runtime of each business process from the planned time and consistently adjusts the resource access priorities for individual actions of each process in order to reduce the specified deviation.

Keywords: business process, process management, resources, wait intervals.

Вступ. Процесний підхід до управління пов'язаний з побудовою опису діяльності підприємства у вигляді множини бізнес-процесів (БП) та подальшому управлінні цими процесами [1].

Для реалізації ключових переваг процесного управління використовуються наскрізні бізнес-процеси (НБП). При проектуванні наскрізних БП організаційна структура підприємства не враховується, вони «пронизують» підрозділи, інтегруючи їх діяльність. Відповідальність за процес несе власник, який використовує інформацію про процеси, персонал, інфраструктурі, обладнанні, технології і т.п. Тому зв'язок між підрозділами при побудові таких процесів трансформується в зв'язок між наскрізними бізнес-процесами. Тому при управлінні НБП потрібно враховувати як особливості поведінки окремих процесів, так і особливості взаємодії між ними, що потребує реалізації двоконтурного процесного управління. Внутрішній контур в даній концепції призначається для управління окремими наскрізними бізнес-процесами. Управління у внутрішньому контурі виконується традиційно для процесного підходу, за відхиленням показників бізнес-процесу. В залежності від величини відхилень показників БП виконуються управляючі дії, що забезпечують коригування або попередження відхилень. Контур прецедентного управління реалізує управління множиною взаємодіючих бізнес-процесів, що передбачає вибір та запуск на виконання кожного бізнес-процесу з урахуванням обмежень по наявним ресурсам, що використовуються бізнес-процесами.

Ключова особливість даного контуру пов’язана з використанням прецедентів [2,3] у якості цільової моделі для запущених бізнес-процесів. Однак моделі прецедентів в силу особливостей їх побудови не враховують конкуренцію бізнес-процесів за ресурси на поточному підприємстві. Тому проблема прецедентного управління множиною наскрізних БП пов’язана з розподілом часу використання ресурсів підприємства між процесами. Послідовність доступу до ресурсів визначає ефективність окремих БП. Зазначене свідчить про актуальність визначення порядку доступу до ресурсів на основі визначення пріоритетів процесу та його окремих дій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При управлінні наскрізними процесами використовуються такі підходи [1, 4]: інформаційний; на основі робочої групи; матричне управління; кураторство керівництвом підприємства; комбінований: управління власником з кураторством від вищого керівництва; управління через регламенти.

Ключові недоліки вказаних підходів відносно наскрізних бізнес процесів пов’язані з організацією доступу до ресурсів. Зокрема, інформаційний підхід

© С.Ф. Чалий, І.В. Левикін 2017

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

не передбачає контролю доступу до ресурсів. Підхід на основі робочої групи направлений на локальний контроль ресурсів. Результатом матричної організації управління є в розмиття прав та обов'язків співробітників підприємства, що призводить до конкурування за ресурси. При недостачі ресурсів власники можуть втратити контроль над бізнес-процесами. Комбінований підхід призводить до двойного підпорядкування виконавців наскрізного БП. Управління наскрізними бізнес-процесами через регламенти потребує зміни регламенту у випадку оперативної адаптації наскрізного бізнес-процесу до змін у зовнішньому середовищі.

Таким чином, існуючі підходи до процесного управління не приділяють достатньо уваги формалізації та подальшій автоматизації доступу до ресурсів, за які конкурують бізнес-процеси.

Метою цієї статті є розробка методів, які б забезпечили організацію доступу наскрізних бізнес-процесів до загальних ресурсів підприємства на основі динамічного визначення пріоритетів використання ресурсів з тим, щоб зменшити загальний час очікування та задовільнити обмеження на тривалість виконання НБП.

Задача прецедентного управління. Об'єктом прецедентного управління є сукупність наскрізних бізнес-процесів, причому цільова модель кожного з них представлена прецедентом. Задача прецедентного управління є задачею зміни складу множини бізнес-процесів, що виконуються, з метою мінімізації часу очікування ресурсів при обмеженнях на час виконання кожного з цих процесів:

$$\min(\sum_i \tau_i^{wt}) \Big| \forall Bp_i \ \tau_i \le \tau_i^{\max}, \qquad (1)$$

де τ_i^{wt} – сумарний час очікування ресурсів для бізнес-процесу Bp_i; τ_i – загальний час виконання бізнес-процесу Bp_i; $\tau_i^{\max}$ – обмеження на час виконання бізнес-процесу Bp_i.

Час очікування для кожного бізнес-процесу визначається як сумарний час очікування доступу до ресурсів.

Наскрізні бізнес-процеси в задачах прецедентного управління характеризуються наборами послідовностей дій, також поточним станом (виконаними діями). Інформація про наскрізні бізнес-процеси містить у собі наступні складові:

– підмножина набору прецедентів $M = \{M_n\}$ НБП, що виконуються на момент уточнення пріоритетів;

– інформація про поточний стан кожного з бізнес-процесів, що виконуються в момент визначення пріоритетів; поточний стан характеризується діями процесу, що були виконані до моменту визначення пріоритетів;

– перелік загальних ресурсів підприємства, які використовуються декількома наскрізними бізнес-процесами; такі ресурси виступають в якості обмежень для НБП;

– інформація про нові НБП, які планується запустити на виконання; поточний стан кожного такого процесу визначається як готовність до виконання першої дії на заданій множині послідовностей дій wf_i.

Прецеденти задають порядок та послідовність виконання робіт для декількох варіантів реалізації бізнес-процесу. Для кожної дії процесу визначаються необхідні ресурси, що дає можливість упорядкувати доступ до ресурсів підприємства шляхом визначення пріоритетів для кожного НБП відносно кожного спільного ресурсу r_j.

Для вирішення задачі прецедентного управління необхідно отримати пріоритети доступу до кожного спільного ресурсу r_j з тим, щоб мінімізувати відхилення від заданих строків виконання наскрізного бізнес-процесу.

Модель наскрізного бізнес-процесу в рамках даної задачі може бути відображена у вигляді множини альтернативних послідовностей wf_i дій $p_{i,l} = w_{i,1} Xo_{i,1}$, кожна з яких складається з інтервалів очікування ресурсів та виконання дій:

$$\begin{aligned} &Bp = \bigvee_{i=1}^{I} wf_i, \\ &wf_i = w_{i,1} Xo_{i,1} Xw_{i,2} Xo_{i,2} X \ldots w_{i,l} Xo_{i,l} \ldots Xw_{i,L} Xo_{i,L}, \end{aligned} \qquad (2)$$

де $w_{i,l}$ – інтервал очікування l – дії i – процесу; $o_{i,l}$ – l – дія i – процесу.

Такі послідовності дій можуть частково співпадати. Однак тривалість інтервалів очікування і тривалість дій відповідно залежить від порядку доступу до спільних ресурсів підприємства. Тому при виконанні кожної послідовності wf_i для дій $p_{i,l}$ доцільно обчислювати інтервал очікування з урахуванням пріоритету доступу до підмножини ресурсів r_j:

$$p_{i,l} = w_{i,l}^{k,j} Xo_{i,l}^{k,j}, \qquad (3)$$

де j – індекс підмножини ресурсів, що потрібні для виконання дії $p_{i,l}$, k – пріоритет доступу до ресурсів r_j для дії $p_{i,l}$.

НБП мають такі особливості:

– дії $p_{i,l}$, що використовують спільну підмножину ресурсів r_j, належать до різних бізнес-процесів;

– пріоритети доступу до ресурсів визначаються не для процесу в цілому, а для його окремих дій, а також можуть змінюватись у ході виконання бізнес-процесів з метою мінімізувати час очікування ресурсів при обмеженнях на час виконання кожного БП;

– при реалізації кожного бізнес-процесу в кожний момент часу виконується лише одна послідовність дій wf_i;

– внаслідок того, що послідовності wf_i можуть мати спільні дії, потрібно враховувати всі такі

послідовності; по мірі виконання процесу кількість послідовностей, що відображають можливі варіанти розвитку процесу, зменшується.

На рис. 1 наведено приклад поєднання трьох послідовностей дій в єдиній моделі процесу. Перша та друга дія належать до всіх послідовностей, тому необхідно вибирати пріоритети для дій з wf_1, wf_2 і wf_3 з урахуванням сумарного часу затримки та обмежень на час виконання для всіх трьох послідовностей. Якщо ж при реалізації НБП виконується дія $p_{3,3}$, то це означає, що в даній реалізації процес використовує лише послідовність wf_3, тому для дій з послідовностей wf_1 і wf_2 пріоритети доступу до ресурсів можна не визначати.

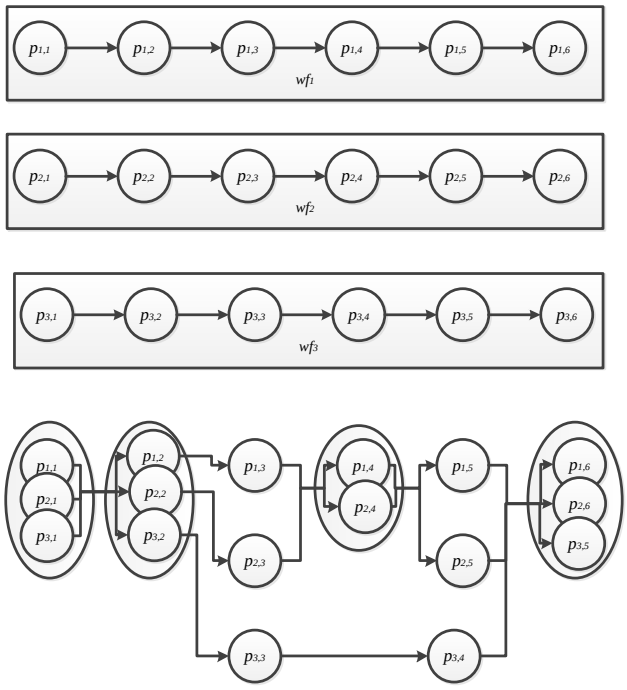


Рис. 1 – Поєднання послідовностей дій в моделі бізнес-процесу

Метод визначення пріоритетів доступу до ресурсів для наскрізних БП без урахування обмежень на час їх виконання. Загальний зв'язок між пріоритетами та послідовністю доступу бізнес-процесів до ресурсів підприємства має такий вигляд.

Дія з першим пріоритетом отримує ресурс без затримки, тобто:

$$\tau(w_{i,l}^{1,j}) = 0, \quad (4)$$

де $\tau(w_{i,l}^{1,j})$ - тривалість інтервалу очікування.

Дія з другим пріоритетом отримує ресурс із затримкою, щонайменше рівною тривалості дії з першим пріоритетом:

$$\tau(w_{i,l}^{2,j}) \geq \tau(o_{i,l}^{1,j}), \quad (5)$$

Аналогічно, дії з меншими пріоритетами очікують виконання дій з більшими пріоритетами:

$$\tau(w_{i,l}^{k+1,j}) \geq \tau(w_{i,l}^{k,j}) + \tau(o_{i,l}^{k,j}), \quad (6)$$

Приклад додатку затримок на основі вибору пріоритетів доступу до підмножини ресурсі наведено на рис. 2.

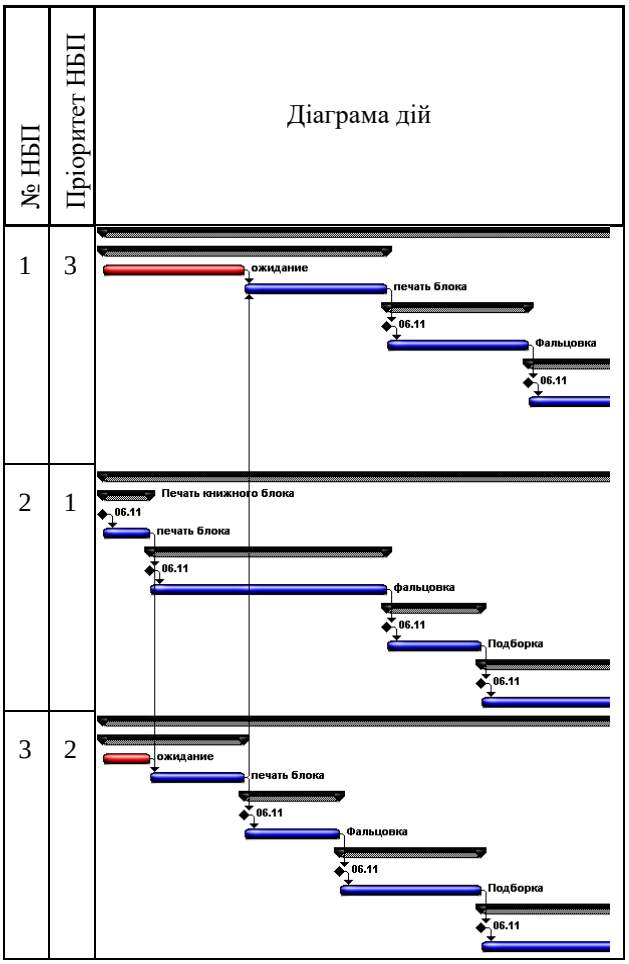


Рис. 2 – Визначення затримок доступу до підмножини ресурсів з урахуванням пріоритетів окремих дій процесу

Запропонований метод визначення пріоритетів містить у собі наступні базові етапи.

Етап 1. Вибір підмножини ресурсів r_j для визначення пріоритетів за критеріїм найменшої відстані від моменту визначення пріоритетів до моменту його використання на на часовій шкалі.

Етап 2. Попереднє визначення пріоритетів для дій кожного НБП з використанням підмножини ресурсів r_j, за критерієм $\min \sum_{Bp, wf_i} \tau(w_{i,l}^{k+1,j})$. Особливість даного етапу полягає в тому, що розрахунок критерію виконується для кожної комбінації послідовностей дій бізнес-процесів з урахуванням виразу (2).

Етап 3. Відбір такої комбінації допустимих послідовностей дій з різних бізнес-процесів із встановленими пріоритетами, що забезпечує

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

виконання критерію: $\max \sum_{l} \tau(w_{i,l}^{k+1,j}) \Big| \min(\sum_{Bp, wf_i} \tau(w_{i,l}^{k+1,j}) \forall \mathrm{r}_j$.

Метод корегування пріоритетів доступу до ресурсів для наскрізних БП з урахуванням обмежень на час їх виконання.

Попередній метод дає можливість мінімізувати час очікування ресурсів на множині прецедентів бізнес-процесів, що виконуються на підприємстві в момент розрахунку. Однак досягнення глобального мінімуму $\min(\sum_i \tau_i^{wt})$ часу очікування ресурсів по всім Bp_i відповідно до (1) не гарантує виконання обмежень $\tau_i \le \tau_i^{\max}$ для всіх НБП. Також слід зазначити, що більш раннє виконання бізнес-процесу, тобто $\tau_i < \tau_i^{\max}$, може свідчити про неефективне використання ресурсів. Зокрема, зменшення часу очікування для поточного процесу призводить до збільшення τ_i^{wt} для інших процесів, що одночасно з поточним використовують ті ж самі ресурси.

Таким чином, доцільно розширити обмеження із виразу (1) з метою виконання бізнес-процесів за технологією «just in time». Формально задача прецедентного управління у формі «just in time» має такий вигляд:

$$\min(\sum_i \tau_i^{wt}) \text{ if } \forall Bp_i \ \left|\tau_i - \tau_i^{\max}\right| < \varepsilon, \qquad (7)$$

де $\varepsilon \to 0$ – відхилення у строках виконання наскрізного бізнес-процесу.

Для задачі у наведеній постановці функція оцінювання часу очікування ресурсів i – послідовності дій бізнес-процесу має наступний вигляд:

$$C_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^{I} \tau_i - \tau_i^{\max} + \tau_{ij}^{wt} \,\Big|\, \tau_i < \tau_i^{\max} \\ \sum_{j=1}^{J} (\tau_i - \tau_i^{\max} - \tau_{ij}^{wt})^2 \,\Big|\, \tau_i > \tau_i^{\max} \end{cases} \qquad (8)$$

де $\tau_i^{\max}$ – обмеження на час виконання i - бізнес-процесу, що задаються ОПР; τ_i – час виконання i - бізнес-процесу за результатами оптимізації використання ресурсів, без урахування обмежень $\tau_i^{\max}$; τ_{ij}^{wt} – час очікування j – ресурсу i – послідовнію дій бізнес-процесу.

Дана функція визначає величину «штрафів» при відхиленні строків виконання бізнес-процесу від запланованих. Несвоєчасне виконання оцінюється пропорційно квадрату відхилення (рис. 3), оскільки призводить до несвоєчасної поставки клієнтові результатів бізнес-процесу і, як наслідок, до суттєвих додаткових втрат на підприємстві.

Більш швидке виконання НБП оцінюється пропорційно значенню відхилення, оскільки призводить до менш ефективного використання ресурсів на підприємстві, однак не впливає на ключову характеристику, за якою оцінюється бізнес-процес – ступінь задоволення клієнта.

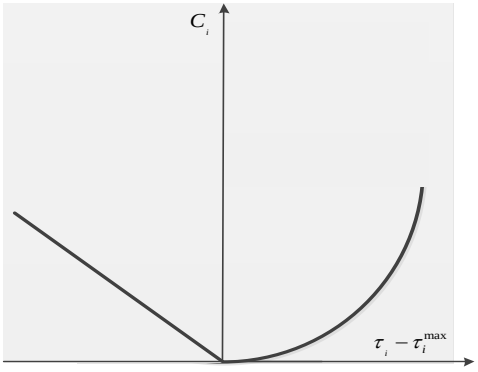


Рис. 3 – Функція оцінювання часу очікування ресурсів з урахуванням обмежень на час виконання НБП

З виразу (8) видно, що у випадку перевищення строків виконання необхідно підвищувати пріоритети доступу цього НБП до ресурсів r_j з метою зменшення часу затримки τ_{ij}^{wt}. У випадку дострокового виконання Bp_i навпаки, потрібно знизити пріоритети доступу до ресурсів r_j з тим, щоб звільнити обладнання для обробки можливих додаткових завдань (нових заказів від клієнтів).

Запропонований метод уточнення пріоритетів доступу до ресурсів для наскрізних БП з урахуванням обмежень на час їх виконання містить у собі наступні етапи.

Етап 1. Початковий розрахунок критерію несвоєчасності виконання Δ_i для кожної допустимої послідовності дій wf_i кожного Bp, що виконується на підприємстві в момент розрахунку:

$$\Delta_i = \begin{cases} \left|\tau_i - \tau_i^{\max}\right| \ if\ \Delta_i > \varepsilon \\ 0 \ if\ \Delta_i < \varepsilon \end{cases} \qquad (9)$$

Етап 2. Вибір НБП, що має послідовність дій з максимальним значенням показника Δ_i.

Етап 3. Вибір ресурсу r_j для зміни пріоритету доступу для процесу Bp_i за критерієм:

$$\begin{aligned} &\min_j \left|\tau_i - \tau_i^{\max} - \tau_{ij}^{wt}\right| \ if\ \tau_i > \tau_i^{\max}, \\ &\min_j \left|\tau_i - \tau_i^{\max} + \tau_{ij}^{wt}\right| \ if\ \tau_i < \tau_i^{\max} \end{aligned} \qquad (10)$$

Етап 4. Встановлення максимально можливого пріоритету Pr_j^i використання ресурсу r_j процесом Bp_i відповідно до виразу:

$$Pr_j^i = \begin{cases} 1, \ if\ \forall Bp_k \ \Delta_i > \Delta_k \\ \min(Pr_j^k) - 1, \ if\ \exists Bp_k \ \Delta_i < \Delta_k \end{cases} \qquad (11)$$

Етап 5. Зміна пріоритетів інших процесів за умови $Pr_j^i \ge Pr_j^k$.

Етап 6. Поточний розрахунок Δ_i для всіх процесів, що виконуються.

Етап 7. Перевірка умови $\Delta_i < \varepsilon$ для поточного НБП. Якщо виконується, то перехід до етапу 2.

Етап 8. Перевірка множини ресурсів, що використовує поточний процес. Якщо всі ресурси розглянуто, то визначення поточного процесу як такого, що не задовольняє обмеженням.

Етап 9. Перевірка множини процесів з $\Delta_i > 0$. Якщо не всі процеси розглянуто, то перейти до етапу 2.

Висновки. Розроблено методи динамічного визначення пріоритетів доступу до ресурсів в задачах прецедентного управління наскрізними бізнес-процесами. Перший метод призначений для визначення пріоритетів доступу до ресурсів для наскрізних БП без урахування обмежень на час їх виконання. Метод дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів підприємства шляхм мінімізації сумарного часу очікування кожного з цих ресурсів. Другий метод направлений на корегування пріоритетів доступу до ресурсів для наскрізних БП з урахуванням обмежень на час їх виконання. Метод послідовно коригує пріоритети доступу до ресурсів для окремих дій кожного процесу з тим, щоб зменшити відхилення розрахованого строку виконання БП від запланованого.

Список литературы

1. *Vom Brocke J.* Handbook on Business Process Management 1. Introduction, Methods, and Information Systems / *J. vom Brocke, M. Rosemann*. – Berlin: Springer-Verlag, 2015. – 709 p.
2. *Weske M.* Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures. Second Edition / *M. Weske*. – Berlin: Springer-Verlag, 2012. – 403 p.
3. *Kolodner J. L.* Case-Based Reasoning/ *J. L. Kolodner* // San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1993. – 668 p.
4. *Varshavskii P. R.* Modeling of case-based reasoning in intelligent decision support systems / *P. R. Varshavski, A. P. Eremeev* // Scientific and Technical Information Processing. Vol. 37, 2010 – P. 336–345.
5. *Emerson E. A.* Temporal Modal Logic / *E. A. Emerson*// Handbook of Theoretical Computer Science, 1990. – P. 997–1071.

References (transliterated)

1. Vom Brocke J. *Handbook on Business Process Management 1. Introduction, Methods, and Information Systems.* Berlin, Springer-Verlag Publ., 2015. 709 p.
2. Weske M. *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures.* Berlin, Springer-Verlag Publ., 2007. 368 p.
3. Kolodner J. L. *Case-Based Reasoning.* San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publ., 1993. 668 p.
4. Varshavskii P. R. Modeling of case-based reasoning in intelligent decision support systems. *Scientific and Technical Information Processing*. 2010, no. 37, pp. 336–345.
5. Emerson E. A. Temporal Modal Logic. *Handbook of Theoretical Computer Science*, 1990. pp. 997–1071.

Поступила (received) 10.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Побудова ситуаційного представлення знань на основі аналізу логів / С. Ф. Чалий, І. В. Левикін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 53–57. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.

Методы динамического определения приоритетов доступа к ресурсам в задачах прецедентного управления сквозными бизнес-процессами / С. Ф. Чалый, И. В. Левыкин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 53–57. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.

Dynamic determination of resource access priorities using precedents in business process management tasks / S. F. Chaly, I. V. Levykin // Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 51 (1272). – P. 53–57. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чалий Сергій Федорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних управляючих систем Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057) 702-14-51; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua.

Левикін Ігор Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри медіасистем та технологій Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057) 702-18-91; e-mail: ihor.levykin@nure.ua.

Чалый Сергей Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных управляющих систем Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, тел.: (057) 702-14-51; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua.

Левикін Ігор Вікторович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедрі медиасистем и технологий Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, тел.: (057) 702-18-91; e-mail: ihor.levykin@nure.ua..

Chalyi Serhii – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Information Control Systems of the Kharkiv National University of Radioelectronics, c. Kharkiv, (057) 702-14-51; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua.

Levykin Ihor – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Media Systems and Technologies of the Kharkiv National University of Radioelectronics, c. Kharkiv, (057) 702-18-91; e-mail: ihor.levykin@nure.ua.

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

УДК 519.876.2:336

Т. В. НЕСКОРОДЕВА

ПРАВИЛА И СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ МЕТОДИКИ ОБОБЩЕННО-МНОЖЕСТВЕННОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ПОДСИСТЕМЕ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА СППР АУДИТА

Визначена інформація синтетичного обліку, яка характеризує стан і результати діяльності підприємства за період перевірки на верхньому рівні. Встановлено взаємозв'язки синтетичного обліку і характеристик підприємства як об'єкта управління. Формалізовані функціональні залежності, що характеризують взаємодію змінних СППР аудиту. Визначено правила і властивості відповідності відображень множин чисельних значень змінних як попередній етап підготовки даних для аудиту. На підставі отриманих результатів сформульована сутність методики узагальнено-множинного відображення інформації в СППР аудиту.

Ключові слова: синтетичний облік, інформаційна технологія, СППР аудиту, методика узагальнено-множинного відображення інформації.

Определена информация синтетического учета характеризующая состояние и результаты деятельности предприятия за период проверки на верхнем уровне. Установлены взаимосвязи синтетического учета и характеристик предприятия как объекта управления. Формализованы функциональные зависимости, характеризующие взаимодействие переменных СППР аудита. Определены правила и свойства соответствия отображений множеств численных значений переменных как предварительный этап подготовки данных для аудита. На основании полученных результатов сформулирована сущность методики обобщенно-множественного отображения информации в СППР аудита.

Ключевые слова: синтетический учет, информационная технология, СППР аудита, методика обобщенно-множественного отображения информации.

The information of the synthetic account which characterizing a state and enterprise activity results for the check period on the top level is defined. The relationship between the synthetic accounting and the characteristics of the enterprise as an object of management is established. Functional dependencies which characterizing the interaction of the DSS audit variables are formalized. The rules and properties of sets mappings correspondence of numerical values of variables are defined as a preliminary stage of data preparation for audit. Based on the obtained results, the essence of the generalized-multiple information mapping technique in the DSS of the audit is formulated. The application of this technique will allow: to reduce the volume of analyzed multidimensional data or actual verification at lower levels by allocating equivalent subsets at the upper levels; use the results of a polyalternative analysis on a set of characteristics of data sets for preparing decision-making with polyalternative criteria for assessing the equivalence of sets in IT multi-level DSS audit; determine the reason for the lack of data equivalence, through the definition of functional relationships, the implementation of which does not correspond to the properties of mappings.

Keywords: synthetic accounting, information technology, DSS of audit, methodology of generalized-multiple mapping of information.

Введение. В настоящее время актуальной научно-технической проблемой информационных технологий финансово-экономической сферы является автоматизация анализа больших объемов данных финансово-экономической информации предприятий [1] хранящихся и поступающих в режиме онлайн в базы данных локальных и глобальных компьютерных систем с целью формирования рекомендаций принятия решений при аудите.

Существующие на сегодняшний день ИТ аудита позволяют автоматизировать только отдельные процедуры анализа или провести аналитические процедуры в специальных случаях [2, 3]. Группа методов обнаружения мошенничества, основанная на применении моделей нейронных (вероятностных) сетей, логистических регрессий, деревьях решений, представлена в работах [4–6], то есть существует проблема полноты, универсальности и комплексности ИТ анализа. Также существующие ИТ характеризуются следующими проблемами: автоматизации взаимосвязанного (по множествам и задачам) анализа, обратной связи о его результативности и эффективности, оптимизации анализа в соответствии с целями и ограничениями, заданными ЛПР, а также диалога с ЛПР на языке предметной области на этапах задания задачи и интерпретации результатов анализа.

Предприятие, как объект аудита, характеризуется глобальной многоуровневой иерархичной структурой разнородных, многофакторных, многофункциональных связей, взаимозависимостей и взаимодействий его подсистем, с ИТ контроля, учета, управления, ведения бизнеса, с другими системами в структуре национальной экономики. Современная методология прикладного системного анализа не соответствует данным требованиям [7]. Следовательно, существует проблема разработки методологических основ проектирования ИТ аудита.

Применение современных систем учета и управления, на предприятии которые интегрированы в глобальные, многоуровневые системы информационных компьютерных сетей дает потенциальные возможности обработки больших объемов данных, которые используются не в полной мере [7]. В [8] представлена архитектура подсистем внешнего и внутреннего аудита системы Audit 4.0, внедрение и функционирование которых сталкивается с проблемой обработки больших объемов данных. Также на сегодняшний день в практических и научных источниках, изучающих проблемы и перспективы развития аудита рассматривается возможность принятия законодательных актов, которые позволят использовать аналитические доказательства (в частности противоречивости данных) полученные при анализе больших объемов данных в качестве обоснования судебных решений без документального исследования первичных документов [9].

Первичный модуль СППР аудита – подсистема экспресс-аудита, в которой решается задача экспресс-анализа данных синтетического учета [10] и рекомендаций углубленного анализа и аудита на нижних уровнях.

Цель статьи: создание методики применения

© Т. В. Нескородева, 2017

специального математического и информационного обеспечения подсистемы экспресс-анализа СППР аудита синтетического учета, как одна из подзадач проектирования СППР аудита. Для достижения данной цели согласно правилам системного анализа предприятия как объекта управления необходимо определить составные части методики проектирования подсистемы экспресс аудита. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- определить информацию синтетического учета характеризующую состояние и результаты деятельности предприятия за период проверки на верхнем уровне.
- установить взаимосвязи синтетического учета и характеристик предприятия как объекта управления.
- выполнить классификацию переменных, характеризующих состояние и результаты деятельности как объекта управления.
- формализовать функциональные зависимости, характеризующие взаимодействие переменных СППР аудита.
- определить правила обобщенно-множественного отображения множеств численных значений переменных.
- определить свойства соответствия отображений множеств численных значений переменных как предварительный этап подготовки данных для аудита.

На первом этапе разработки специального математического обеспечения подсистемы синтетического учета на верхнем уровне СППР аудита необходимо определить данные синтетического учета характеризующую состояние и результаты деятельности предприятия за период проверки.

1. Информация синтетического учета характеризующая состояние и результаты деятельности предприятия за период проверки. На верхнем уровне аудита рассматривается деятельность предприятия за период проверки T и состояние на момент времени t_0+T. На верхнем уровне учета данные характеристики предприятия отражает следующее множество данных синтетического учета:

$$Q^c(T)=\{C_s(t_0+T),\text{Об}_s^k(T),s\in M,$$
$$S_s^e(T),S_g^s(T),(s,e)\wedge(g,s)\in G\}, \quad (1)$$

где Q^c – множество показателей синтетического учета на верхнем уровне,

t_0 и T – начало периода и период учета соответственно,

s,e,g – номера счетов,

M – множество счетов, применяемых в учете,

C – остаток на счету на момент времени,

d и k – дебет и кредит счета соответственно,

$\text{Об}_s^d,\text{Об}_s^k$ – обороты за период по дебету и кредиту счета s соответственно,

(s,e) и (g,s) – корреспонденция операций по дебету и кредиту соответственно,

S_s^e и S_g^s – суммы частичных оборотов за период с корреспонденцией (s,e) и (g,s) по дебету и кредиту счета s соответственно,

G – граф корреспонденций операций деятельности предприятия.

Согласно правилам системного анализа экономико-производственной деятельности необходимо определить взаимосвязи показателей синтетического учета множества (1), характеризующих особенности предприятия как объекта управления. Для этого необходимо выполнить их классификацию. При этом надо учесть, что как объект управления предприятие характеризуется:

- состоянием на момент времени;
- переменными, характеризующими деятельность предприятия.

Как предварительный этап классификации переменных, определим взаимосвязи показателей синтетического учета с данными характеристиками.

2. Взаимосвязь данных синтетического учета с характеристиками предприятия как объекта управления. Согласно законодательным нормам Плана счетов и Методических рекомендаций по его применению соответствие между переменными синтетического учета (1) и характеристиками предприятия, как объекта управления определяется следующим образом (табл. 1).

На верхнем уровне в подсистеме синтетического учета рассматриваются следующие переменные, характеризующие состояние предприятия:

Номер счета s – код хозяйственного средства предприятия А или источника хозяйственных средств П, которым владеет предприятие.

M_s – множество хозяйственных средств А и источников хозяйственных средств П, которыми владеет предприятие на момент.

Остатки C_s на счетах s – оценки остатков хозяйственных средств предприятия А и их источников П в денежных единицах на момент времени. Экономический смысл переменных синтетического учета и их взаимосвязи приведены в таблице.

На верхнем уровне в подсистеме синтетического учета рассматриваются следующие переменные, характеризующие деятельность предприятия.

Обороты Об_s^d и Об_s^k по дебету и кредиту счета s соответственно – оценки в денежных единицах преобразования хозяйственного средства или источника E_s в направлении увеличения и уменьшения соответственно.

Корреспонденция операции (s,e) по дебету счета s определяет вид операции, которая приводит к преобразованию хозяйственных средств или источников предприятия E_s и E_e в направлении увеличения хозяйственного средства предприятия E_e или уменьшения источника хозяйственных средств E_s.

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

Таблица 1 - Взаимосвязь переменных синтетического учета с характеристиками предприятия как объекта управления

Обозначение	Переменная синтетического учета	Характеристика предприятия	Формализация взаимосвязи
s	Номер счета	Вид хозяйственного средства А или источника хозяйственных средств П	$E_s = \begin{cases} \text{А}_s, s - \text{активный счет}, \\ \text{П}_s, s - \text{пассивный счет} \end{cases}$
M_s	Множество счетов, применяемых в учете	Множество видов хозяйственных средств А и их источников П, которыми владеет предприятие	$M_s = \bigcup s$
C_s	Остаток счета s	Количество хозяйственного средства А или источника хозяйственных средств П	$C_s = \begin{cases} m(\text{А}_s), s - \text{активный счет}, \\ m(\Pi_s), s - \text{пассивный счет} \end{cases}$
(s,e) (g,s)	Корреспонденция операции по дебету счета s Корреспонденция операции по кредиту счета s	Определяет вид операции, которая приводит к преобразованию хозяйственных средств или источников предприятия E_s и E_e в направлении увеличения хозяйственного средства предприятия E_s или уменьшения источника хозяйственных средств E_e	$(s,e) \leftrightarrow r$ $\text{on}_r = \begin{cases} \text{on}(E_s^+, E_e^-), E_s \in \bigcup \text{А} \\ \text{on}(E_s^-, E_e^+), E_s \in \bigcup \text{П}' \end{cases}$ $(g,s) \leftrightarrow l$ $\text{on}_r = \begin{cases} \text{on}(E_s^+, E_e^-), E_s \in \bigcup \text{А} \\ \text{on}(E_s^-, E_e^+), E_s \in \bigcup \text{П}' \end{cases}$
G	Граф корреспонденции операций	Множество видов операций, которые осуществляет предприятие	$G \leftrightarrow \bigcup_{r=1}^{R} r \bigcup_{l=1}^{L} l$
S_s^e (S_g^s)	Сумма частичных оборотов по дебету счета s с корреспонденцией (s,e) (по кредиту счета s с корреспонденцией (g,s))	Оценка в денежном измерении множеств операций Оп_s^e с корреспонденцией (s,e) (Оп_g^s с корреспонденцией (g,s))	$S_s^e = \mu(\text{Оп}_s^e)$ $(S_g^s = \mu(\text{Оп}_g^s))$
Об_s^d (Об_s^k)	Обороты по дебету счета s (обороты по кредиту счета s)	Оценки в денежных единицах преобразования хозяйственного средства или источника E_s в направлении увеличения (уменьшения)	$\text{Об}_s^d = \mu(\text{Оп}(E_s^+))$, $(\text{Об}_s^k = \mu(\text{Оп}(E_s^-)))$

Суммы частичных оборотов S_s^e и S_g^s по дебету и кредиту счета s соответственно – оценки в денежном измерении множеств операций с корреспонденцией (s,e) и (g,s) соответственно.

Граф корреспонденции операций G – множество видов операций, которые осуществляет предприятие. Взаимосвязи переменных синтетического учета с характеристиками предприятия как объекта управления (табл. 1) определяют их свойства и взаимосвязи и являются основанием для классификации переменных.

Для классификации переменных деятельности, согласно правилам системного анализа нужно определить взаимодействие множеств, характеризующих деятельность предприятия на верхнем уровне и структуру их взаимного соотношения, определенную согласно Положениям (стандартам) бухгалтерского учета (П(с)БУ). Согласно этому, множество операций в обобщенном виде можно представить в виде непересекающихся подмножеств операций по видам деятельности:

$$\text{Оп} = \bigcup_{vid \in Vid} \text{Оп}_{vid}, \quad \text{Оп}_{vid_1} \cap \text{Оп}_{vid_2} = \varnothing, \qquad (2)$$

где Оп – множество операций,

vid и Vid – вид и множество видов деятельности предприятия.

Структуру взаимного соотношения и взаимодействия операций каждого вида деятельности предприятия можно представить в виде непересекающихся подмножеств операций расходов и доходов:

$$\text{Оп}_{vid} = \text{Оп}_{vid}^{\text{р}} \bigcup \text{Оп}_{vid}^{\text{д}}, \ \text{Оп}_{vid}^{\text{р}} \bigcap \text{Оп}_{vid}^{\text{д}} = \varnothing, vid \in Vid, \qquad (3)$$

где Оп – множество операций,

vid и Vid – вид и множество видов деятельности предприятия,

р – индекс операции расходов,

д – индекс операции доходов.

Структуру взаимного соотношения и взаимодействия множества операций расходов деятельности предприятия можно представить в виде непересекающихся подмножеств по видам операций расходов:

$$\text{Оп}^{\text{р}}_{vid} = \bigcup_{r_{vid}}^{R_{vid}} \text{Оп}^{\text{р}}_{r_{vid}}, \quad \text{Оп}^{\text{р}}_{r^1_{vid}} \bigcap \text{Оп}^{\text{р}}_{r^2_{vid}} = \varnothing, vid \in Vid, \quad (4)$$

где Оп – множество операций,

vid и Vid – вид и множество видов деятельности предприятия,

р – индекс операции расходов,

r и R – номер и количество видов операций расходов.

Структуру взаимного соотношения и взаимодействия множества операций доходов деятельности предприятия можно представить в виде непересекающихся подмножеств по видам операций доходов:

$$\text{Оп}^{\text{д}}_{vid} = \bigcup_{l_{vid}}^{L_{vid}} \text{Оп}^{\text{д}}_{l_{vid}}, \quad \text{Оп}^{\text{д}}_{l^1_{vid}} \bigcap \text{Оп}^{\text{д}}_{l^2_{vid}} = \varnothing, \quad (5)$$

где Оп – множество операций,

д – индекс операции доходов,

l и L – номер и количество видов операций доходов.

Согласно определенной структуре (2)–(5) взаимного соотношения и взаимодействия множеств характеризующих деятельность предприятия на верхнем уровне выполним классификацию переменных экономико-производственной деятельности предприятия.

3. Классификация переменных экономико-производственной деятельности предприятия. В соответствии с правилами формирования входных и выходных переменных на верхнем уровне (табл. 1) и согласно определённой структуре взаимодействия операций (2)–(5) и согласно того, что цель управления деятельностью предприятия – получение прибыли (все операции расходов $\text{Оп}^{\text{р}}_{vid}$ по каждому виду деятельности осуществляются только с целью получения доходов по соответствующему виду деятельности $\text{Оп}^{\text{д}}_{vid}$) выполним классификацию переменных синтетического учета. На основании выше сказанного, определяем, что переменные сумм частичных оборотов операций расходов каждого вида деятельности на верхнем уровне (при синтетическом учете) образуют совокупность входных переменных $\overline{X}^{\text{в}}_{vid}$, переменные сумм частичных оборотов операций доходов – совокупность выходных переменных соответствующего вида деятельности $\overline{Y}^{\text{в}}_{vid}$:

$$\overline{X}^{\text{в}}_{vid} = \left(S^e_s, S^s_g, s \in M, (s,e) \wedge (g,s) \in G_{X_{vid}}\right), \quad (6)$$

$$\overline{Y}^{\text{в}}_{vid} = \left(S^e_s, S^s_g, s \in M, (s,e) \wedge (g,s) \in G_{Y_{vid}}\right), \quad (7)$$

где $\overline{X}$ – вектор входных переменных деятельности предприятия,

$\overline{Y}$ – вектор выходных переменных деятельности предприятия,

S – сумма операций за период,

s, e, g – номера счетов,

M – множество счетов, применяемых в учете,

(s,e), (g,s) – корреспонденция счета s по операциям, которые учитываются на дебете и кредите соответственно,

G_X – граф корреспонденции операций расходов,

G_Y – граф корреспонденции операций доходов.

Осуществление деятельности предприятия по видам множества Vid осуществляется за счет преобразования хозяйственных средств предприятия и их источников E_s $(s \in M)$, поэтому переменные видов деятельности являются входными для системы управления хозяйственными средствами и их источниками, а выходные переменные – объемы их преобразования в направлении увеличения и уменьшения (обороты по дебету т кредиту) и остатки (сальдо):

$$\overline{X}^d_s = \left(S^e_s, (s,e) \in G_{X_{vid}} \vee G_{Y_{vid}}, vid \in Vid\right),$$

$$\overline{Y}^{\text{д}}_s = \left(\text{Об}^d_s\right), s \in M, \quad (8)$$

$$\overline{X}^k_s = \left(S^s_g, (g,s) \in G_{X_{vid}} \vee G_{Y_{vid}}, vid \in Vid\right),$$

$$\overline{Y}^k_s = \left(\text{Об}^k_s\right), s \in M, \quad (9)$$

$$\overline{X}_{E_s} = \left(\text{Об}^d_s, \text{Об}^k_s\right), \overline{Y}_{E_s} = \left(C_s\right), s \in M, \quad (10)$$

где $\overline{X}^d_s$ и $\overline{X}^k_s$ – вектора входных переменных преобразования хозяйственного средства предприятия или источника E_s в направлении увеличения или уменьшения соответственно,

$\overline{Y}^d_s$ и $\overline{Y}^k_s$ – вектора выходных переменных преобразования хозяйственного средства предприятия или источника E_s в направлении увеличения или уменьшения соответственно,

$\overline{X}_{E_s}$ и $\overline{Y}_{E_s}$ – вектора входных и выходных переменных состояния хозяйственного средства предприятия или источника E_s,

S – сумма операций,

s, e, g – номера счетов,

M – множество счетов, применяемых в учете,

(s,e), (g,s) – корреспонденция счета s по операциям, которые учитываются на дебете и кредите соответственно,

G_X – граф корреспонденции операций расходов,

G_Y – граф корреспонденции операций доходов,

vid и Vid – вид и множество видов деятельности предприятия,

C – остаток на счету,

$\text{Об}^d_s, \text{Об}^k_s$ – обороты по дебету и кредиту счета соответственно.

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

Между входными и выходными переменными подсистемы синтетического учета, определенными в (6)–(10) существуют множества взаимосвязей и зависимостей, которые необходимо исследовать для разработки специального математического обеспечения СППР аудита верхнего уровня.

4. Определение функциональных зависимостей характеризующих взаимодействие переменных СППР аудита. Между входными и выходными переменными подсистемы синтетического учета по видам деятельности, определенными в (6)–(10) существуют множества взаимосвязей, которые характеризуют особенности деятельности (преобразование расходов в доходы), правила и нормативы учетной политики предприятия на верхнем уровне $\overline{N}^{\text{в}}$:

$$\Phi^{\text{в}}_{vid}\left(\overline{X}^{\text{в}}_{vid}, \overline{Y}^{\text{в}}_{vid}, \overline{N}^{\text{в}}_{vid}\right), vid \in Vid\ , \qquad (11)$$

где $\overline{X}$ – вектор входных переменных деятельности предприятия,

$\overline{Y}$ – вектор выходных переменных деятельности предприятия,

$\overline{N}$ – вектор нормативных данных деятельности предприятия,

vid и Vid – вид и множество видов деятельности предприятия,

в – индекс верхнего уровня,

Ф – множество взаимосвязей.

Далее, учитывая, структуру множеств операций (2)–(4), множество корреспонденций всех операций представим в виде объединения непересекающихся множеств операций по видам деятельности, расходов и доходов. Следовательно, взаимосвязи между графами корреспонденции операций данных множеств можно представить следующим образом:

$$G = \bigcup_{vid \in Vid} G_{X_{vid}} \cup G_{Y_{vid}}\ , \qquad (12)$$

где G – граф корреспонденции операций предприятия,

G_X – граф корреспонденции операций расходов,

G_Y – граф корреспонденции операций доходов,

vid и Vid – вид и множество видов деятельности предприятия.

Между переменными управления хозяйственными средствами и источниками, существуют множества взаимосвязей, которые характеризуют их преобразование в результате деятельности:

$$\text{Об}^k_s = \Phi^k_s\left(S^s_g, (g,s) \in G\right), s \in M, \qquad (13)$$

$$\text{Об}^d_s = \Phi^d_s\left(S^e_s, (s,e) \in G\right), s \in M, \qquad (14)$$

$$C_s = \Phi^c_s\left(\text{Об}^d_s, \text{Об}^k_s\right), s \in M\ . \qquad (15)$$

где Ф – функциональная зависимость.

Взаимосвязи (13)–(15) согласно П(с)БУ определены в явном виде на верхнем уровне и их реализация за период проверки может быть проверена в автоматическом режиме (например, путем тестирования системы учета).

Взаимосвязи между переменными деятельности (6), (7) являются композицией взаимосвязей переменных нижних уровней и между уровнями. Так как размерность, объемы данных и взаимосвязей на нижем уровне резко возрастают, то их непосредственная проверка требует значительных вычислительных ресурсов. Для создания методики применения специального математического обеспечения их проверки необходимо рассмотреть правила формирования отображений их численных значений.

5. Правила обобщенно-множественного отображения данных предприятия. Множества функциональных взаимосвязей между входными и выходными переменными деятельности, определенные в (11) порождают отображение подмножеств данных синтетического учета входных переменных (6) в подмножества данных выходных переменных (7) за период T:

$$\overline{X}^{\text{в}}_{\text{Я}}(T) \xrightarrow{f^{\text{в}}_{\text{Я}}} \overline{Y}^{\text{в}}_{\text{Я}}(T)\ , \qquad (16)$$

где $\overline{X}^{\text{в}}_{\text{Я}}(T)$ – подмножество значений входных переменных синтетического учета,

$\overline{Y}^{\text{в}}_{\text{Я}}(T)$ – подмножество значений выходных переменных синтетического учета,

$f^{\text{в}}_{\text{Я}}$ – отображение подмножества значений входных переменных за период T в подмножества значений выходных переменных синтетического учета деятельности.

Правила и параметры отображений $f^{\text{в}}_{\text{Я}}$ определяются свойствами и параметрами функциональных взаимосвязей (11) между соответствующими переменными. Для их проверки необходимо определить их свойства.

6. Свойства отображений множеств численных значений переменных как предварительный этап подготовки данных для аудита. Множества данных в отображении (16) характеризуют множества операций расходов и доходов:

$$\overline{X}^{\text{в}}_{\text{Я}}(T) = \mu\left(\text{Оп}^{\text{p}}_{\text{Я}}(T)\right), \qquad (17)$$

$$\overline{Y}^{\text{в}}_{\text{Я}}(T) = \mu\left(\text{Оп}^{\text{d}}_{\text{Я}}(T)\right), \qquad (18)$$

где μ – оценка множеств операций в денежных единицах.

На основании теории множеств рассмотрим следующие виды характеристик множеств данных операций, определенных в (17) и (18), соответствие между оценками, которых необходимо проверить, и определим их экономико-производственный смысл:

1) мощность – свойство множеств данных верхнего уровня учета, которое характеризуют разнообразие (количество видов операций, запасов, поставщиков, покупателей и т.д.) и масштаб деятельности предприятия: количество операций по видам, количество хозяй-

ственных средств и источников по видам; размерность – свойство множеств, которое определяет количество характеристик деятельности предприятия: операций, хозяйственных средств и источников – множество характеристик χ^1;

2) замкнутость, открытость, предельные точки – свойства множеств данных верхнего уровня учета, которые характеризуют экономико-производственную деятельность предприятия с точки зрения достижения предельных значений по за период отчетности (мощность предприятия, финансовые ресурсы, оборотные средства) – множество закономерностей χ^2;
3) плотность, изолированные, точки сгущения – свойства структуры множеств данных верхнего уровня учета, которые характеризуют непрерывность и равномерность экономико-производственной деятельности предприятия, например, по времени, или другим показателям множеств операций или их комбинациям – множество закономерностей χ^3;
4) взаимосвязи элементов множеств – свойства множеств данных верхнего уровня учета, которые характеризуют особенности осуществления множеств и подмножеств операций – множество закономерностей χ^4.

В следствие отображения (16) и соотношений (17) и (18), существует отображение характеристик данных множеств:

$$\overline{\chi}((\mathrm{Оп}^{\mathrm{p}}_{\Re}(T)) \longrightarrow \overline{\chi}(\mathrm{Оп}^{\mathrm{d}}_{\Re}) \qquad (19)$$

где $\overline{\chi}$ – набор характеристик множеств операций.

Вектор характеристик, определенный в (19) имеет следующую структуру:

$$\overline{\chi} = \left(\chi^1, \chi^2, \chi^3, \chi^4\right), \qquad (20)$$

где χ^k, $k = \overline{1,4}$ характеристики множества, определенные выше.

Сущность методики обобщенно-множественного отображения информации заключается в следующем. На основании правил отображения множеств определяются взаимно-однозначные соответствия их обобщенных характеристик. На основании проверки реализации взаимно-однозначного соответствия обобщенных характеристик $\overline{\chi}$ выделяются эквивалентные подмножества. Подмножества, между которыми нет взаимно-однозначного соответствия обобщенных характеристик $\overline{\chi}$ определяются как не эквивалентные и поступают в подсистему аналитического учета для углубленного анализа. Также делаются выводы по соответствию отображений функциональным взаимосвязям, а на их основании выводы о реализации данных взаимосвязей.

Возможности и преимущества данной методики. Применение данной методики позволит:

- уменьшить объем анализируемых многомерных данных или фактической проверки на нижних уровнях за счет выделения эквивалентных подмножеств на верхних уровнях;
- использовать результаты полиальтернативного анализа по набору характеристик множеств данных для подготовки принятия решений с полиальтернативными критериями оценивания эквивалентности множеств в ИТ многоуровневой СППР аудита;
- определять причину неэквивалентности данных, за счет определения функциональных взаимосвязей, реализация которых не соответствует свойствам отображений.

Выводы. Представленные результаты являются составляющими методики применения специального математического и информационного обеспечения при проектировании подсистемы экспресс-аудита верхнего уровня СППР аудита.

Дальнейшие исследования предполагают формирование методики создания специального математического и информационного обеспечения при проектировании подсистем углубленного аудита на среднем и нижнем уровне и взаимосвязей между ними.

Список литературы

1. *Xinli Hu.* Effectiveness of information technology in reducing corruption in China / *Xinli, Hu* // Electronic Library, 2015 – Vol. 33. – Issue 1. – P. 52–64.
2. *Андренко Е. А.* Методика атрибутивного выборочного исследования в аудите / *Е. А. Андренко, С. М. Мордовцев* // Бизнес Информ, 2013. – № 2. – С. 200–203.
3. *Ивахненков С. В.* Информационные технологии аудита и внутрихозяйственного контроля в контексте мировой интеграции: монография / *С. В. Ивахненков* – Житомир: ЧП «Рута», 2010. – 432 с.
4. *Jarrod West.* Intelligent Financial Fraud Detection Practices: a comprehensive review / *West Jarrod, M Bhattacharya and R Islam* // Computers & Security, 2016. – Vol. 57. – P. 47–66.
5. *Chi-Chen Lin.* Detecting the financial statement fraud: The analysis of the differences between data mining techniques and experts' judgments / *Lin Chi-Chen, Chiu An-An, Yan Huang Shaio, C. Yen. David* // Knowledge-Based Systems, 2015. – № 89. – P. 459–470.
6. *Mohiuddin Ahmeda.* A survey of anomaly detection techniques in financial domain / *A Mohiuddin, N Mahmooda Abdun, Md Rafiqul Islam* // Future Generation Computer Systems, 2016. – № 55. – P. 278–288.
7. *Згуровський М. З.* «Системний аналіз: Методологія. Проблеми. Приложения». Монографія 2-е видання, перероблене та доповнене / *М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова* – Київ, вид-во «Наукова думка», 2016. – 726 с.
8. *Dai J, Vasarhelyi M. A.* Imagineering Audit 4.0 / *J. Dai, M. A. Vasarhelyi.* // Journal of Emerging Technologies in Accounting, 2016 – № 13(1). – P. 1–15.
9. *Kirkos E.* Data mining techniques for the detection of fraudulent financial statement / *E. Kirkos, C. Spathis, Y. Manolopoulos* // Expert Syst. Appl., 2007– Vol. 32 Issue 4. - p. 995–1003.9.
10. *Нескородева, Т. В.* Методика моделирования проблем аудита синтетического учета в информационных технологиях обработки информации и управления / *Т. В. Нескородева* // Радіоелектронні і комп'ютерні системи, 2015, № 2 (72) – С. 155–158.

References (transliterated)

1. Xinli Hu. Effectiveness of information technology in reducing corruption in Chin. *Electronic Library*. 2015. vol. 33, issue 1. pp. 52–64.
2. Andrenko E. A. Mordovtsev S. M. *Metodika atributivnogo vyborochnogo issledovaniya v audite* [Methods of attributive sampling research in audit]. *Biznes Inform.* 2013, no. 2. pp. 200–203.
3. Ivakhnenkov S. V. *Informatsionnye tekhnologii audita i vnutrikhozyaystvennogo kontrolya v kontekste mirovoy integratsii : monografiya* [Information technology of the audit and internal control in the context of world integration : monograph]. Zhitomir. ChP "Ruta" Publ., 2010. 432 p.
4. Jarrod West, Bhattacharya M., Islam R. Intelligent Financial Fraud Detection Practices: a comprehensive review. *Computers & Security*. 2016. vol. 57. pp. 47–66.
5. Chi-Chen Lin, Chiu An-An, Shaio Yan Huang, David C. Yen. Detecting the financial statement fraud: The analysis of the differences between data mining techniques and experts' judgments. *Knowledge-Based Systems.* 2015, no. 89. pp. 459–470.
6. Mohiuddin Ahmeda. Mahmooda Abdun N, Rafiqul Islam Md. A survey of anomaly detection techniques in financial domain. // *Future Generation Computer Systems.* 2016, № 55. pp. 278–288.
7. Zhurovs'kyy M. Z., Pankratova N. D. *Systemnyy analiz: Metodolohiya. Problemy. Prylozhenyya. Monohrafiya 2-e vydannya, pereroblene ta dopovnene* [System Analysis: Methodology. Problems Applications. Monograph 2nd edition, revised and supplemented] Kyyiv, vyd-vo «Naukova dumka», 2016. – 726 p.
8. Dai J, Vasarhelyi M. A. Imagineering Audit 4.0 / J. Dai, M. A. Vasarhelyi. // *Journal of Emerging Technologies in Accounting.* 2016 - № 13(1). - P. 1-15.
9. Kirkos E. Data mining techniques for the detection of fraudulent financial statement / E. Kirkos, C. Spathis, Y. Manolopoulos // Expert Syst. Appl. – 2007– vol. 32 Issue 4. - p. 995–1003.9.
10. Neskorodeva T. V. *Metodika modelirovaniya problem audita sinteticheskogo ucheta v informatsionnykh tekhnologiyakh obrabotki informatsii i upravleniya* [The modeling technique of synthetic accounting audit issues in information technology of information processing and management]. *Radioelektronni i komp'yuterni sy'stemy'*. 2015, no. 2 (72) – pp. 155–158.

Поступила (received) 02.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Правила і складові частини методики узагальнено-множинного відображення інформації в підсистемі експрес-аналізу СППР аудиту / Т. В. Нескородєва // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 58–64. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Правила и составные части методики обобщенно-множественного отображения информации в подсистеме экспресс-анализа СППР аудита / Т. В. Нескородева // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 58–64. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Rules and components of a generalized-multiple display method of information in the express analysis subsystem of the audit decision support system / T. V. Neskorodieva // Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 51 (1272). – P. 58–64. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0023.

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Нескородєва Тетяна Василівна – кандидат технічних наук, доцент, Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, доцент кафедри математики і математичних методів в економіці; тел.: (050) 137-75-20; e-mail: t.neskorodieva@donnu.edu.ua.

Нескородева Татьяна Васильевна – кандидат технических наук, доцент, Донецкий национальный университет имени Васыля Стуса, Винница, доцент кафедры математики и математических методов в экономике; тел.: (050) 137-75-20; e-mail: t.neskorodieva@donnu.edu.ua.

Neskorodieva Tatiana Vasilevna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Donetsk national University named Vasyl Stus, Associate Professor at the Department of mathematics and mathematical methods in Economics; tel.: (050) 137-75-20; e-mail: t.neskorodieva@donnu.edu.ua.

УДК 004.891

Т. В. ХОМ'ЯК, І. О. СУІМА

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ І ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ВІДКРИТТІ ЗАКЛАДУ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА

Пропонується розглянути процес вибору типу закладу ресторанного господарства, а також місця розташування приміщення за пред'явленими критеріями особи, що приймає рішення для обраного типу закладу. Вирішується задача за допомогою методів з систем підтримки прийняття рішень та інформаційних систем в процесі вибору місця розміщення закладу ресторанного господарства.
Зроблені висновки щодо вибору типу закладу ресторанного господарства та його розміщення у м. Дніпро.

Ключові слова: задача розміщення, системи підтримки та прийняття рішень(СППР), метод недомінованих альтернатив, інформаційні інтелектуальні системи, експертні системи.

Предлагается рассмотреть процесс выбора типа заведения ресторанного хозяйства, а также места расположения помещения по заявленным критериям личности, принимающей решения (ОПР) для выбранного типа заведения. Решается задача при помощи методов систем поддержки и принятия решений и информационных систем в процессе выбора места расположения заведения ресторанного хозяйства.
Сделаны выводы о выборе типа заведения ресторанного хозяйства и его размещения в г. Днепр.

Ключевые слова: задача размещения, системы поддержки принятия решений (СППР), метод недоминированных альтернатив, информационные интеллектуальные системы, экспертные системы.

It is proposed to consider the process of choosing the type of restaurant industry, as well as the location of the premises according to the declared criteria of the person making decisions for the chosen type of institution. The issue is solved with the methods from support and decision-making systems and information system in choosing the type of restaurant industry from the restaurant business. System analysis and its decomposition into subsystems were done in the decision-making process. This process is shown in the schemes. It is made the conclusion about choosing the type and placing the establishment of the restaurant industry in the city Dnipro.

Keywords: allocation problem, support system and decision-making system, method of nondominant alternatives, information intelligent systems, expert systems.

Вступ. На сьогодні, в галузі торгівлі найбільш динамічно розвивається ресторанний бізнес. Він є однією із найбільш значущих складових індустрії гостинності. Водночас, ресторанний бізнес, з одного боку, є одним із засобів високоліквідного використання капіталу, а з іншого – середовищем із високою кількістю конкурентів.

У цивілізованому світі він є одним із найбільш розповсюджених видів малого бізнесу, тому заклади та підприємства ведуть між собою постійну боротьбу за сегментацію ринку; за пошук нових та за утримання постійних споживачів їхньої продукції та послуг.

Як відомо, поняття «ресторанний бізнес» для України з'явилось відносно недавно, тому саме для України ресторанний бізнес є одним з найперспективніших.

Актуальність теми дослідження полягає в особливій ролі ресторанних послуг в сучасному українському суспільстві. Для місця розташування закладу ресторанного господарства потрібно розглянути цю задачу в цілому та з різних ракурсів. Для повноти розв'язку задачі, доцільно використовувати різні методи з СППР та порівнювати результати [1].

Метою роботи є аналіз місць для відкриття закладу ресторанного господарства та вивчення методів з системи підтримки та прийняття рішень, які вирішують цю задачу.

Об'єктом дослідження в роботі є процес вибору типу закладу ресторанного господарства (РГ), а також місця розташування приміщення за пред'явленими критеріями ОПР для обраного типу закладу [2].

Предметом дослідження є методи з систем підтримки прийняття рішень та інформаційні системи в процесі вибору місця розміщення закладу ресторанного господарства.

Методи дослідження. Для вирішення складного процесу «відкриття закладу» використано системний аналіз та складено функціональну модель з розкладанням до третього рівня деталізації включно. При проведені системного аналізу отримано задачу обрання типу закладу, яку було вирішено програмно за допомогою метода недомінованих альтернатив. Задачу обрання місця вирішено за допомогою методу аналізу ієрархій та програмно, за допомогою інтелектуальної інформаційної системи (ІІС)[2].

Наукова новизна отриманих результатів полягає у використанні системного підходу для аналізу задачі в цілому та розбиття її на підзадачі. Удосконалено метод недомінованих альтернатив та ІІС за допомогою написання спеціальних вузько направлених програм [3, 4].

Результатом роботи є розроблений комплекс інтелектуально інформаційної системи для вибору місця розміщення закладу ресторанного господарства, рекомендовано до впровадження у задачах пов'язаних з обранням приміщення.

Опис об'єкту. В сьогоденні з'являються десятки різних нових офісів, будуються бізнес-центри, здаються торгівельні та житлові площі. Туристи, офісні працівники, містяни, студенти – усі вони щоденно потребують вирішення питання з харчуванням та проведенням свого вільного часу.

Тому, відкриття закладу РГ буде найдоцільнішим вирішенням цих питань.

Ресторанна аудиторія зменшилась на 30–40% за 2014–2017 роки по зрівнянню докризовим періодом [5]. Але, на даний час після закриття закладів ресторанного господарювання звільнилась дуже велика ніша для відкриття нових закладів

© І. О. Суіма, Т. В. Хом'як, 2017

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

харчування. Але слід пам'ятати, що потрібно ретельно опрацювати як бізнес-план, так і концепцію закладу, інтер'єру, а також не забути про головну складову – вибрати правильне місце розташування та тип закладу.

До сфери ресторанного господарства входять такі типи закладів: ресторан, бар, кафе, кафетерій, їдальня, закусочна, буфет, фабрика-заготівельня, фабрика-кухня, домова кухня, ресторан за спеціальними замовленнями (catering) [6].

Тобто, щоб відкрити будь–який заклад ресторанного господарства, потрібно обрати певний тип закладу згідно з державним стандартом та створювати умови згідно із законом. Зрозуміло, що вибір місця відкриття закладу ресторанного господарства проводиться вже після того, як буде відомо тип закладу та усі умови для нього.

Функціональна модель системи. Для визначення процесу вибору конкретного типу закладу, який найдоцільніше відкривати у даний момент, та його місця розташування побудовано модель (див. рис.1), де I_1 – місця, I_2 – різний тип закладів, C_1 – СППР, C_2 – вказівки особи, що приймає рішення (ОПР), M_1 – обмеження бюджету, M_2 – стан місця, M_3 – площа об'єкта, M_4 – місце знаходження, O_1 – рекомендації до обрання місця, O_2 – рекомендації до обрання типу закладу [3].

На контекстній діаграмі початкового рівня (див. рис. 1) показано, які фактори необхідні на вході (місця та типи закладів). Керувати процесом «відкриття закладу РГ» буде ОПР та рекомендації з СППР. Оцінюються місця за допомогою таких критеріїв: обмеження бюджету (тобто ціна за оренду приміщення), площа об'єкта, місце знаходження. Якщо всі умови виконуються, то на виході отримуємо результат у вигляді рекомендацій щодо обрання місця та типу закладу ресторанного господарства [7].

Наступним рівнем функціональної моделі є декомпозиція контекстної діаграми (див. рис. 2).

Функцію «відкриття закладу РГ» декомпозовано на підфункції:

- Аналіз побажань ОПР;
- Обробка даних;
- Аналіз результатів.

Функція «обробка даних» (див. рис. 3) декомпозована на підфункції:

- Вибір типу закладу;
- Підбір приміщень;
- Оцінка приміщень;

В декомпозиції діаграми є додаткові критерії оцінки для обрання тип закладу РГ – M_5. Ця дуга не йде на діаграми вищого рівня, так як є додатковою змінною.

Функція «аналіз результатів» (див. рис. 4) декомпозована на:

- Отримання порівняльної таблиці;
- Формування висновку.

Після проведеної декомпозиції процесу «відкриття закладу РГ», бачимо, що чим точніше ОПР висловлює свої вимоги та критерії оцінки щодо обрання місць, тим точніше і обґрунтованим буде результат.

Обґрунтований вибір місця для закладу суспільного харчування дасть позитивний вклад в економічний розвиток даного району, також цей вибір гарантує попит вище середнього, що дозволить розвиватись підприємству та не приведе до банкрутства.

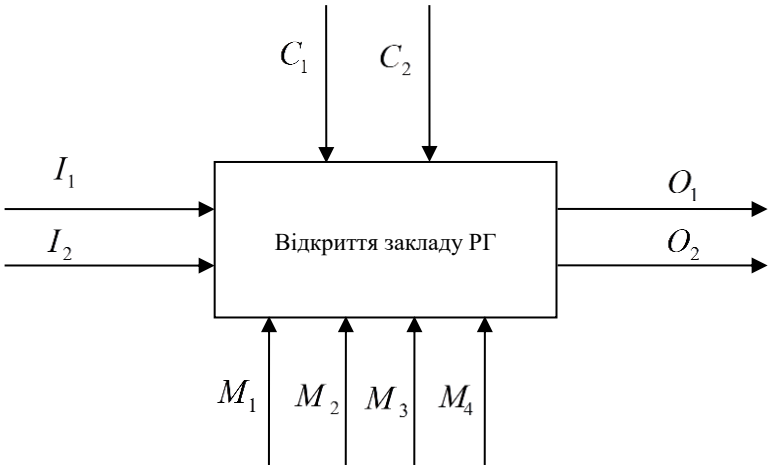


Рис. 1 – Модель процесу відкриття закладу ресторанного господарства

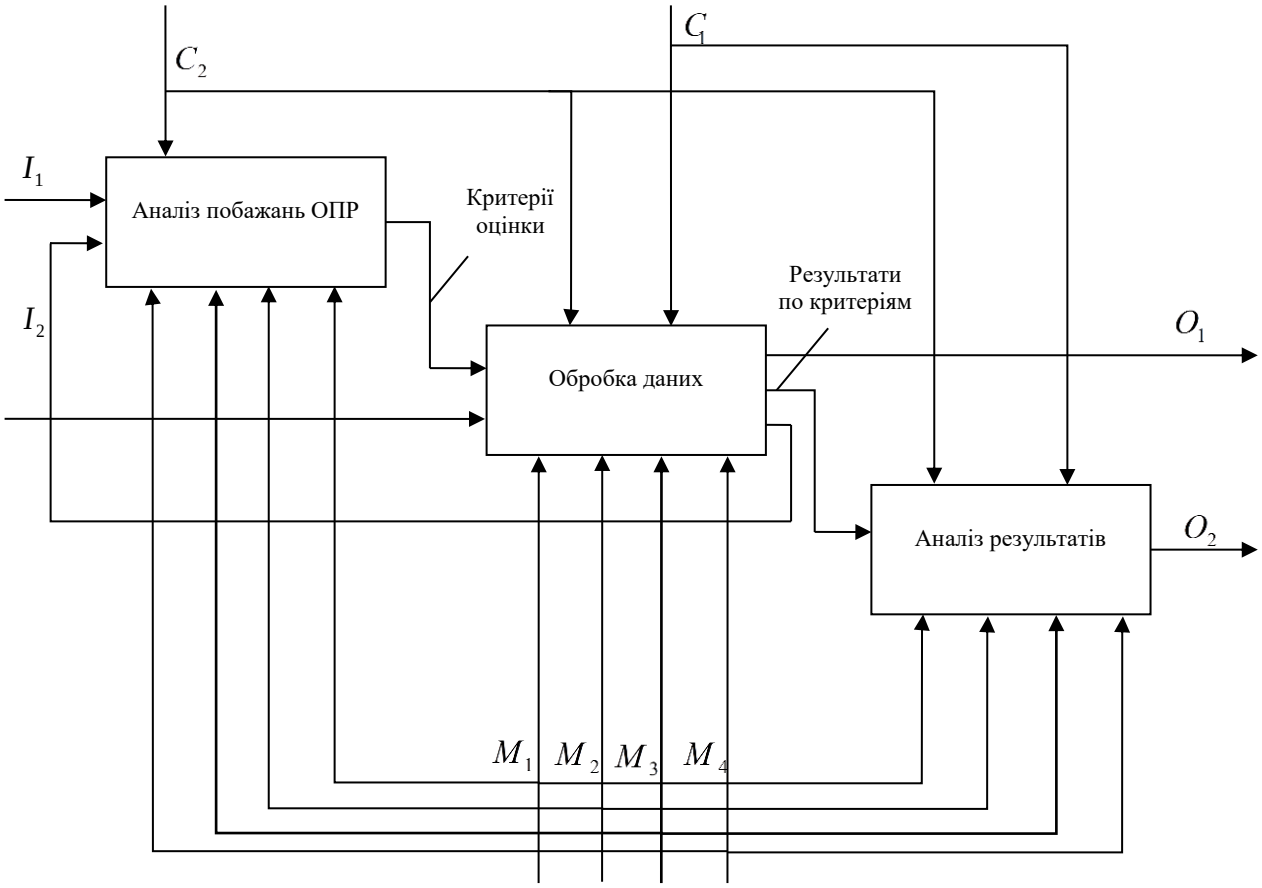


Рис. 2 – Декомпозиція моделі

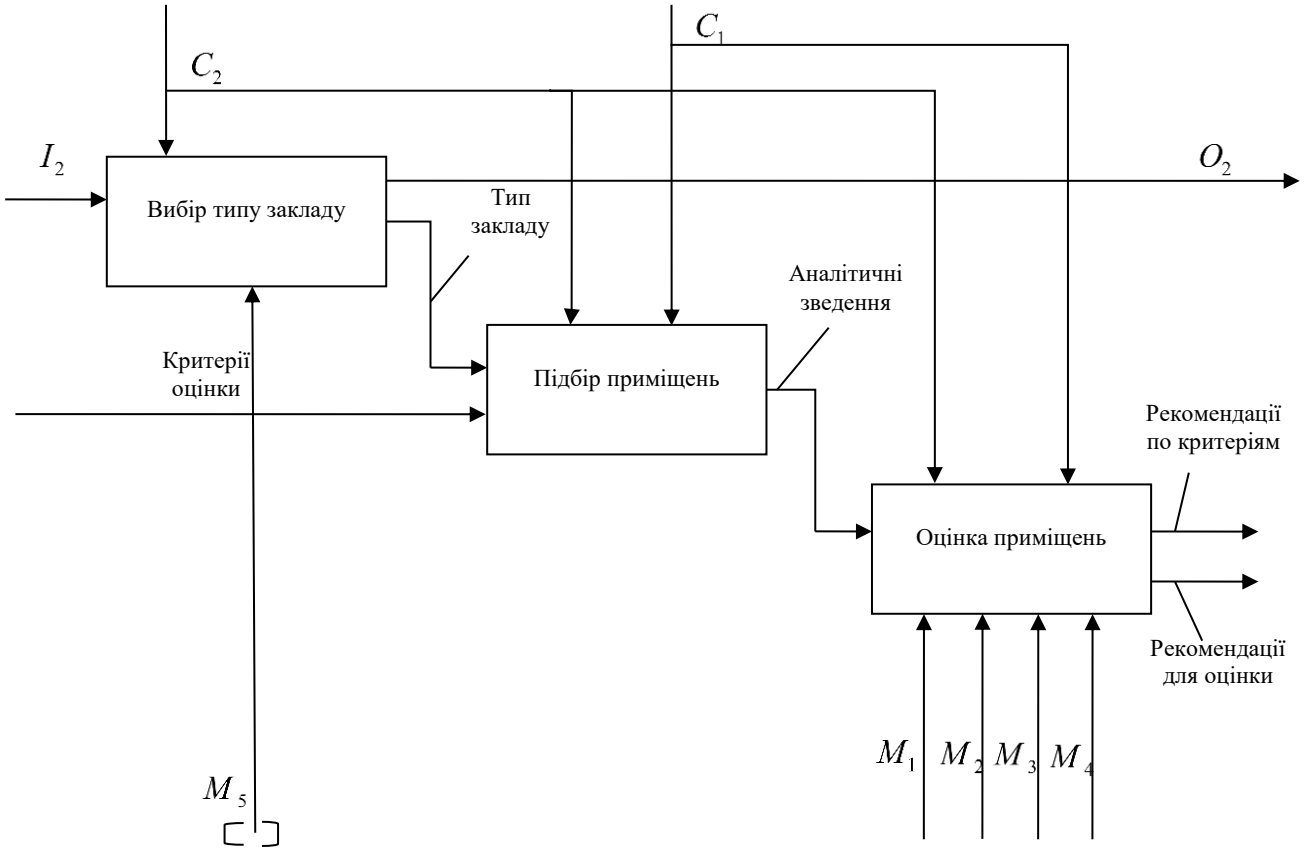


Рис. 3 – Декомпозиція процесу «Обробка даних»

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

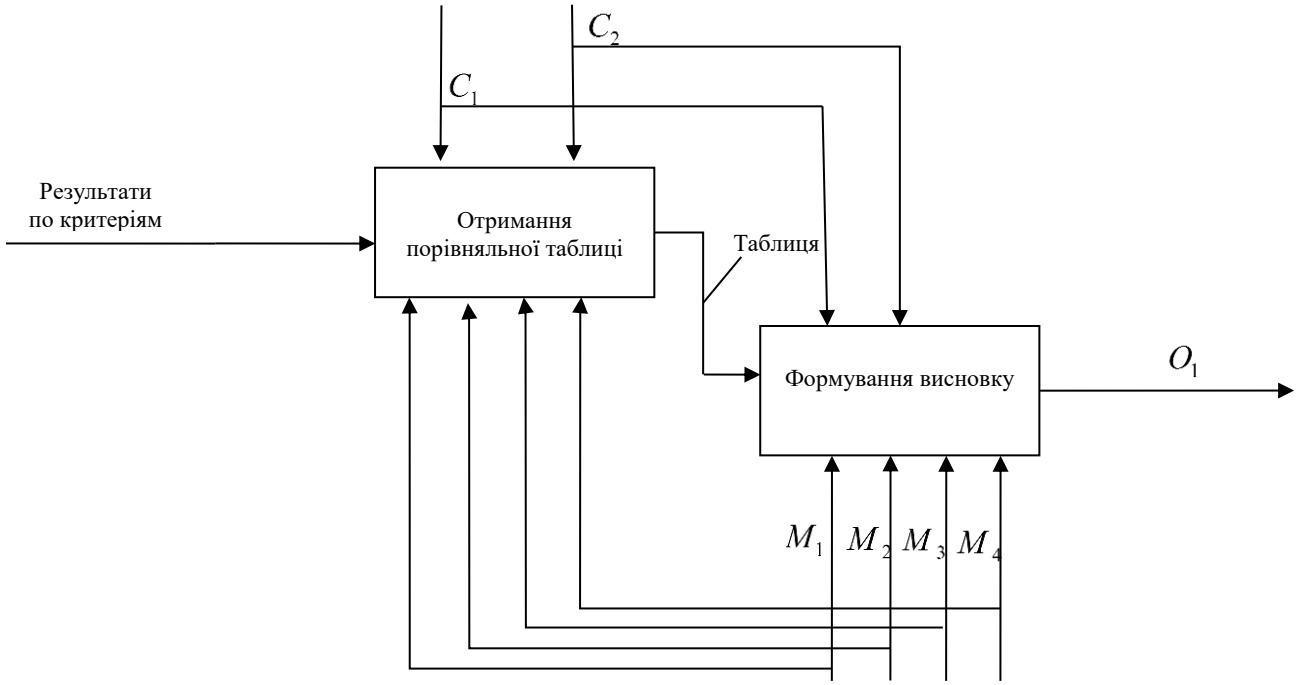


Рис. 4 – Декомпозиція процесу «Аналіз результатів»

Отже, для задачі вибору типу закладу проведено системний аналіз для конкретизації кожного етапу, на основі якого обрано найдоцільніші методи вирішення задачі [8].

Задача обрання типу закладу ресторанного господарства методом недомінованих альтернатив.

Постановка задачі. Подано множину різновидів типів закладів ресторанного господарства $A=\{a_1,a_2,a_3,a_4,a_5,a_6\}$, де a_1 – ресторан, a_2 – бар, a_3 – кафе, a_4 – кафетерій, a_5 – закусочна, a_6 – "catering" (ресторан, за спеціальними замовленнями).

Подано чотири нечіткі відношення переваги: R_1, R_2, R_3, R_4, значущість яких, на думку ОПР, дорівнює відповідно $\lambda_1=0.4$, $\lambda_2=0.3$, $\lambda_3=0.2$, $\lambda_4=0.1$.

Тут R_1 – зайнятість ринку саме цим типом закладу на ринку ресторанного бізнесу; R_2 – актуальність відкриття (низький ризик провалу відкриття); R_3 – асортимент продукції згідно з державним стандартом; R_4 – можливості обслуговування різних груп населення, R_j – відношення переваги [4].

Отже, необхідно здійснити раціональний вибір альтернативи з множини A на основі заданих відношень переваги.

Програма на основі методу недомінованих альтернатив. Для спрощення процесу вирішення задачі прийняття рішень при кількох заданих відношень переваги на множині альтернатив, складено програму на основі методу недомінованих альтернатив у середовищі Visual Basic for Application.

Дані про нечіткі відношення R_1, R_2, R_3, R_4 переваги та відповідні ступені важливості λ_1, λ_2, λ_3, λ_4 записуються на лист Microsoft Excel у відповідні клітинки.

Слід зазначити, що оцінки порівняння альтернатив за критеріями R_1, R_2, R_3, R_4 для усіх альтернатив з множини A були виставлені експертами, які спирались на стандарт та реальну ситуацію насиченості ринку м. Дніпро кожним типом закладу. Попарні оцінки кожної альтернативи знаходяться від 0 до 1 включно, де 1 – найбільший ступінь приналежності певному критерію.

Програма зчитує дані з Листа Microsoft Excel та виводить результати у діалогове вікно з поетапними розрахунками (див. рис. 5).

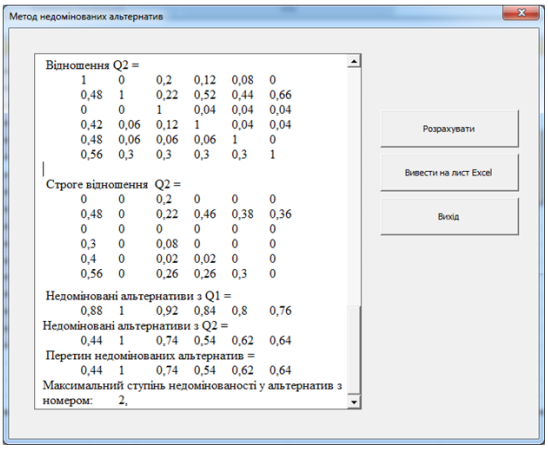


Рис. 5 – Діалогове вікно розробленої програми

Також, усі поетапні розрахунки можна вивести на Лист Microsoft Excel для перевірки правильності обчислень та прослідкувати кожний крок вибору раціональної альтернативи.

Отже, за допомогою програми було отримано, що альтернатива з номером 2 типу "бар", на думку ОПР, є розв'язком задачі вибору типу закладу ресторанного господарства.

Задача вибору місця розташування закладу ресторанного господарства. Розробка інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для вибору місця розміщення бару.

Постановка задачі. Потрібно розробити інтелектуальну систему для вирішення задачі обрання місця розташування закладу ресторанного господарства типу «бар» за допомогою бази даних з відомими (реальними) об'єктами.

Складено базу даних з п'ятдесятьма варіантами розміщення закладу ресторанного господарства на основі сайтів [9,10].

Для поставленої задачі, обрана продукційна модель представлення знань. Це пов'язано з тим, що за допомогою правил, будується логічний висновок від фактів до рішень або від гіпотез до їх підтвердження чи спростування [8].

Також, продукційна модель є найпростішою в реалізації, достатньо наглядною та легко модифікованою. Більшість промислових експертних систем використовують саме продукційну модель представлення знань. Для створення заданої інтелектуальної системи було обрано машину висновку з прямим пошуком вшир.

Так як кількість потенційних рішень велика (50 варіантів вирішення питання), беруться всі факти з їх достовірностями і вибудовується множина ланцюгів до всіх можливих за ймовірністю рішень. Дана стратегія обов'язково передбачає механізм прискорення.

Як відомо, для створення експертної системи потрібно розробити базу даних, в якій будуть зібрані усі альтернативи для подальшого використання в роботі експертної системи.

База даних для інтелектуальної системи підтримки і прийняття рішень для вибору місця розташування кафе в приміщенні має такі поля:

1. № об'єкту – поле для відображання порядкового номеру об'єкту в базі даних.
2. Адреса об'єкту – адреса розташування приміщення.
3. Район розташування – район розташування приміщення.
4. Площа, м^2 – площа приміщення, виражена у метрах квадратних
5. Ціна за 1 кв.м. оренди, грн. – ціна одного квадратного метра в гривнях.
6. Стан приміщення – стан приміщення, який оцінюється за 10-бальною шкалою, де 1 – найнижча оцінка, а 10 – найбільша .
7. Потік потенційних клієнтів – оцінка потоку потенційних клієнтів у числовому вигляді за 10-бальною шкалою.
8. Наявність місця для паркінгу – описує, чи наявне спеціально відведене місце для паркінгу перед приміщенням.
9. Зручний під'їзд до об'єкту – описує, чи наявна зручна дорога для підвозу харчів, обладнання та іншого з «чорного» ходу.
10. Транспортна розв'язка(найближчі зупинки), м – описує, в скількох метрів знаходиться найближча зупинка.
11. Число конкурентів у радіусі 300м – описує кількість конкурентів в радіусі 300 м.

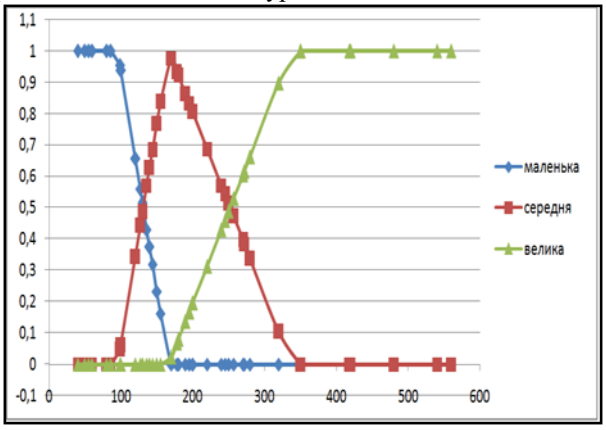
Для повноти опису об'єкту використовуються усі поля з бази даних для розробки бази знань.

Для побудови правил в вигляді продукційної моделі представлення знань, потрібно спочатку провести аналіз даних з бази знань. Для цього, побудуємо гістограми для 4 критеріїв, які є нечіткими та проведемо ідентифікацію законів розподілення величин для них.

Як видно з рис. 6, закон розподілення ідентифікувати складно, тому правила задаємо для трьох, рівних за величиною відрізків. Так само аналізуємо поля знань «ціна за 1 кв.м», «транспортна розв'язка», «число конкурентів».



а



б

Рис. 6 – Ідентифікація закону розподілення:
а – гістограма частоти величин площі; *б* – графік функції приналежності значень площі

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

Для всіх інших критеріїв, правила вибору виглядають як чіткі множини та задані у вигляді таблиць:

1. Стан приміщення (див. табл. 1).

Таблиця 1 – Правила вибору стану приміщення

Бали	1–2	3–4	5–6	7–8	9	10
1–2	1	0,8	0,4	0	0	0
3–4	0,8	1	0,6	0,4	0	0
5–6	0,2	0,5	1	0,6	0,1	0,1
7–8	0	0,1	0,4	1	0,7	0,2
9	0	0	0,3	0,7	1	0,3
10	0	0	0,1	0,2	0,7	1

2. Потік потенційних клієнтів (див. табл. 2).

Таблиця 2 – Правила вибору потоку клієнтів

Оцінка	Низький	Помірний	Високий
Низький	1	0,4	0
Помірний	0,3	1	0,5
Високий	0	0,2	1

3. Наявність місця для паркінгу (див. табл. 3).

Таблиця 3. Правила вибору місця для паркінгу

	так	ні
так	1	0,01
ні	0,01	1

4. Зручний під'їзд до об'єкту (див. табл. 4).

Таблиця 4. Правила вибору для поля Зручний під'їзд

	так	ні
так	1	0,01
ні	0,01	1

Робота експертної системи представлена на рис. 7 та рис. 8.

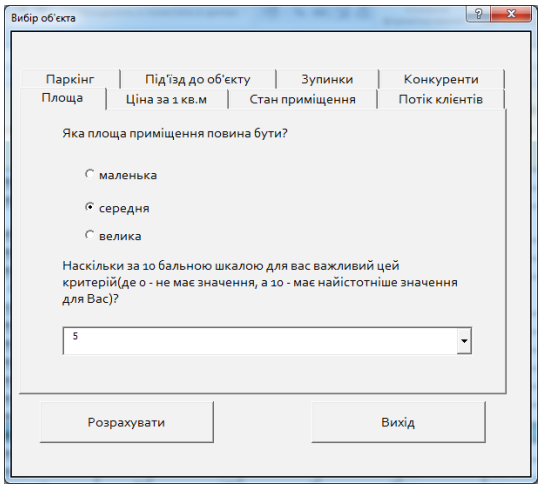


Рис. 7 – Діалогове вікно програми «Вибір об'єкта»

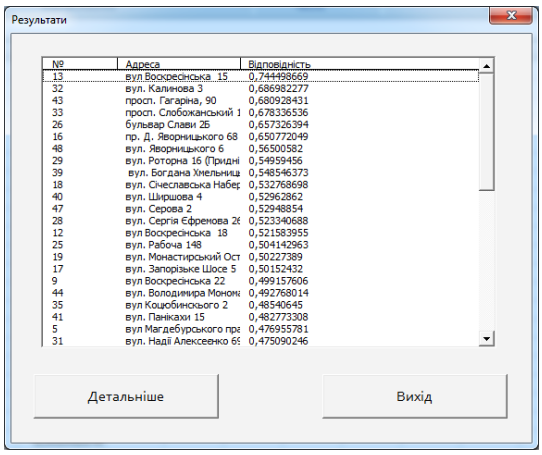


Рис. 8 – Результати роботи експертної системи

Висновки. Для структурування та виділення конкретних етапів робіт при відкритті закладу ресторанного бізнесу, проведено системний аналіз. Це дозволило розділити подане питання на дві основні підзадачі та виділити головні критерії оцінки для ОПР. Додатковою задачею після декомпозиції моделі стало «обрання типу закладу». Цю задачу вирішено за допомогою одного із методів СППР, а саме методом недомінованих альтернатив та складено на його основі програму. У результаті було отримано рекомендації щодо відкриття закладу типу «бар». Головну задачу «обрання місця» вирішено за допомогою використання технологій з інтелектуальних систем.

Отже, розроблений програмний комплекс може якісно оцінювати вільні приміщення та обирати той тип закладу ресторанного господарства, який згідно з експертними оцінками ситуації на ринку ресторанного бізнесу найдоцільніше відкривати саме в цей час та в цьому місці.

Список літератури

1. *Волошин О. Ф.* Моделі та методи прийняття рішень: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / *О. Ф. Волошин, С. О. Мащенко*. – 2-ге вид., перероб. та допов. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет". – 2010. – 336 с.
2. *Ларичев О. И.* Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития / *О.И. Ларичев, Петровский А.В.* – М.: ВИНИТИ, 1987. – 163 с.
3. *Суіма І. О.* Системний аналіз вибору місця розташування кафе / *І. О. Суіма, Т. В. Хом'як* // Матеріали наук.-техн. конф. «Інформатика, математика, автоматика» (18–22 квітня 2016 р., Суми). – Суми: СумДУ, 2016. – С. 252.
4. *Суіма І. О.* Метод недомінованих альтернатив для розв'язання задачі вибору типу закладу ресторанного господарства / *І. О. Суіма, Т. В. Хом'як* // Матеріали наук.-техн. конф. «Наукова весна – 2016» (6–7 квітня 2016р., Дніпро). – Д.: Державний ВНЗ "НГУ", 2016. – С. 420.
5. *Суіма І. О.* Задача вибору типу закладу ресторанного господарства / *І.О. Суіма, Т.В. Хом'як* // Матеріали XIV всеукр. наук.-прак. конф. «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики» (26–28 травня 2016р., м. Київ). – ВІП ВПК "Політехніка", 2016. – С.77.
6. ДСТУ 4281:2004. Заклади ресторанного господарства. Класифікація. – К. : Держстандарт України, 2004. – 18 с.
7. *Брук Б. Н.* Методы экспертных оценок в задачах упорядочения объектов. Техническая кибернетика. – 1972. – №3. – С. 3–11.
8. *Глущак Ю. І.* Використання прогресивних інформаційних технологій в державному управлінні / Ю. *І. Глущак, О. І. Огірко*. Львів УАДУ при Президенті України, Львів, 2002.
9. Оренда приміщень у м. Дніпро. – Режим доступу: http://olx.ua/uk/nedvizhimost/arendapomeschenіy/dnepropetrovsk/

10. Оренда торгових приміщень в м. Дніпро. – Режим доступу: http://dnepropetrovsk.krysha.ua/arendatorgovyhdnepropetrovsk.html.

References (transliterated)

1. Voloshyn O. F., Mashchenko S. O. *Modeli ta metody pryiniattia rishen* [Models and Methods of Decision Making]. K, Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr "Kyivskyi universytet" Publ., 2010. 336 p.
2. Larychev O. Y., Petrovskyi A. V. *Systemi podderzhky pryniatyia reshenyi. Sovremennoe sostoianye y perspektyvu ykh razvytyia* [Decision support systems. Current state and prospects of their development]: vol.21 Ser. Tekhnycheskaia kybernetyka. Ytohy nauky y tekhnyky. – Moscow, VYNYTY Publ, 1987. 163 p.
3. Suima I. O., Khomyak T.V *Systemnyi analiz vyboru mistsia roztashuvannia kafematerialy* [System analysis of the location of the cafe]. *Materialy nauk.-tekhn. konf. «Informatyka, matematyka, avtomatyka» (18–22 kvitnia 2016, Sumy)* [Informatics, mathematics, automation Sci.-Pract. Conf (18–22 April 2016, Sumy)]. Sumy, SumDUPubl., 2016, pp. 252.
4. Suima I. O., Khomyak T.V. *Metod nedominovanykh alternatyv dlia rozviazannia zadachi vyboru typu zakladu restorannoho hospodarstva* [The method of unsustainable alternatives for solving the problem of choosing a restaurant type restaurant type]. *Materialy nauk.-tekhn konf. «Naukova vesna – 2016» (6–7 kvitnia 2016, Dnipro)* [Scientific Spring–2016 Sci.-Pract. Conf (6–7 April 2016, Dnipro)]. Dnipro, VNZ "NHU", 2016, pp. 420.
5. Suima I. O., Khomyak T. V. *Zadacha vyboru typu zakladu restorannoho hospodarstva* [The task of choosing a restaurant type restaurant type]. *Materialy XIV vseukr. nauk.-prak. konf. «Teoretychni i prykladni problemy fizyky, matematyky ta informatyky» (26–28 travnya 2016, Kyiv)* [Theoretical and applied problems of physics, mathematics and informatics the XIV int. Sci.-Pract. Conf (26–28 May 2016, Kyiv)]. Kyiv,VPI VPK "Politekhnika" Publ., 2016, pp. 77.
6. DSTU 4281:2004. *Zaklady restorannoho hospodarstva. Klasyfikatsiia* [Catering establishments. Classification]. – Kiev, Derzhstandart Ukrayiny Publ., 2004, 18 p.
7. Bruk B. N. *Metodi ekspertnikh otsenok v zadachakh uporiadochenyia obektov. Tekhnycheskaia kybernetyka* [Methods of expert assessments in problems of object ordering. Technical Cybernetics]. – 1972. – no.3. – pp. 3–11.
8. Hlushchak Yu. I. *Vykorystannia prohresyvnykh informatsiinykh tekhnolohii v derzhavnomu upravlinni* [Use of advanced information technologies in public administration]. Lviv, UADU with President of Ukraine Publ., Lviv, 2002.
9. Orenda prymishchen u m. Dnipropetrovsk [Rent of premises in Dnipro]. Available at: http://olx.ua/uk/nedvizhimost/arendapomescheniy/dnepropetrovsk/
10. Orenda torhovykh prymishchen u m. Dnipro [Rent of premises in Dnipro]. Available at: http://dnepropetrovsk.krysha.ua/arenda-torgovyhdnepropetrovsk.html.

Надійшла (received) 05.09.2017

Бібліографічні описи /Библиографические описания /Bibliographic descriptions

Розробка системи підтримки і прийняття рішень при відкритті закладу ресторанного господарства/ Т. В. Хом'як, І. О. Суіма //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 65–71. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Разработка системы поддержки и принятия решений при открытии заведения ресторанного хозяйства / Т. В. Хомяк, И. А. Суима //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 65–71. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Support system and decision-making system development at opening institution restaurant industry / T. V. Khomyak, I. O. Suima // Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 51 (1272). – P. 65–71.– Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів /Сведения об авторах /AbouttheAuthors

Хом'як Тетяна Валеріївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», доцент кафедри Системного аналізу та управління, м. Дніпро; тел.:(050) 159-93-83; e-mail: khomyak-tanya@rambler.ru, khomyak.t.v@gmail.com

Хомяк Татьяна Валерьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, государственное высшее заведение «Национальный горный университет», доцент кафедры Системного анализа и управления, г. Днепр; тел.:(050) 159-93-83; e-mail: khomyak-tanya@rambler.ru, khomyak.t.v@gmail.com

Khomyak Tetiana Valeriivna – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, «National Mining University», Associate Professor at the Departmentof System analyzies and management, Dnipro; tel.:(050)159-93-83; e-mail: khomyak-tanya@rambler.ru, khomyak.t.v@gmail.com

Суіма Інна Олександрівна – державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», студент, м. Дніпро; тел.: (093) 252-69-46; e-mail: suimainna@gmail.com

Суима Инна Александровна - государственное высшее заведение «Национальный горный университет», студент, г. Днепр; тел.: (093) 252-69-46; e-mail:suimainna@gmail.com

Suima Inna Oleksandrivna – «National Mining University», student, Dnipro; tel.:(093) 252-69-46; e-mail: suimainna@gmail.com

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

ЗМІСТ

Куценко А. С., Товажнянский В. И. Комбинированная система автоматического управления тепловым состоянием здания с прогнозирующей моделью 3
Никулина Е. Н., Северин В. П., Лукинова Д. А. Моделирование переходных режимов ядерного реактора ВВЭР-1000 с учетом борного регулирования 8
Воловецький В. Б., Василенко С. В., Витязь О. Ю., Борин В. С., Щирба О. М., Гнітко А. В. Вибір раціонального режиму періодичної експлуатації газових та газоконденсатних свердловин 14
Дорофеев Ю. И., Никульченко А. А. Дескрипторный подход к синтезу децентрализованного гарантирующего управления запасами в сетях поставок с неопределенными запаздываниями 21
Godlevskiy M. D., Goloskokova A. A., Chipizhenko A. A. Medium-term planning information technology for quality improvment of the software development process based on the CMMI model 32
S***okol V. E., Tkachuk M. V., Vasetka Y. M.*** Adaptive training system for IT-companies personnel: design principals, architectural models and implementation technology 38
Корр А. М., Orlovskyi D. L., Kuka D. O. An approach to forming dashboards for business processes state analysis 44
Чалый С. Ф., Левыкин И. В. Методи динамічного визначення пріоритетів доступу до ресурсів в задачах прецедентного управління наскрізними бізнес-процесами 53
Нескородева Т. В. Правила и составные части методики обобщенно-множественного отображения информации в подсистеме экспресс-анализа СППР аудита 58
Хом'як Т. В., Суіма І. О. Розробка системи підтримки і прийняття рішень при відкритті закладу ресторанного господарства 65

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Збірник наукових праць

Серія:
Системний аналіз, управління
та інформаційні технології

№ 51 (1272) 2017

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. М. Д. Годлевський,
д-р техн. наук, проф. О. С. Куценко
Технічний редактор канд. техн. наук, проф. М. І. Безменов

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра системного аналізу, управління та інформаційно-аналітичних технологій.
Тел.: (057) 707-61-03, (057) 707-66-54; e-mail: bezmenov@kpi.kharkov.ua

Обл.-вид № 32–17.

Підп. до друку 22.12.2017 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 10,0.
Тираж 100 пр. Зам. № 693-17. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул Кирпичова, 2

Друкарня «ФОП Пісня О. В.»
Свідоцтво про державну реєстрацію ВО2 № 248750 від 13.09.2007 р.
61002, Харків, вул. Гіршмана, 16а, кв. 21, тел. (057) 764-20-28