

Анализ последних исследований и публикаций

Наиболее опасной в такой конструкции является зона сварных швов, в которой имеются поры, трещины и включения, где наблюдаются максимальные остаточные деформации. Исследование прочности и надежности пластин с трещинами представлены в ряде источников [1–7]. Для определения несимметричных силовых и температурных факторов, используем компьютерный расчет с учетом связанности температурной и силовой компонент [8–11]. Такой расчет позволит учесть влияние изменения давления и температуры на концентрацию напряжений в сварном шве. Отметим, что решение задач в связанной постановке может занимать сотни часов работы компьютера. Оценка величины коэффициентов интенсивности напряжений в вершине трещин в зависимости от вида приложенной нагрузки и соответствующего времени расчета является главной целью проводимого исследования.

Цель исследования

В статье проведено исследование различных схем приложения нестационарных температурных и силовых воздействий в расчете сварных швов конструкции в связанной термоупругой постановке с учетом взаимного влияния различных дефектов.

Целью данного исследования является определение затрачиваемого времени на решение задачи и точность определения напряженно-деформированного состояния конструкции при различных методах приложения нагрузок.

Изложение основного материала исследования

Рассмотрим три схемы приложения нагрузок к коробу.

Схема 1. Максимальные температуры и давления прилагаются к пластинам короба аналогично работе [11].

Для тестирования расчетной схемы 2 предлагаем рассмотреть задачу об асимметричном ударе по пластинам короба, затухающие во времени.

Применим следующее асимптотическое решение для компонент напряжения в окрестности вершины трещины [12]:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_1(t)}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(1)}(\theta) + \frac{K_{11}(t)}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(1)}(\theta) + \sigma_{ij}^{(R)}(r, \theta, t) + O\left(r^{\frac{1}{2}}\right), \quad r \rightarrow 0. \quad (1)$$

Здесь r, θ – полярные координаты в вершине трещины.

Асимптотическое решение (1) состоит из сингулярной и регулярной частей. Поэтому для оценки направления распространения трещины воспользуемся структурно-временным критерием [12].

Основная особенность расчета динамического разрушения по такому критерию состоит в том, что он позволяет рассчитывать время до разрушения рассматриваемого элемента конструкции. Это дает возможность по-новому и достаточно просто определять направление разрушения в области с трещиной. При этом определяется время до разрушения t на каждом луче, исходящем из вершины трещины под углом θ ($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$). Предполагается, что трещина разрастается в направлении, на котором время до разрушения t минимально.

Для исследования расчетной схемы 3 решим тепловую задачу с приложением температурных нагрузок и определим прочность шва в виде сквозной задачи.

Для решения связанной термоупругой задачи требуется также определение следующих параметров: удельной теплопроводности, удельной теплоемкости и температуры короба. С достаточной точностью эти величины могут быть определены по зависимостям (5–7) λ_0, c_{p0}, T_0 из [13]:

$$\begin{aligned}\mu(T) &= 3,4 \cdot 10^{-8} \cdot T^{0.69}, \\ \lambda(T) &= \lambda_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0.75}, \\ c_p(T) &= c_{p0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0.165}.\end{aligned}$$

Тепловой поток, подводимый к пластинам короба, вследствие конвективного теплообмена при натекании струи на пластины короба, определяется по формуле, приведенной в [14]:

$$q_k = \alpha \cdot (T - T_w).$$

Здесь α – коэффициент теплообмена, (Вт/(м²·К)); T – температура газа, (К); T_w – температура стенки, (К).

В работе исследовано взаимное влияние пор, включений, раковин диаметром (0,0015–0,0025 м) на раскрытие трещин различной длины (0,006–0,012 см), с использованием различных схемы приложения силовых и температурных нагрузок к пластинам, составляющим короб.

Для решения нестационарной задачи предлагается использовать пошаговый алгоритм по времени [11].

Исходные данные по геометрии модели и физико-механическим характеристикам материала используем из работы [11]. Предполагаем, что включения и трещины находятся в сварном шве, соединяющем две пластины толщиной 4 см каждая. Считаем, что трещина имеет длину L , а микровключение, (раковина, пора) находится на расстоянии L_1 от трещины, рис. 1б).

Построена базовая конечно-элементная модель короба с использованием трехмерных элементов типа "solids". На рис. 1 б) показана конечно-элементная модель конструкции и сварного шва с дефектами, соединяющего две пластины. В работе исследованы три расчетных схемы, характеризующих силовое и температурное воздействие на пластинчатую конструкцию.

Расчетная схема 1 характеризуется тем, что к пластинам приложены максимальные как давление, так и температура, одинаковые по всей поверхности короба. При использовании расчетной схемы 2 предполагается, что величина давления изменяется равномерно как по высоте, так и по ширине пластины в каждый момент времени, а приложенная температура имеет максимальное значение, постоянное по всей поверхности. В расчетной схеме 3 принято, что величина температуры равномерно изменяется как по высоте, так и по ширине пластины в каждый момент времени, а величина приложенного давления максимальна и одинакова по всей поверхности.

Исследование картины растрескивания поверхностей внутри сварного шва при наличии различных дефектов проводилось с использованием трех указанных схем приложения температур и давления.

Анализ результатов численного расчета по теме исследования.

Рассматривались прямоугольные пластинки с такими размерами: пластина 1 $a=400$ см; $b=2100$ см, толщиной $h=4$ см, пластина 2 $a=400$ см; $b=1100$ см, толщиной $h=3$ см. Материал пластинок – сталь 10ХСНД. Модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно равны $E=2.1 \cdot 10^6$ кгс/см²; $\nu=0.3$. Плотность материала пластинки равна $\rho=0.0079$ кг/см³.

В табл. 1-3 приведены данные расчетов и приложенная температурная нагрузка. Так, при рассмотрении взаимного влияния трещины и поры по схемам 1 и 2 прикладывалась температура 210° , по схеме 3 прикладывалась температура, изменяющаяся в пределах 110° – 210° . Пределы изменения давления во всех рассмотренных расчетных схемах принимались равными 3000 – 3360 кг/см². Расчет по времени проводился в интервале от 0 до 10 сек.

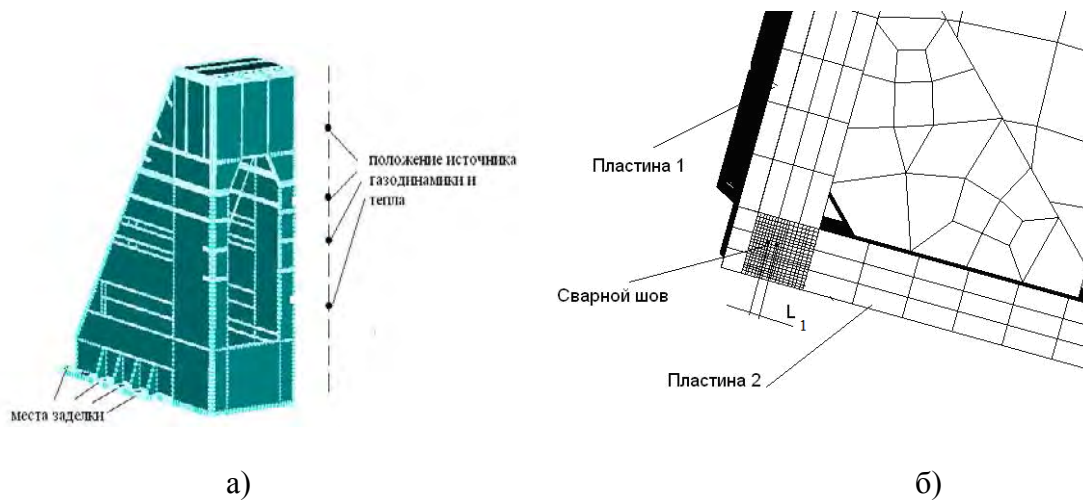


Рис. 1. Схема приложения нагрузок и конечно-элементная модель.

В работе анализируется влияние различных схем приложения термосиловой нагрузки на картину развития трещин в сварном шве при наличии различных дефектов, находящихся в непосредственной близости от трещины.

Для первой расчетной схемы коэффициент интенсивности напряжений, полученный методом конечных элементов, обозначен $K_{Срасч1}$ при максимальной величине как давления, так и температуры.

Для второй расчетной схемы коэффициент интенсивности напряжений, полученный методом конечных элементов, обозначен $K_{Срасч2}$. Отметим, что величина этого коэффициента немного меньше полученного по первой расчетной схеме, так как вклад в развитие трещины от давления меньше, чем от температуры.

Для третьей расчетной схемы коэффициент интенсивности напряжений, полученный методом конечных элементов, обозначен как $K_{Срасч3}$. Величина этого коэффициента значительно меньше, так как вклад в развитие трещины от температуры значительно выше, чем от давления.

Рассматривались различные положения трещины и поры относительно сварного шва. Введены следующие обозначения: T – температура; L – длина трещины; L_1 – расстояние между включением и трещиной; $K_{Срасч}$ – коэффициент интенсивности напряжений полученный методом конечных элементов (для различных схем нагружения); $K_{Стаб}$ – критический коэффициент интенсивности напряжений.

Таблиця 1

Результаты расчета: поры и трещина

$T, ^\circ\text{C}$	$L, \text{ м}$	$L_1, \text{ м}$	$K_{\text{Срасч1}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч2}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч3}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Стаб}}, \text{ МПа м}^{1/2}$
110-210	0,006	0,003	25	24,5	24	45,6
	0,008	0,003	37	36,4	36,2	45,11
	0,010	0,003	44	43,6	43,2	46,3
	0,012	0,003	48	47,8	47,5	46,3

Таблиця 2

Результаты расчета: включение и трещина

$T, ^\circ\text{C}$	$L, \text{ м}$	$L_1, \text{ м}$	$K_{\text{Срасч1}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч2}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч3}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Стаб}}, \text{ МПа м}^{1/2}$
110-210	0,006	0,003	24	23,4	23,2	45,6
	0,008	0,003	34	33,6	33,4	45,11
	0,010	0,003	42	41,7	41,5	46,3
	0,012	0,003	49	48,8	48,6	46,3

Таблиця 3

Результаты расчета: раковина и трещина

$T, ^\circ\text{C}$	$L, \text{ м}$	$L_1, \text{ м}$	$K_{\text{Срасч1}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч2}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч3}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Стаб}}, \text{ МПа м}^{1/2}$
110-210	0,006	0,003	29	28,4	28,1	45,6
	0,008	0,003	41	40,5	40,2	45,11
	0,010	0,003	46	45,7	45,3	46,3
	0,012	0,003	47	46,8	46,5	46,3

Выводы

Результаты проведенных расчетов позволили сделать следующие выводы.

Оценка времени расчетов показала, что применение расчетной схемы 1 дает время расчета 40-50 минут; расчетной схемы 2 – 36-48 часов; расчетной схемы 3 – 18-28 часов.

Качественная оценка показала, что расчетная схема 1 работает в запас прочности; ее использование дает минимальное время расчета, при этом отличие по результатам составляет не более 1% от критического коэффициента интенсивности напряжений, полученного аналитическим методом [15]. Как показали вычисления, расчетная схема 1 дает наибольшие значения напряжений и перемещений. Именно такая схема может быть использована для быстрой оценки состояния конструкции.

Анализ величин критических коэффициентов интенсивности напряжений по трем расчетным схемам показал, что они отличаются в пределах от 0,5% до 2%. Применение расчета в полной связанной постановке по схемам 2 и 3 для определения возможности продления срока службы конструкции для подобных типов нагрузок неприемлемо для быстрой оценки состояния конструкции.

В дальнейшем предполагается оценить математическое ожидание времени до разрушения конструкции при нестационарном нагружении при наличии различных дефектов в сварных швах.

Список использованной литературы

1. Кит Г.С. Определение трехмерных температурных полей и напряжений в бесконечном теле с разрезами / Г.С. Кит, М.В. Хай // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. — 1982. — № 5. — С. 60-67.
2. Коваленко А.Д. Основы термоупругости / А.Д. Коваленко. — Киев: Наук. думка, 1970. — 307 с.
3. Станюкович А.В. Хрупкость и пластичность жаропрочных материалов / А.В. Станюкович. — М.: Металлургия, 1967. — 199 с.
4. Кит Г.С. Нестационарная задача термоупругости для пластинки с трещиной при наличии теплоотдачи с боковых поверхностей / Г.С. Кит, О.В. Побережный // Физико-химическая механика материалов. — 1976. — Т. 12. — № 4. — С. 73-78.
5. Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий. — М.: Мир, 1975. — 872 с.
6. Прочность при малоцикловом нагружении / Под. ред. С. В. Серенсена. — М.: Наука, 1975. — 285 с.
7. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости / В. Новацкий. — М.: Мир, 1970. — 256 с.
8. Даутов Р.З. Введение в теорию метода конечных элементов / Р.З. Даутов, М.М. Карчевский. — Казань: Казанский госуд. университет, 2004. — 239 с.
9. Алтухов Е.В. Метод И.И. Воровича в трехмерной теории термодинамики пластин / Е.В. Алтухов // Теорет. и прикл. механика. — Донецк, 2005. — Вып. 41. — С. 3-8.
10. Бородин П.Ю. Динамическая связанная задача термоупругости в различных пространственных приближениях / П.Ю. Бородин // Мат. моделирование. — 1998. — Т. 10. — № 3. — С. 61-82.
11. Стрельникова О. Дослідження взаємного впливу включення на ланцюжку пор в зварному шві під впливом термосилового навантаження / О. Стрельникова, О. Ковч // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2016. — Т. 3. — № 7 (81). — С. 9-14.
12. Морозов Н.Ф. Проблемы динамики разрушения твердых тел / Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров. — СПб, 1997. — 132 с.
13. Беляев Н.М. Управление вектором тяги и теплообмен в ракетных двигателях на твердом топливе / Н.М. Беляев, В.М. Ковтуненко, Ф.И. Кондратенко. — Москва, 1968. — 420 с.
14. Авдуевский В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / В.С. Авдуевский. — М.: Машиностроение, 1992. — 528 с.
15. Партон В.З. Динамика хрупкого разрушения / В.З. Партон, В.Г. Борисковский. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.

References

1. Kit, G. S., Hay, M. V. Opredelenie trehmernyh temperaturnykh poley i napryazheniy v beskonechnom tele s razrezami. Izv. AN SSSR. Mehanika tverdogo tela. **5**, 60-67. (1982)
2. Kovalenko, A. D. Osnovy termouprugosti. Nauk. Dumka. Kiev. (1970)
3. Stanyukovich, A. V. Hrupkost i plastichnost zharoprochnykh materialov. Metallurgiya. Moscow. (1967)

4. Kit, G. S., Poberezhnyy, O. V. Nestacionarnaya zadacha termouprugosti dlya plastinki s treschinoy pri nalichii teplootdachi s bokovyh poverhnostey. Fiziko-himicheskaya mehanika materialov. **12**, 4, 73-78. (1976)
5. Novackiy, V. Teoriya uprugosti. Mir. Moscow. (1975)
6. Prochnost pri malociklovom nagruzhennii. Pod. red. S. V. Serensena. Nauka. Moscow: (1975).
7. Novackiy, V. Dinamicheskie zadachi termouprugosti. Mir. Moscow. (1970)
8. Dautov, R. Z., Karchevskiy, M. M. Vvedenie v teoriyu metoda konechnykh elementov. Kazanskiy gosud. universitet. Kazan. (2004)
9. Altuhov, E. V. Metod I.I. Vorovicha v trehmernoy teorii termodinamiki plastin. Teoret. i prikl. mehanika. **41**, 3-8. (2005)
10. Borodin, P. Yu. Dinamicheskaya svyazannaya zadacha termouprugosti v razlichnykh prostranstvennykh priblizheniyah. Mat. modelirovanie. **10**, 3, 61-82. (1998)
11. Strelnikova, O., Kovch, O. Doslidzhennya vzaemnogo vplivu vkladyuchennya na lancyuzhku por v zvarnomu shvi pid vplivom termosilovogo navantazhennya. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal передовых технологий. **3**, 7 (81), 9-14. (2016)
12. Morozov, N. F., Petrov, Yu. V. Problemy dinamiki razrusheniya tverdykh tel. SPb. (1997)
13. Belyaev, N. M., Kovtunenکو, V. M., Kondratenko, F. I. Upravlenie vektorom tyagi i teploobmen v raketnykh dvigatelyah na tverdom toplive. Moscow. (1968)
14. Avduevskiy, V. S. Osnovy teploperedachi v aviacionnoy i raketno-kosmicheskoy tehnikе. Mashinostroenie. Moscow. (1992)
15. Parton, V. Z., Boriskovskiy, V. G. Dinamika hrupkogo razrusheniya. Mashinostroenie. Moscow. (1988)

УДК 539.3

Д.В. КРЮТЧЕНКО

Институт проблем машиностроения НАН Украины им. А.М. Подгорного

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОСТИ В ПРИЗМАТИЧЕСКОМ РЕЗЕРВУАРЕ

Разработан метод исследования свободных и вынужденных колебаний жидкости в жестком призматическом резервуаре. Предполагается, что жидкость в резервуаре идеальная, несжимаемая, а её течение, вызванное действием приложенной нагрузки, безвихревое. Давление жидкости на стенки резервуара определяется из интеграла Коши-Лагранжа. Рассмотрен случай периодического внешнего воздействия в горизонтальном направлении. Определены собственные значения и формы колебаний жидкости в призматическом резервуаре. Определены резонансные частоты. Задача может быть обобщена на случай задачи в нелинейной постановке с учетом нелинейных составляющих в интеграле Коши-Лагранжа.

Ключевые слова: резервуар с жидкостью, свободные и вынужденные колебания, периодическое внешнее воздействие.

Д.В. КРЮТЧЕНКО

Институт проблем машинобудування НАН України ім. А.М. Підгорного

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИМУШЕНИХ КОЛИВАНЬ РІДИНИ В ПРИЗМАТИЧНОМУ РЕЗЕРВУАРІ

Розроблено метод дослідження вільних та вимушених коливань рідини в жорсткому призматичному резервуарі. Вважається, що рідина в резервуарі є ідеальною, нестисливою, а її рух, викликаний дією прикладеного навантаження, є безвихровим. Тиск рідини на стінки резервуара визначається з лінеарізованого інтеграла Коши-Лагранжа. Розглянуто випадок періодичного зовнішнього впливу, що діє в горизонтальному напрямку. Визначені власні значення та форми коливань рідини в призматичному резервуарі. Визначено резонансні частоти. Задача може бути узагальнена на випадок задачі в нелінійній постановці з урахуванням нелінійних складових в інтегралі Коши-Лагранжа.

Ключові слова: резервуар з рідиною, вільні та вимушені коливання, періодичний зовнішній вплив.

D. KRIUTCHENKO

A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems

COMPUTER MODELING LIQUID FORCED VIBRATIONS IN A PRISMATIC TANK

The method to simulate free and forced liquid vibrations in a prismatic tank is proposed. The liquid is supposed to be ideal, incompressible, and its current caused by applied loading is irrotational. The problem of force vibrations is solved by using the eigenmodes as basic functions. The resonance frequencies are defined. Thin-walled structure elements are widely used in different engineering areas: chemical and aerospace industries, transportation, oil and gas producing. Usually these structures operate at intensive thermal and stress loadings, in interaction with fluids located in their containers. These loadings can cause the destruction of thin shells containing dangerous liquids that will be a reason of ecological catastrophe. So the

topical issue here is a problem of estimation of stress-strain characteristics, frequencies and modes of vibrations of such facilities. Liquid sloshing often occurs when the extremely loads are applied to the structure elements with compartments partially filled with different liquids. Vibration modes are usually affected by liquid sloshing modes, so the coupled problem of fluid-structure interaction is crucial. Since analytic solutions do not exist for tanks and reservoirs with complicated geometrical shapes, in addition to the analytical methods, numerical methods have been employed for solutions of linear boundary value problems of liquid sloshing. Also the presence of baffles can drastically change the dynamical behaviour of fluid-filled structures. This paper is devoted to free and forced vibrations of prismatic and cylindrical tanks filled with an incompressible ideal liquid. The dynamic analysis of shell structures is often performed by use of finite and boundary element programs. The liquid pressure on the walls of the reservoir is defined by Cauchy-Lagrange integral. The external horizontal periodic loading is considered. The eigenvalues and modes of free liquid vibrations in prismatic tank are obtained. The problem can be generalized in the case of the problem in non-linear formulation taking into account non-linear components in Cauchy-Lagrange integral.

Keywords: fuel tank, free and forced vibrations, baffle, periodic external loading

Постановка проблемы

Оболочечные конструкции широко используются в технике как резервуары для хранения жидкости. Плескание жидкости – это интересный физический феномен огромнейшего практического значения, имеющий приложения в широком спектре технологий и технических дисциплин. Это явление наблюдается в движущихся резервуарах, содержащих жидкость, таких как топливные баки ракет, баки, применяющиеся в морском и космическом транспорте, в хранилищах, плотинах, находящихся под сейсмическим воздействием, а также в реакторах и атомных судах. Когда топливный бак заполнен частично, большое количество топлива движется внутри бака с поступательным и вращательным ускорением, и генерирует плескания. Контроль плесканий топлива крайне необходим для обеспечения устойчивости космического корабля. Ряд катастроф в полетах произошел именно вследствие неустойчивости, вызванной плесканиями [1].

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ исследований, посвященных проблемам плескания жидкости в резервуарах, дан в работах R. A. Ibrahim's [2]. Свободные и вынужденные колебания цилиндрических резервуаров с жидкостью рассмотрены в работах [3–5].

Цель исследования

Разработать модель свободных и вынужденных колебаний жидкости в жестком призматическом резервуаре при действии периодической горизонтальной нагрузки. Исследовать зависимость уровня подъема жидкости в резервуаре от времени. Установить характер поведения жидкости в резервуаре в зависимости от частоты вынуждающей силы.

Изложение основного материала исследования

Постановка задачи. В данной статье рассмотрена задача о колебаниях жидкости в призматическом резервуаре, вид которого показан на рис.1.

Обозначим боковые поверхности призматического резервуара через S_i , $i = 1, 2, 3, 4$, поверхность днища S_b , а свободную поверхность S_0 .

Для моделирования области, занятой жидкой средой, разработана математическая модель, основанная на следующих гипотезах: жидкость несжимаемая и невязкая,

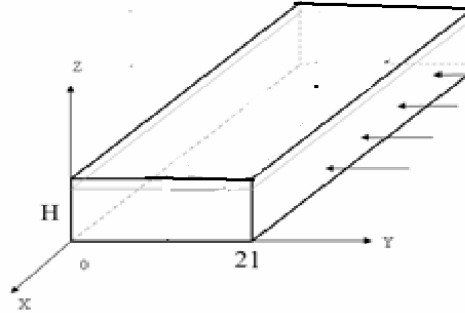


Рис. 1. Призматический резервуар.

движение жидкости безвихревое, необходимо рассматривать только малые колебания (линейная теория). Поэтому можно ввести скалярный потенциал скоростей $\Phi(x, y, z, t)$:

$$V_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x}; V_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y}; V_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z},$$

удовлетворяющий уравнению Лапласа. Предположим, что резервуар движется с постоянной горизонтальной скоростью $U = (U, 0, 0)$. Представим потенциал скоростей в виде

$$\varphi = Ux + \Phi,$$

где Φ – потенциал возмущенных скоростей. Величину давления p на стенки оболочки определяем из линеаризованного интеграла Коши-Лагранжа по формуле:

$$p = -\rho_l \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi}{\partial x} + gz \right) + p_0,$$

в которой g – ускорение свободного падения, z – координата точки жидкости, отсчитываемая в вертикальном направлении, ρ_l – плотность жидкости, p_0 – атмосферное давление.

На смоченной поверхности оболочки и перегородке ставится граничное условие непротекания. На свободной поверхности должны быть выполнены динамическое и кинематическое граничные условия.

$$\text{Обозначим } S_w = S_b \cup S_{s_1} \cup S_{s_2} \cup S_{s_3} \cup S_{s_4}.$$

Граничные условия для потенциала скоростей следующие. На стенках и днище выполнено условие непротекания:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_w} = 0. \tag{1}$$

На свободной поверхности S_0 выполнены кинематическое и динамическое условия:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad p - p_0|_{S_0} = 0$$

где функция ζ описывает форму и положение свободной поверхности.

Таким образом, для потенциала скоростей имеем следующую краевую задачу:

$$\nabla^2 \Phi = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_w} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad p - p_0 \Big|_{S_0} = 0. \quad (2)$$

Последнее условие с использованием интеграла Коши-Лагранжа принимает вид:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi}{\partial x} + gz \right|_{S_0} = 0 \quad (3)$$

Для выполнения условий разрешимости краевой задачи (3)-(4) необходимо также удовлетворить условию Неймана:

$$\int_{S_0} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} dS = 0.$$

Продифференцируем уравнение (4) по t :

$$\left. \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right|_{S_0} = 0. \quad (4)$$

Подставим в уравнение (4) выражение для $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ из уравнения (2):

$$\left. \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} + U \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \right|_{S_0} = 0. \quad (5)$$

Требуется определить гармоническую функцию Φ , удовлетворяющую уравнению Лапласа, и функцию $\zeta(x,y,t)$ из граничных условий (2), (5).

Определение собственных форм колебаний жидкости в жестком резервуаре.

Собственные формы и частоты колебаний жидкости в призматическом резервуаре определены методом разделения переменных Фурье.

Сначала находим решение краевой задачи (3), (5).

$$\Psi_{kl} = A_{kl} \operatorname{ch} \lambda_{kl} z \cos \frac{\pi k}{2a} x \cos \frac{\pi l}{2b} y, \quad \lambda_{kl} = \sqrt{\left(\frac{\pi k}{2a} \right)^2 + \left(\frac{\pi l}{2b} \right)^2}.$$

Удовлетворяя условию на свободной поверхности, получим, что $\lambda_{kl} \operatorname{sh} \lambda_{kl} H = \frac{\omega_{kl}^2}{g} \operatorname{ch} \lambda_{kl} H$. Отсюда находим выражение для собственных частот жидкости в призматическом резервуаре:

$$\omega_{kl} = \sqrt{g \lambda_{kl} \tanh(\lambda_{kl} H)}.$$

Приведем также выражения для первых 8 собственных форм колебаний жидкости (это система базисных функция для решения задачи о вынужденных колебаниях):

$$\begin{aligned}
 \Psi_{01}(x) &= C_1 \cos(0 \cdot x) \sin \frac{\pi}{2b} y, & \Psi_{10}(x) &= C_2 \sin \frac{\pi}{2a} x \cos(0 \cdot y), \\
 \Psi_{02}(x) &= C_5 \cos 0x \cos \left(\frac{\pi}{b} y\right), & \Psi_{20}(x) &= C_4 \cos \frac{\pi}{a} x \cos(0y), \\
 \Psi_{12}(x) &= C_7 \sin \frac{\pi}{2a} x \cos \frac{\pi}{b} y, & \Psi_{21}(x) &= C_6 \cos \frac{\pi}{a} x \sin \frac{\pi}{2b} y, \\
 \Psi_{11}(x) &= C_3 \sin \frac{\pi}{2a} x \sin \frac{\pi}{2b} y, & \Psi_{22}(x) &= C_8 \cos \frac{\pi}{a} x \cos \frac{\pi}{b} y.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

В табл. 1 приведены численные значения частот ω_{ij} и частотного параметра λ_{ij} для призматического резервуара в форме куба с геометрическими характеристиками $a=b=H=1$ м при разных значениях скорости.

Таблица 1

Собственные частоты колебаний жидкости в призматическом резервуаре

n	i	j	λ_{ij}	$U=0, \omega_{ij}$	$U=15$	$U=30$
1	0	1	1.772453851	4.051164194	3.013608	0.15785737
2	1	0	1.772453851	4.051164194	3.013608	0.15785737
3	1	1	2.506628275	5.710012556	4.140593	0.62512577
4	0	2	3.544907703	5.892165855	4.566877	1.11022302
5	2	0	3.544907703	5.892165855	4.566877	1.11022302
6	2	1	3.963327298	6.233151691	5.562521	4.14059338
7	1	2	3.963327298	6.233151691	5.562521	4.14059338
8	2	2	5.013256550	7.012538645	6.035193	5.99932672

Найдем функцию ζ . Используем следующее выражение для потенциала скоростей:

$$\Phi = \sum_{n=1}^M \dot{c}_n(t) \Phi_n,$$

где зависимость $n = n(i, j)$ показана в табл. 1, функции Φ_n определяются по формуле:

$$\Phi_n = \frac{1}{ab} \frac{\cosh(\lambda_{ij}z)}{\cosh(\lambda_{ij}H)} \Psi_{ij}(x, y); \quad n = n(i, j),$$

в которой Ψ_{ij} находятся по соотношениям (6). Получим форму свободной поверхности:

$$\zeta = \sum_{n=1}^M c_k(t) \frac{\partial \Phi_k}{\partial n}.$$

Формы колебаний свободной поверхности показаны на рис. 2:

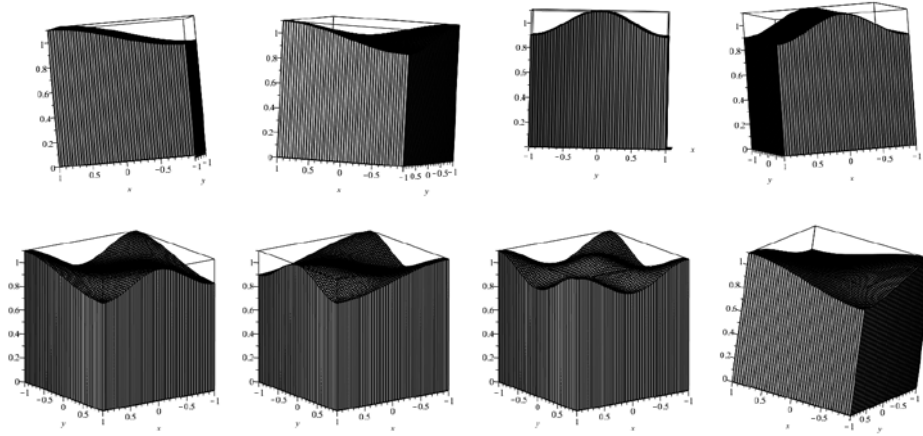


Рис. 2. Формы колебаний свободной поверхности.

Свободные колебания жидкости в движущемся резервуаре. Предположим, что в начальный момент времени жидкость в резервуаре находилась в состоянии покоя. На резервуар действует периодическая нагрузка, приложенная в горизонтальном направлении (параллельно оси Ox). Составим систему дифференциальных уравнений движения жидкости, исходя из граничного условия на свободной поверхности:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta(x, y) + U \frac{\partial \Phi}{\partial x} + xa_s(t) \right|_{z=H} = 0, \quad \Phi = \sum_{k=1}^N \dot{c}_k(t) \Phi_k(x, y, H). \quad (7)$$

Подставляя выражения (9) в соотношение (8), получим:

$$\sum_{k=1}^N \ddot{c}_k(t) \Phi_k(x, y, H) + g \sum_{k=1}^N c_k(t) \left. \frac{\partial \Phi_k(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=H} + U \sum_{k=1}^N \dot{c}_k(t) \left. \frac{\partial \Phi_k(x, y, z)}{\partial x} \right|_{z=H} = 0. \quad (8)$$

Умножим равенство (9) скалярно на Φ_n и воспользуемся ортогональностью собственных форм. Получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \ddot{d}_1(t) + \omega_1^2 d_1(t) - \frac{8}{9\pi^2} \cos \omega t = 0, \quad \ddot{d}_2(t) + \omega_2^2 d_2(t) - \frac{8}{25\pi^2} \cos \omega t = 0, \\ \ddot{d}_3(t) + \omega_3^2 d_3(t) - \frac{8}{121\pi^2} \cos \omega t = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь для удобства введены обозначения $d_i = c_{i0}$. Система (10) при нулевых начальных условиях имеет следующее решение:

$$d_1(t) = -\frac{8}{9\pi^2(\omega_1^2 - \omega^2)}(\cos \omega t - \cos \omega_1 t), \quad d_2(t) = -\frac{8}{25\pi^2(\omega_2^2 - \omega^2)}(\cos \omega t - \cos \omega_2 t),$$

$$d_3(t) = -\frac{8}{121\pi^2(\omega_3^2 - \omega^2)}(\cos \omega t - \cos \omega_3 t). \quad (10)$$

Находим изменение уровня подъема свободной поверхности в зависимости от времени в точке ξ с координатами $x=1, y=1, z=1$ в течение 10 сек нагружения. Эта зависимость показана на рис. 3.

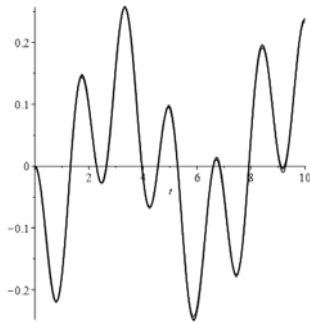


Рис. 3. Изменение уровня подъема свободной поверхности.

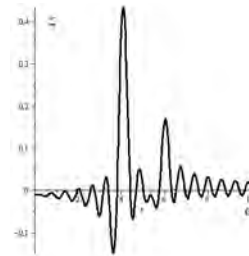


Рис. 4. Изменение уровня подъема свободной поверхности в зависимости от частоты нагружения.

На рис. 4 показано влияние частоты нагружения на уровень подъема свободной поверхности. При этом амплитуда колебаний вычислялась по формуле:

$$\zeta = \sum_{k=1}^3 \dot{d}_k(t) \frac{\partial \Phi_k}{\partial z}(x, y, H),$$

в которой коэффициенты $d_k(t)$ определялись формулами (12) в момент времени $t = 10$ сек.

Пики на графике соответствуют частотам ω_{10} и ω_{20} (табл. 1). Эти частоты являются наиболее опасными, например, при транспортировке рассматриваемого бака.

По полученным результатам видно, что вещественная часть частот колебаний для всех рассмотренных случаях равна нулю, что свидетельствует о устойчивости движения резервуара. С увеличением скорости мнимые части наименьших частот стремятся к нулю. Такое явление соответствует потери устойчивости по дивергентной форме.

На рис. 5 приведены три первые формы колебаний, соответствующие наименьшим частотам при скорости и при $U=30$ м/с. Формы колебаний при наличии скорости изменились существенно.

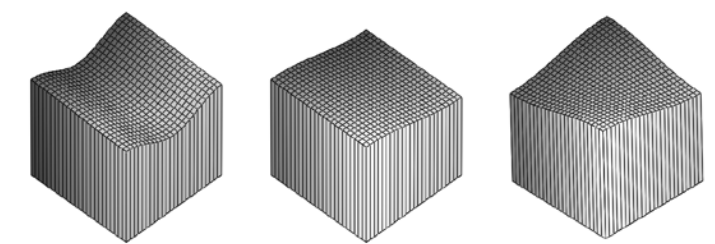


Рис. 5. Форма колебаний свободной поверхности призматического резервуара.

Выводы

Разработан метод расчета призматического резервуара с жидкостью при действии периодической горизонтальной нагрузки. Определена зависимость уровня подъема жидкости в резервуаре от времени. Установлен характер поведения жидкости в резервуаре в зависимости от частоты вынуждающей силы. В дальнейшем предполагается изучить рассматриваемую задачу в нелинейной постановке с учетом нелинейных составляющих в интеграле Коши–Лагранжа.

Список использованной литературы

1. Sidi M.J. *Spacecraft Dynamics and Control* / M.J. Sidi. — New York: Cambridge University Press, 1997. — 409 p.
2. Ibrahim R.A. *Liquid Sloshing Dynamics* / R.A. Ibrahim. — New York: Cambridge University Press, 2005. — 948 p.
3. Gnitko V. BEM and FEM analysis of the fluid-structure Interaction in tanks with baffles / V. Gnitko, K. Degtyariv, V. Naumenko, E. Strelnikova // *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. — 2017. — Vol. 5. — № 3. — P. 317-328.
4. Krutchenko D.V. Discrete singularities method in problems of seismic and impulse impacts on reservoirs / D.V. Krutchenko, E.A. Strelnikova, Yu.S. Shuvalova // *Вісник Харківського національного університету. Серія "Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління"*. — 2017. — Т.35. — №1. — С. 31-37.
5. Ravnik J. BEM and FEM analysis of fluid-structure interaction in a double tank / J. Ravnik, E. Strelnikova, V. Gnitko, K. Degtyarev, U. Ogorodnyk // *WIT Transactions on Modelling and Simulation*. — 2014. — Vol. 57. — P. 13-25.

References

1. Sidi, M. J. *Spacecraft Dynamics and Control*. Cambridge University Press. New York. (1997)
2. Ibrahim, R. A. *Liquid Sloshing Dynamics*. Cambridge University Press. New York. (2005)
3. Gnitko, V., Degtyariv, K., Naumenko, V., Strelnikova, E. BEM and FEM analysis of the fluid-structure Interaction in tanks with baffles. *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. **5**, 3, 317-328. (2017)
4. Krutchenko, D. V., Strelnikova, E. A., Shuvalova Yu. S. Discrete singularities method in problems of seismic and impulse impacts on reservoirs. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu. Seriiia "Matematychnе modeliuвання. Informatsiini tekhnolohii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia"*. **35**, 1, 31-37. (2017)
5. Ravnik, J., Strelnikova, E. , Gnitko, V., Degtyarev, K., Ogorodnyk U. BEM and FEM analysis of fluid-structure interaction in a double tank. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*. **57**, 13-25. (2014)

УДК 519.6

В.Ю. КЫЛЫННЫК

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

В.И. ГНИТЬКО, Ю.В. НАУМЕНКО

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной академии наук Украины

Л.В. РОЗОВА

Харьковский политехнический институт "Национальный технический университет"

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕВАНИЙ ЖИДКОСТИ В СОСТАВНЫХ
ОБОЛОЧКАХ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ**

Исследованы свободные колебания жидкости в составных оболочках вращения, состоящих из цилиндрической и конической частей. Предполагается, что жидкость является идеальной и несжимаемой, а ее движение, вызванное колебаниями оболочки – потенциальное. Использован метод собственных форм. Задача сведена к решению системы сингулярных интегральных уравнений. Применен метод граничных элементов. Определены частоты и формы колебаний жидкости в составной цилиндрическо-конической оболочке. Сделан анализ влияния перегрузок на частоты колебания составных оболочек.

Ключевые слова: составные оболочки вращения, идеальная несжимаемая жидкость, метод конечных элементов, метод граничных элементов, частоты и формы колебаний, свободные колебания жидкости, сингулярные интегральные уравнения.

В.Ю. КИЛИННИК

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

В.І. ГНІТЬКО, Ю.В. НАУМЕНКО

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України

Л.В. РОЗОВА

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОЛИВАНЬ РІДИНИ В СКЛАДЕНИХ
ОБОЛОНКАХ ОБЕРТАННЯ ПРИ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯХ**

Досліджено вільні коливання рідини в оболонках обертання, які складаються з циліндричної та конічної частин. Вважається, що рідина є ідеальною і нестисливою, а її рух, індукований коливаннями оболонки, є потенційним. Застосовано метод власних форм. Задачу зведено до розв'язання системи сингулярних інтегральних рівнянь. Використано метод граничних елементів. Визначені частоти і форми коливань рідини в складеній циліндрично-конічній оболонці. Зроблено аналіз впливу перевантажень на частоти коливання складених оболонок.

Ключові слова: складові оболонки обертання, ідеальна нестислива рідина, метод скінченних елементів, метод граничних елементів, частоти і форми коливань, вільні коливання рідини, складені оболонки обертання, сингулярні інтегральні рівняння.

V.Yu. KYLYNNYK

V.N. Karazin Kharkiv National University

V.I. GNITKO, Yu.V. NAUMENKO

A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems

L.V. ROZOVA

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

NUMERICAL SIMULATION OF LIQUID VIBRATION IN COMPOSITE SHELLS OF REVOLUTION UNDER OVERLOADS

The free fluid vibrations in the shells of revolution having cylindrical and conical parts are considered. To simulation the region occupied by the fluid, a mathematical model is developed based on the following hypotheses: the fluid is incompressible and inviscid, and its motion, caused by shell oscillations-potential, the only small oscillations are considered. In the course of the work, a mixed boundary-value problem is formulated for the Laplace equation. The modes decomposition method is applied. The problem is reduced for the solving of the system of singular integral equations. In the course of the solution, it was revealed that the kernels of integral equations contain complete elliptic integrals of the first and second kind. An elliptic integral of the second kind is calculated using Gauss's standard quadrature formula. For an elliptic integral of the first kind, an approach based on the characteristic property of the arithmetic mean AGM is used. To solve outer integrals, special Gaussian quadrature formulas are applied. The developed method is applied further for the analysis of free vibrations of shell structures. The boundary element method is applied in a straightforward form. At the first stage, a necessary number of boundary elements is determined to find the eigenfrequencies with a given accuracy. The frequencies and forms of fluid oscillations in a compound cylindrical-conical shell are determined. A comparison is made between the frequencies of axisymmetric fluid vibrations in a cylindrical shell obtained using by the method and the analytical formula developed in this work. Also, the values of the first seven vibration frequencies of composite shells are given for different lengths of the cylindrical part. The analysis is made of the effect of overloads on the vibration frequencies of composite shells.

Keywords: composite shells of rotation, ideal incompressible fluid, method of the finite elements, method of the boundary elements, frequencies and forms of the oscillations, free vibrations of a liquid, composite shells of the revolution, singular integral equations.

Постановка проблемы

Герметичные оболочечные конструкции для хранения и транспортировки жидкости являются предметом интенсивных исследований в течение последних 50 лет. Большое количество различных типов модельных тестовых задач рассмотрено и решено в последнее десятилетие. Исследование свободных колебаний жидкости в составных оболочках вращения представляет большой практический интерес.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ исследований, посвященных проблемам плескания жидкости в резервуарах, дан в работах R. A. Ibrahim's [1–2]. Оболочкам, состоящим из цилиндрических и конических частей, в научной литературе уделено меньшее внимание, несмотря на то, что такие тонкостенные конструкции широко используются в разных отраслях техники. Обзор исследований по этой теме [2–3] показывает, что большое влияние на динамическое поведение конструкции с жидкостью оказывают вибрации упругих стенок и взаимодействие с плещущейся жидкостью. Свободные и вынужденные колебания цилиндрических резервуаров с жидкостью рассмотрены в работах [4–5]. Отметим, что в большинстве исследований не учитывается влияние силы тяжести, вызывающей плескания.

Цель исследования

Постановка задачи. В этой статье рассмотрена задача о колебаниях жидкости в составной оболочке вращения. Предполагается, что оболочка может состоять из цилиндрической и конической частей. Обозначим смоченную часть поверхности оболочки S_1 , а свободную поверхность S_0 . Предположим, что декартова система

координат $Oxyz$ зв'язана с оболочкой, свободная поверхность совпадает с плоскостью $z = H = H_1 + H_2$ в состоянии покоя (рис.1).

Для моделирования области, занятой жидкой средой, разработана математическая модель, основанная на следующих гипотезах: жидкость является несжимаемой и невязкой, движение жидкости безвихревое, необходимо рассматривать только малые колебания (линейная теория). Поэтому можно ввести скалярный потенциал скоростей $\Phi(x, y, z, t)$, удовлетворяющий уравнению Лапласа.

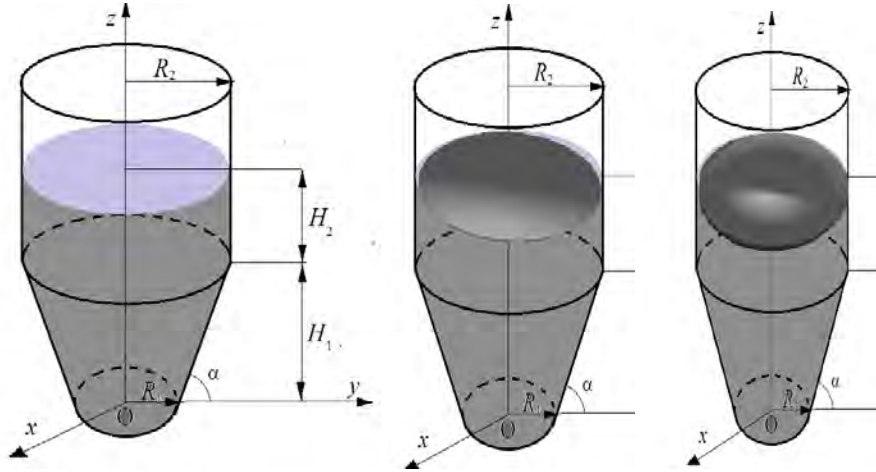


Рис. 1. Оболочки вращения с жидкостью и формы колебаний свободной поверхности.

Давление жидкости $p = p(x, y, z, t)$, действующее на смоченной поверхности, получено из линеаризованного уравнения Бернулли для потенциального потока:

$$p = -\rho_l \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz \right), \quad p_s = -\rho_l gz, \quad p_d = -\rho_l \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad (1)$$

где g – гравитационное ускорение, z – вертикальная координата точки в жидкости, ρ_l – плотность жидкости, p_s и p_d – статическая и динамическая компоненты давления жидкости, p_0 – атмосферное давление.

На свободной поверхности жидкости должны быть удовлетворены следующие граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta \right|_{S_0} = 0.$$

Функция ζ здесь описывает форму и положение свободной поверхности. Таким образом, для потенциала имеем следующую краевую задачу:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta \right|_{S_0} = 0; \quad \nabla^2 \Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial \Phi}{\partial z^2} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\sigma} = 0.$$

Здесь \mathbf{n} – внешняя единичная нормаль к рассматриваемой поверхности.

Для выполнения условий разрешимости краевой задачи необходимо также удовлетворить условию Неймана:

$$\int_{S_0} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} dS = 0.$$

Таким образом, сформулирована смешанная краевая задача для уравнения Лапласа.

Изложения основного материала исследования

1. Метод заданных форм и система граничных интегральных уравнений:

Рассмотрим потенциал Φ в виде следующего ряда:

$$\Phi = \sum_{k=1}^M \dot{d}_k(t) \varphi_k.$$

Чтобы определить функции φ_k , используем метод граничных элементов в прямой формулировке. Опуская индекс k , запишем основное интегральное соотношение в форме [6]:

$$2\pi\varphi(P_0) = \iint_S q \frac{1}{|P - P_0|} dS - \iint_S \varphi \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|P - P_0|} dS,$$

где $S = S_1 \cup S_0$; точки P и P_0 принадлежат поверхности S . Через $|P - P_0|$ обозначим декартово расстояние между точками P и P_0 . Функция φ , определенная на поверхности S_1 , представляет собой давление на смоченной поверхности, а функция q , определенная на S_0 , – это поток. С использованием граничных условий приходим к системе сингулярных интегральных уравнений в форме, представленной в [3]:

$$\begin{cases} 2\pi\varphi_1 + \iint_{S_1} \varphi_1 \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \left(\frac{1}{r} \right) dS_1 - \frac{\chi_k^2}{g} \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{1}{r} dS_0 + \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) dS_0 = 0, \\ - \iint_{S_1} \varphi_1 \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \left(\frac{1}{r} \right) dS_1 - 2\pi\varphi_0 + \frac{\chi_k^2}{g} \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{1}{r} dS_0 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь φ_0 – значения потенциала на поверхности S_0 .

Численное решение полученной системы сингулярных интегральных уравнений осуществлено методом граничных элементов. В [3] показано, что ядра интегральных уравнений содержат полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода. Так как эллиптический интеграл 2-го рода представляет собой регулярную функцию, то для его вычисления используется стандартная квадратурная формула Гаусса. Для эллиптического интеграла 1-го рода применяется подход, основанный на следующем характеристическом свойстве среднего арифметического-геометрического значения $AGM(a, b)$ (см. [7]).

Для определения этого значения существует простой алгоритм Гаусса, описанный ниже.

Таким образом, имеются эффективные численные процедуры для вычисления внутренних интегралов (2), однако внешние интегралы имеют логарифмическую особенность. Для их вычисления применены специальные квадратурные формулы Гаусса

[6], а также подход, описанный в [8]. Разработанный метод был применен далее для анализа свободных колебаний оболочечных конструкций.

2. Численный анализ и обсуждение результатов.

Рассмотрены цилиндрическо-конические оболочки (рис. 1.) Здесь R_1 и R_2 – меньший и больший радиусы конической части, R_2 это также радиус цилиндра, $\theta=90^\circ-\alpha$ – половина угла при вершине конуса, H – высота составной оболочки, H_1 и H_2 – высоты конической и цилиндрической частей, $H=H_1+H_2$. Обе оболочки отнесены к цилиндрической системе координат (ρ, φ, z) . Для всех дальнейших вычислений $\alpha=60^\circ$, $H_1/R_2=1.0$, $R_1=0.5$ м и $H_1=1$ м. Для H_2 мы рассматриваем следующие значения $H_2=1, 0.5, 0.25$, и 0.1 м.

На первом этапе определено необходимое число граничных элементов для нахождения собственных частот с заданной точностью. Точность $\varepsilon=10^{-3}$ достигается, когда число граничных элементов вдоль стенки оболочки равно 100, вдоль днища 120, и вдоль радиуса свободной поверхности также 120. В табл. 1 показано сравнение частот осесимметричных колебаний жидкости в цилиндрической оболочке с $H_1=1$ м, $R_1=1$ м, полученных с использованием разработанного здесь метода и аналитической формулы, приведенной в [2].

Таблица 1

Частоты осесимметричных колебаний жидкости в цилиндрической оболочке, Hz

Метод	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
МГЭ	3.815	7.019	10.180	13.333	16.480
Аналитический метод	3.815	7.016	10.173	13.324	16.470

В табл. 2 приведены значения первых семи частот колебаний составных оболочек при разных длинах цилиндрической части H_2 . На рис.1 показаны первая и вторая неосесимметричные формы колебаний свободной поверхности.

Таблица 2

Частоты неосесимметричных колебаний жидкости, Hz

H_2	n						
	1	2	3	4	5	6	7
1.0	4.247	7.2352	9.1573	10.726	12.089	13.312	14.433
0.5	4.145	7.2305	9.1531	10.721	12.083	13.306	14.425
0.25	4.000	7.2146	9.1491	10.718	12.081	13.303	14.423
0.1	3.831	7.1538	9.1203	10.704	12.073	13.299	14.420

Таблица 3

Частоты при различных значениях параметра перегрузки, Hz

a/n	1	2	3	4	5	6	7
1	6.13	8.37	9.45	10.24	10.88	11.42	11.89
2	8.67	11.84	13.37	14.48	15.38	16.14	16.81
3	10.61	14.50	16.37	17.74	18.84	19.77	20.59
7	16.21	22.15	25.01	27.10	28.78	30.20	31.45

В табл. 3 дан анализ изменения частот при различных значениях параметра перегрузки при $H = 0.1$.

Результаты вычислений, приведенные в этой таблице, показывают, что при увеличении перегрузок происходит рост частот свободных колебаний жидкости.

Выводы

Разработан метод определения частот и форм колебаний составных оболочек вращения. Задача сведена к решению системы сингулярных интегральных уравнений. Подход основан на применении метода граничных элементов. Отметим, что для данной задачи неизвестны аналитические решения. Исследованы свободные колебания жидкости в составных оболочках вращения, состоящих из цилиндрической и конической частей. Дан анализ влияния перегрузок на частоты колебания составных оболочек. В дальнейшем предполагается учесть эффект упругости стенок.

Список использованной литературы

1. Ibrahim R.A. Recent Advances In Liquid Sloshing Dynamics / R.A. Ibrahim, V.N. Pilipchuck, T. Ikeda // Applied Mechanics Reviews. – 2001. – Vol. 54. – № 2. – P. 133-199.
2. Ibrahim R.A. Liquid Sloshing Dynamics / R.A. Ibrahim. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 970 p.
3. Degtyarev K. Reduced Boundary Element Method for Liquid Sloshing Analysis of Cylindrical and Conical Tanks with Baffles / K. Degtyarev, V. Gnitko, V. Naumenko, E. Strelnikova // Int. Journal of Electronic Engineering and Computer Sciences. – 2016. – Vol. 1. – № 1. – P. 14-27.
4. Ravnik, J. BEM and FEM analysis of fluid-structure interaction in a double tank / J. Ravnik, E. Strelnikova, V. Gnitko, K. Degtyarev, U. Ogorodnyk // Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2016. – Vol. 67. – P. 13-25.
5. Gnitko V. Coupled BEM and FEM Analysis of fluid-structure interaction in dual compartment tanks / V. Gnitko, K. Degtyarev, V. Naumenko, E. Strelnikova // Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements. – 2018. – Vol. 6(6). – P. 976-988.
6. Brebbia, C.A. Boundary element techniques: theory and applications in engineering / C.A. Brebbia, J.C.F. Telles, L.C. Wrobel. – Berlin and New York: Springer-Verlag, 1984. – 464 p.
7. David A. Cox. The Arithmetic-Geometric Mean of Gauss / David A. Cox // L'Enseignement Mathématique. 1984. – T. 30. – P. 275 -330.

8. Naumenko V.V. Singular integral accuracy of calculations in two-dimensional problems using boundary element methods / V.V. Naumenko, H.A. Strelnikova // Engineering analysis with boundary elements. – 2002. – № 26. – P. 95-98. – DOI: 10.1016/S0955-7997(01)00041-8.

References

1. Ibrahim, R. A., Pilipchuck, V. N., Ikeda, T. Recent Advances In Liquid Sloshing Dynamics. Applied Mechanics Reviews. **54**, 2, 133-199. (2001)
2. Ibrahim, R. A. Liquid Sloshing Dynamics. Cambridge University Press. Cambridge. (2005)
3. Degtyarev, K., Gnitko, V., Naumenko, V., Strelnikova, E. Reduced Boundary Element Method for Liquid Sloshing Analysis of Cylindrical and Conical Tanks with Baffles. Int. Journal of Electronic Engineering and Computer Sciences. **1**, 1, 14-27. (2016)
4. Ravnik, J., Strelnikova, E., Gnitko, V., Degtyarev, K., Ogorodnyk, U. BEM and FEM analysis of fluid-structure interaction in a double tank. Engineering Analysis with Boundary Elements. **67**, 13-25. (2016)
5. Gnitko, V., Degtyarev, K., Naumenko, V., Strelnikova, E. Coupled BEM and FEM Analysis of fluid-structure interaction in dual compartment tanks. Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements. **6**(6), 976-988. (2018)
6. Brebbia, C. A., Telles, J. C. F., Wrobel, L. C. Boundary element techniques: theory and applications in engineering. Springer-Verlag. Berlin and New York. (1984)
7. David A. Cox. The Arithmetic-Geometric Mean of Gauss. L'Enseignement Mathématique. **30**, 275 -330. (1984)
8. Naumenko, V. V., Strelnikova, H. A. Singular integral accuracy of calculations in two-dimensional problems using boundary element methods. Engineering analysis with boundary elements. **26**, 95-98. (2002). DOI: 10.1016/S0955-7997(01)00041-8.

УДК 519.3

А.Н. ХОМЧЕНКО

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

О.І. ЛИТВИНЕНКО, І.О. АСТИОНЕНКО

Херсонський національний технічний університет

П.И. ГУЧЕК

Інститут біокібернетики і біомедичної інженерії ім. М. Налеча Польської академії наук, Польща

КВАЗИМЕТОД МОНТЕ-КАРЛО І КУБАТУРИ ДЛЯ СЕРЕНДИПОВИХ ПОЛІНОМІВ

У роботі розглядаються серендипові поліноми (стандартні та альтернативні) другого і третього порядків. Квазіметод Монте-Карло побудовано на базі квадратного обчислювального шаблону і стратифікованої вибірки із дев'яти аплікат. Наведено три способи конструювання кубатури за версією Ньютона-Котеса. Проведено аналіз результатів тестування кубатури з урахуванням специфічних властивостей і характеру поведінки серендипових поверхонь на границі і всередині носія. Знайдено просту залежність між середньою аплікатою поверхні і барицентричною аплікатою (у центрі квадрата). Кількість необхідних вузлів інтегрування зведено до одного. В цьому випадку кубатура Ньютона-Котеса виявляється більш ефективною, ніж кубатура Гаусса-Лежандра.

Ключові слова: квазіметод Монте-Карло; серендипові елементи другого і третього порядків; обчислювальний шаблон; кубатура Ньютона-Котеса; центрований елемент; стратифікована вибірка аплікат.

А.Н. ХОМЧЕНКО

Черноморский национальный университет имени Петра Могилы

Е.И. ЛИТВИНЕНКО, И.А. АСТИОНЕНКО

Херсонский национальный технический университет

П.И. ГУЧЕК

Институт биокрибернетики и биомедицинской инженерии им. М. Налеча Польской академии наук, Польша

КВАЗИМЕТОД МОНТЕ-КАРЛО И КУБАТУРЫ ДЛЯ СЕРЕНДИПОВЫХ ПОЛИНОМОВ

В работе рассматриваются серендиповы полиномы (стандартные и альтернативные) второго и третьего порядков. Квазиметод Монте-Карло построен на базе квадратного вычислительного шаблона и стратифицированной выборки из девяти аппликат. Приведены три способа конструирования кубатуры по версии Ньютона-Котеса. Проведен анализ результатов тестирования кубатуры с учетом специфических свойств и характера поведения серендиповых поверхностей на границе и в середине носителя. Обнаружена простая зависимость между средней аппликацией поверхности и барицентрической аппликацией (в центре квадрата). Количество необходимых узлов интегрирования сведено к одному. В этом случае кубатура Ньютона-Котеса является более эффективной, чем кубатура Гаусса-Лежандра.

Ключевые слова: квазиметод Монте-Карло; серендиповы элементы второго и третьего порядков; вычислительный шаблон; кубатура Ньютона-Котеса; центрованный элемент; стратифицированная выборка аппликат.

A.N. KHOMCHENKO

Petro Mohyla Black Sea National University

O.I. LITVINENKO, I.O. ASTIONENKO

Kherson National Technical University

P.I. GUCHEK

Institute of Biocybernetics and Biomedical Engineering of the Polish Academy of Sciences, Poland

MONTE-CARLO QUASI-METHOD AND CUBATURES FOR SERENDIPIC POLINOMIALS

The overwhelming majority of calculations by Monte-Carlo method is done with the use of pseudo-random numbers (quasi-random points). Practice has shown that in some cases it is better to refuse from modelling real random process and to use artificial model instead. Computational templates and cubatures with quasi-random nodes of integration are considered in the paper. With concrete examples of biquadratic and bicubic polynomials it is shown that sequence of quasi-random points gives better results. It is a known fact and the essence of Monte-Carlo quasi-method. The Monte Carlo quasi-method is based on a square computational template and a stratified sample of 9 applications. There are 3 ways to design the cubature according to the Newton-Cotes version (the Newton-Cotes procedure, the hierarchic procedure on the basis of nodal proportionality, quick algorithm for centered templates). The analysis of the results of cubature testing is carried out taking into account the specific properties and behavior of the serendipic surfaces at the border and in the middle of the carrier. A simple relationship was found between the mean surface application and the barycentric application (in the center of the square). The number of necessary integration nodes is reduced to one. In this case, the cubature of Newton-Cotes is more effective than the cubature of Gauss-Legendre.

The algorithm of The Monte Carlo quasi-method for quick determination of per-node distribution of even volume force of serendipic elements of biquadratic and bicubic interpolations is built. There is reason to believe that Zienkiewicz was wrong as to the role of out-of-node parameters. It turned out that barycentric application determines “upon the average” the character of nonstandard serendipic surface.

Keywords: Monte Carlo quasi-method; serendipic elements of the 2nd and 3rd orders; computational template; cubature of Newton-Cotes; centered element; stratified sample.

Постановка проблеми

Переважна більшість розрахунків за методом Монте-Карло здійснюється з використанням псевдовипадкових чисел (квазівипадкових точок). Практика свідчить, що в деяких випадках краще відмовитись від моделювання реального випадкового процесу і замість цього скористатися штучною моделлю. В роботі розглядаються обчислювальні шаблони і кубатури із квазівипадковими вузлами інтегрування. На конкретних прикладах біквадратичних і бікубічних серендипових поліномів показано, що послідовність квазівипадкових точок дає кращі результати. Це відомий факт і саме в цьому суть квазіметоду Монте-Карло. На квадратному шаблоні ($|x| \leq 1$, $|y| \leq 1$) сформульовано правило дев'яти аплікати для поліномів другого і третього порядків. Специфіка поведінки серендипової поверхні на границі і всередині носія дозволяє знайти просту залежність інтегральної характеристики лише від однієї аплікати в центрі носія. Це рідкісний випадок, коли кубатура Ньютона-Котеса ефективніша за кубатуру Гаусса-Лежандра.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій

Корисну інформацію про квазіметод Монте-Карло (термін Г. Секея) можна знайти в [1–3]. Серендипові елементи в методі скінченних елементів (МСЕ) відомі з 1968 р. [4].

Спочатку це були лише стандартні моделі. У 1982 р. [5, 6] вдалося сконструювати перші альтернативні моделі. Зараз альтернативних моделей – безліч, хоча мало хто знає про них. Нових цікавих задач також безліч. Одна з них – це задача про інтегральні характеристики серендипових поліномів. Правило дев'яти аплікат [7] модифіковано таким чином, щоб забезпечити швидкість і точність подвійного інтегрування серендипових поліномів другого і третього порядків.

Мета дослідження

Сконструювати придатні для квазіметоду Монте-Карло обчислювальний шаблон і кубатуру Ньютона-Котеса, які спростовують категоричну думку про переваги версії Гаусса-Лежандра. Результати стосуються як стандартних, так і альтернативних серендипових поліномів другого і третього порядків.

Викладення основного матеріалу дослідження

В математиці відомі послідовності [2, 3] двовимірних невинуваткових точок Q_1, Q_2, \dots, Q_n , для яких має місце рівність:

$$\frac{1}{mesD} \iint_D f(x, y) dx dy = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(Q_i). \quad (1)$$

Таку послідовність називають рівномірно розподіленою в області D . Бажано, щоб рівномірність розташування точок Q_1, Q_2, \dots, Q_n в D мала місце не тільки при $n \rightarrow \infty$, а починаючи з невеликого n , і щоб точки Q_i достатньо просто обчислювались. Вибіркове арифметичне середнє апроксимує математичне сподівання функції випадкового вектора не тільки тоді, коли послідовність Q_1, Q_2, \dots, Q_n випадкова і рівномірно розподілена в D . Достатньо забезпечити лише рівномірний розподіл цієї послідовності. В конкретних задачах послідовність квазівипадкових точок часто дає кращі результати [1, 2]. Наша задача полягає у побудові кубатури для оцінки інтеграла:

$$I = \frac{1}{S} \iint_D N_i(x, y) dS, \quad (2)$$

де S – площа квадрата D ($|x| \leq 1, |y| \leq 1$); $N_i(x, y)$ – базисна функція серендипової інтерполяції, що асоціюється з вузлом i .

Ми розглянемо конкретні поліноми $N_i(x, y)$ для біквадратичної інтерполяції (8 вузлів) та бікубічної інтерполяції (12 вузлів). Фактично відбувається заміна інтеграла інтегральною сумою. Цей прийом добре відомий з часів Кеплера. Точність такої заміни залежить від вагових коефіцієнтів і кількості доданків. Добре, коли замість арифметичного усереднення (проста вибірка) використовують зважене усереднення (стратифікована вибірка). Кубатури можуть суттєво залежати від властивостей поліномів $N_i(x, y)$. Нагадаємо про властивості:

$$N_i(x_k, y_k) = \delta_{ik}, \quad \sum_{i=1}^m N_i(x, y) = 1, \quad (3)$$

де m – кількість базисних функцій; δ_{ik} – символ Кронекера; i – номер функції, k – номер вузла інтерполяції.

До цього треба додати властивість міжелементної неперервності. Саме ця властивість "приховує" просту залежність між інтегральним середнім полінома $N_i(x, y)$ і барицентричною аплікатою $N_i(0;0)$ поверхні.

Перейдемо до конструювання кубатурної формули (правило дев'яти аплікат). Функцію, що інтегрується, позначимо через $f(x, y) = N_i(x, y)$. Щоб отримати повний спектр інтегральних характеристик, достатньо проінтегрувати лише "кутові" поліноми ($i = 1, 2, 3, 4$). В якості обчислювального шаблону візьмемо елемент лагранжевої біквадратичної інтерполяції (рис. 1, а).

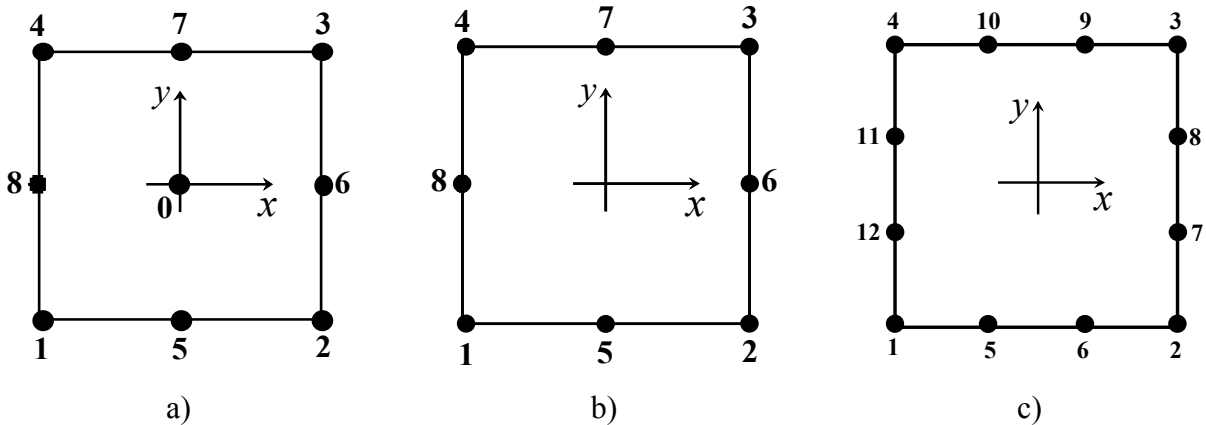


Рис. 1. а) обчислювальний шаблон; б) серендипів елемент другого порядку; в) серендипів елемент третього порядку.

Звертаємо увагу на рівномірний розподіл вузлів інтегрування на обчислювальному шаблоні (рис. 1, а). Ми покажемо три способи побудови кубатури.

1. Процедура Ньютона-Котеса

Щоб отримати вагові коефіцієнти стратифікованої вибірки достатньо мати три функції Лагранжа (рис. 1, а):

$$N_1(x, y) = \frac{1}{4}(1-x)(1-y) \cdot xy;$$

$$N_5(x, y) = \frac{1}{2}(1-x^2)(1-y) \cdot y;$$

$$N_0(x, y) = (1-x^2)(1-y^2).$$

Інтегральне усереднення дає: $\gamma_i = \frac{1}{36}, i = 1, 2, 3, 4;$ $\gamma_i = \frac{1}{9}, i = 5, 6, 7, 8;$ $\gamma_0 = \frac{4}{9}.$

Таким чином, кубатура має вигляд:

$$\bar{f} = \frac{4}{9} \cdot f_0 + \frac{1}{36} \cdot \sum_{i=1}^4 f_i + \frac{1}{9} \cdot \sum_{i=5}^8 f_i, \tag{4}$$

де \bar{f} – середня апліката поверхні $N_i(x, y)$ серендипової інтерполяції (біквдратичної або бікубічної).

2. Ієрархічна процедура на основі повузлової пропорційності

На рис. 2 показана ієрархія обчислювальних шаблонів

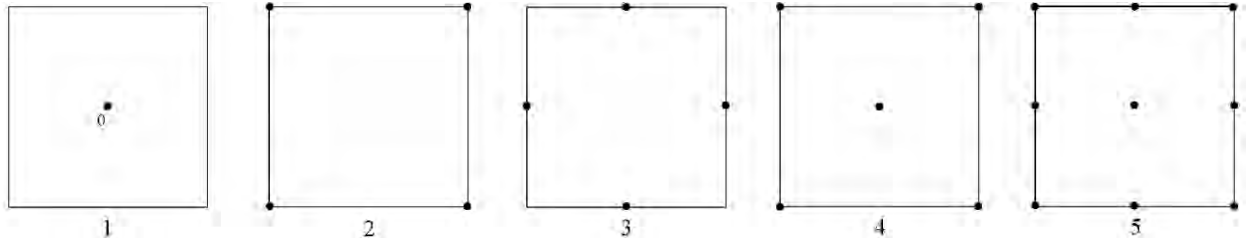


Рис. 2. Ієрархія обчислювальних шаблонів.

Коментар: модель 4 – це зважене усереднення моделей 1 і 2 з коефіцієнтами відповідно $\frac{4}{5}$ і $\frac{1}{5}$; модель 5 – це зважене усереднення моделей 3 і 4 з коефіцієнтами відповідно $\frac{4}{9}$ і $\frac{5}{9}$. В результаті отримуємо кубатуру (4).

3. Швидкий алгоритм для центрованих шаблонів

Позначимо через x вагу кутового вузла та запишемо рівняння вагового балансу для моделі 5 (рис. 2):

$$4x + 16x + 16x = 1, \quad x = \frac{1}{36}.$$

Як бачимо, (4) – це двовимірний аналог відомого правила параболічних трапецій (Сімпсона). З точки зору математичної статистики (4) – це вибіркове середнє із дев'яти аплікат правильно стратифікованої вибірки. Слово "правильно" означає підтвердження гіпотези дифузійної "плями" у схемах випадкових блукань з поглинаючими вузлами. Це має пряме відношення до методу Монте-Карло. Для перевірки формули (4) розглянемо два стандартних серендипових полінома [4]. Кутовий поліном біквдратичної інтерполяції має вигляд:

$$N_1(x, y) = \frac{1}{4}(1-x)(1-y)(-1-x-y).$$

Формула (4) дає $\bar{f} = \frac{4}{9} \cdot \left(-\frac{1}{4}\right) + \frac{1}{36} \cdot 1 + \frac{1}{9} \cdot 0 = -\frac{1}{12}$, що співпадає з математичним сподіванням (кутовим "навантаженням") [4]. Зрозуміло, що вузлове "навантаження" на проміжний вузол дорівнює $\frac{1}{3}$.

Кутовий поліном бікубічної інтерполяції має вигляд:

$$N_1(x, y) = \frac{1}{32}(1-x)(1-y)(9(x^2 + y^2) - 10).$$

Формула (4) дає $\bar{f} = \frac{4}{9} \cdot \left(-\frac{5}{16}\right) + \frac{1}{36} \cdot 1 + \frac{1}{9} \cdot \left(-\frac{1}{8}\right) = -\frac{1}{8}$, що співпадає з

математичним сподіванням [4]. Приклади з альтернативними базисами серендипових моделей підтверджують абсолютну точність кубатури (4). Для альтернативних моделей з різноманітним рельєфом поверхонь важливо знайти просту залежність середньої аплікати \bar{f} від барицентричної аплікати f_0 . Ця залежність має вигляд:

для елемента Q8: $\bar{f} = \frac{4}{9} \cdot f_0 + \frac{1}{36}$; для елемента Q12: $\bar{f} = \frac{4}{9} \cdot f_0 + \frac{1}{72}$.

Висновки

Побудовано алгоритм квазіметода Монте-Карло для швидкого визначення спектру вузлових "навантажень" серендипових елементів Q8 і Q12. Є підстави вважати, що О. Зенкевич [4] помилявся щодо ролі невузлових параметрів. Виявляється, що f_0 визначає "в середньому" характер нестандартної серендипової поверхні.

Список використаної літератури

1. Секей Г. Парадоксы в теории вероятностей и математической статистике / Г. Секей. — М.: Мир, 1990. — 240 с.
2. Соболев И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев. — М.: Наука, 1985. — 80 с.
3. Соболев И. М. Точки, равномерно заполняющие многомерный куб / И. М. Соболев. — М.: Знание, 1985. — 32 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
5. Хомченко А. Н. Некоторые вероятностные аспекты МКЭ / А. Н. Хомченко. — Ивано-Франковский институт нефти и газа. — Ивано-Франковск, 1982. — 9 с. — Депонировано в ВИНТИ. 18.03.82, № 1213.
6. Хомченко А. Н. Метод конечных элементов: стохастический подход / А. Н. Хомченко. — Ивано-Франковский институт нефти и газа. — Ивано-Франковск, 1982. — 7 с. — Депонировано в ВИНТИ. 15.10.82, № 5167.
7. Хомченко А. Н. Правило параболических трапеций и кубатурные формулы / А. Н. Хомченко, Н. В. Коваль // Геометричне моделювання та інформаційні технології. Науковий журнал. — № 1(3). — Миколаїв: МНУ ім. В.О. Сухомлинського, 2017. — С. 145–148.

References

1. Sekey, G. Paradoxsy v teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistike. Mir. Moscow. (1990)
2. Sobol, I. M. Metod Monte-Karlo. Nauka. Moscow. (1985)
3. Sobol, I. M. Tochki. ravnomerno zapolnyayushchiye mnogomernyy kub. Znaniye. Moscow. (1985)
4. Zenkevich, O. Metod konechnykh elementov v tekhnike. Mir. Moscow. (1975)
5. Homchenko, A. N. Nekotorye veroyatnostnye aspekty MKE. Ivano-Frankovskiy institut nefiti i gaza. Ivano-Frankovsk. Deponirovano v VINITI. 18.03.82, № 1213. (1982)
6. Homchenko, A. N. Metod konechnykh elementov: stohasticheskiy podhod. Ivano-Frankovskiy institut nefiti i gaza. Ivano-Frankovsk. Deponirovano v VINITI. 15.10.82, № 5167. (1982)
7. Homchenko, A. N., Koval, N. V. Pravilo parabolicheskikh trapeciy i kubaturnye formuly. Neometrychne modeliuвання ta informatsiini tekhnolohii. 1(3), 145-148. (2017)

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 519.713:681.52

М.Б. ЄДИНОВИЧ, І.В. БАЙРАК, С.Л. КАРПЕНКО
Херсонський національний технічний університет

**ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ДИСКРЕТНИХ АВТОМАТІВ ПРИ
ПРОГРАМУВАННІ ПРОГРАМОВАНИХ ЛОГІЧНИХ КОНТРОЛЕРІВ**

У статті досліджуються перспективні моделі дискретних автоматів, сумісні з мовами програмування програмованих логічних контролерів (ПЛК). Розглянуто методи і засоби проектування й реалізації систем управління дискретними подійними системами на основі ПЛК з використанням ієрархічних модульних недетермінованих автоматів (ІМНДА). Розглянуті у статті підходи дозволяють спеціалістам-технологам з базовими навичками програмування розробляти програми для ПЛК для реалізації складних алгоритмів управління технологічними процесами.

Для навчання студентів кафедри технічної кібернетики ХНТУ та дослідження моделей дискретних автоматів було розроблено навчально-дослідницький стенд. Стенд складається з PLC OWEN63, а також ПК та моделі об'єкта управління. Програмування контролера PLC63 виконується в середовищі CODESYS за допомогою мов IEC 61131-3.

Ключові слова: програмований логічний контролер, дискретний автомат, структурований текст, релейна діаграма, діаграма функціональних блоків, дискретні подійні системи.

М.Б. ЕДИНОВИЧ, И.В. БАЙРАК, С.Л. КАРПЕНКО
Херсонский национальный технический университет

**ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДИСКРЕТНЫХ АВТОМАТОВ ПРИ
ПРОГРАММИРОВАНИИ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ
КОНТРОЛЛЕРОВ**

В статье исследуются перспективные модели дискретных автоматов, совместимые с языками программирования программируемых логических контроллеров (ПЛК). Рассмотрены методы и средства проектирования и реализации систем управления дискретными событийными системами на основе ПЛК с использованием иерархических модульных недетерминированных автоматов (ИМНДА). Рассмотренные в статье подходы позволяют специалистам-технологам с базовыми навыками программирования разрабатывать программы для ПЛК для реализации сложных алгоритмов управления технологическими процессами.

Для обучения студентов кафедры технической кибернетики ХНТУ и исследования моделей и дискретных автоматов был разработан учебно-исследовательский стенд. Стенд состоит из PLC OWEN63, а также ПК и модели объекта управления. Программирование контроллера PLC63 выполняется в среде CODESYS с помощью языков IEC 61131-3.

Ключевые слова: программируемый логический контроллер, дискретные автоматы, структурированный текст, релейная диаграмма, диаграммы функциональных блоков, дискретные событийные системы.

M.B. YEDYNOVYCH, I.V. BAIRAK, S.L. KARPENKO
Kherson National Technical University

APPLICATION OF DISCRETE AUTOMATA MODELS AT PROGRAMMING OF PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS

The application of digital technologies in the modern industry is due to the introduction of programmable logic controllers, personal and industrial computers at all levels of automated control systems. A significant number of management tasks in these systems are described by models of discrete automata, on the basis of which algorithms and programs for digital control are developed.

The article deals with the procedure of developing programs for programmable logic controllers on the basis of models belonging to the class of discrete event dynamic systems (DEDS). These systems are characterized by the discreteness of the space of states. Typically, Petri Networks and their extensions are used to design systems using the DEDS model. Despite its versatility of the model, created on the basis of this methodology in the study of parallel processes have a complex implementation. Instead, the use of nondeterministic automata (NA) makes it possible to investigate the location of an automaton in several local states when activating multiple transitions. An improved structure of non-deterministic automata in the form of a hierarchical model with a modular structure makes it quite easy to create programs for programmable logic controllers using the IEC 61131-3. The base module of HMNA is implemented on the basis of LD and FBD. It should be noted that in the case of modeling a discrete machine using graphs or Petri Networks, the direct use of IEC 61131-3 languages is rather problematic, so the structure of the DEDS design tool system based on the HMNA is proposed. This approach can be considered promising as it allows specialists with basic programming skills to develop digital control software for implementing complex algorithms.

A training and research stand was created for students of the Department of Technical Cybernetics of KNTU and conducting research in the field of discrete automata. The stand consists of a PLC OWEN63, a PC and a control object model. PLC63 controller programming is carried out in the CODESYS environment using languages IEC 61131-3.

Keywords: programmable logic controller, discrete automata, structured text, ladder diagram, function block diagrams, discrete event systems.

Постановка проблеми

Програмовані логічні контролери ПЛК (PLC) ведуть свій родовід від Modular Digital Controller -Modicon, який по суті був програмованим аналогом релейно-контактних схем управління. Модель Modicon 084 мала обсяг пам'яті 4 кБ і випускалася протягом десяти років. Сучасні ПЛК, окрім функцій дискретного управління, підтримують аналогові закони управління та мають розвинену систему входів/виходів з підтримкою обміну по цифровій мережі.

Як відомо [1], теорія цифрових автоматів розвивалася паралельно із розвитком ЕОМ. Історично спочатку почала розбудовуватися та частина теорії синтезу автоматів, яка має справу з етапом комбінаційного синтезу. У роботах В.І. Шестакова й К. Шеннона була вперше продемонстрована плідність ідеї застосування розвинуеного раніше в рамках математичної логіки апарата так званої булевої алгебри до проблем комбінаційного синтезу релейно-контактних схем.

Розвиваючись у рамках логіко-математичної теорії релейно-контактних схем, теорія комбінаційного синтезу досягла значних успіхів і після появи електронних цифрових машин стала успішно пристосовуватися до проблем синтезу схем з електронних логічних елементів.

На нижніх рівнях ієрархії АСУТП ПЛК займають домінуючі позиції і практично витіснили ПК і однокристальні мікроконтролери завдяки спеціалізованій конструкції і розвиненому інтерфейсу. Для спрощення програмування ПЛК було розроблено стандарт ІЕС 61131-3, який описує мови програмування для програмованих логічних контролерів. Стандарт включає текстові мови: ST (структурований текст), IL (мова інструкцій) та графічні мови SFC (послідовні функціональні блоку), FBD, (діаграми функціональних блоків) LD (релейні діаграми). Наявність мов стандарту ІЕС 61131-3 дозволяє спеціалістам з базовими навичками програмування розробляти програмне забезпечення ПЛК. Але простота програмування може зіграти злий жарт із розробниками, оскільки проєктанти здебільшого послуговуються інтуїцією і власним досвідом, уникаючи системного підходу в розробці дискретного пристрою управління. У підсумку такий підхід призводить до появи помилок та затягування строків розробки проєкту. Тому очевидно, що застосування теорії дискретних автоматів дозволить врахувати усі можливі комбінації в роботі пристрою, забезпечить систему від зациклювань та аварійних ситуацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Задачі дискретного управління поділяються на дві основні групи – комбінаційні автомати та автомати з пам'яттю або послідовнісні [2]. Автомати першої групи формують вихідні сигнали, що не залежать від попереднього стану пристрою і визначаються лишень комбінацією сигналів на вході пристрою. Програмування ПЛК у цьому випадку зводиться до визначення логічної функції і не становить особливої проблеми.

А Автомати другого типу описуються відомими моделями Мура і Мілі. На відміну від автомата Мура, автомат Мілі відображає стан входу X управляючого автомата на його вихід Y без затримки, що підвищує швидкодію системи в цілому. Водночас відсутність затримки з боку операційного автомата може призвести до помилки в управляючому автоматі. У такому випадку доцільно використовувати автомат Мура. Для усунення подібних протиріч застосовують моделі, що об'єднують властивості обох автоматів, наприклад, в роботі [3] була запропонована композиційна модель СТ (рис. 1) та її модифікація CTS.

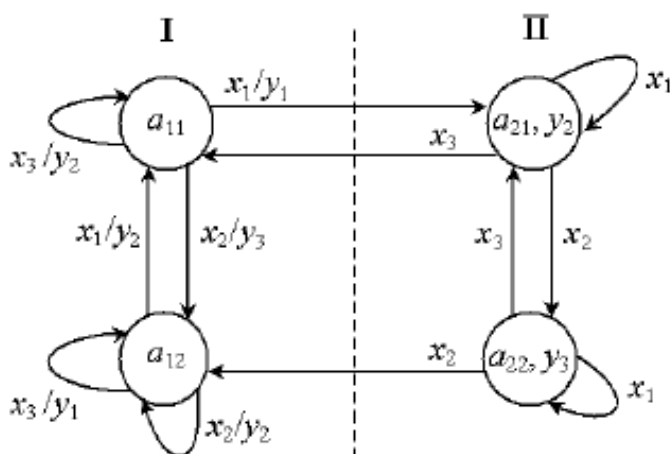


Рис. 1. Приклад графа СТ-автомата, I – підграф автомата Мілі, II – підграф автомата Мура

СТ-автомат об'єднує властивості автоматів Мілі і Мура і проявляє ті, чи інші властивості цих автоматів на одному абстрактному виході. Модель CTS подібна до СТ, але реалізує властивості автоматів Мура і Мілі незалежно у просторі координат

векторного виходу автомата та у часі. СТС модель узагальнює властивості автоматів Мура, Мілі С, СТ і може вироджуватися у будь-який з них.

Як видно з розглянутого прикладу класичні моделі Мура і Мілі не відповідають у повній мірі сучасним вимогам (надійності, швидкодії), тому ведеться розробка сучасної концепції кінцевого автомата.

Мета дослідження

У статті досліджуються перспективні моделі дискретних автоматів, сумісні з мовами програмування ПЛК.

Викладення основного матеріалу дослідження

У сучасній теорії дискретних автоматів розробляється модель нового класу, що належить до дискретних динамічних систем - дискретні подійні системи ДПС (Discrete Event Dynamic Systems – DEDES) [4]. Зазвичай для проектування систем з використанням моделі ДПС застосовуються мережі Петрі та їхні розширення. Попри свою універсальність, моделі, створені на основі зазначеної методики, при дослідженні паралельних процесів мають складну реалізацію. Натомість, застосування недетермінованих автоматів (НДА) дає можливість досліджувати знаходження автомата в кількох локальних станах при активації кількох переходів [5]. Структура відомих НДА є одномірною, що не дозволяє досліджувати складні ієрархічні системи автоматички. У роботі [6] запропонована ієрархічна модель НДА з модульною структурою - ІМНДА. Базисний модуль ІМНДА визначається наступним кортежем:

$$MB = (EI, DI, DO, S, \delta, \varphi, \gamma, g_0), \quad (1)$$

де $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ – множина локальних станів автомату, $EI = \{ei_1, ei_2, \dots, ei_n\}$ множина імпульсних входів; $DI = \{di_1, di_2, \dots, di_m\}$ – множина потенціальних сигналів управління; $EO = \{eo_1, eo_2, \dots, eo_p\}$ – множина імпульсних виходів; $DO = \{do_1, do_2, \dots, do_q\}$ – множина потенціальних сигналів управління на виході.

Ідея запропонованого метода полягає у створенні складних структур недетермінованих автоматів з базових модулів уніфікованої структури. Базовий модуль представляють у вигляді функціонального блока (рис.2).

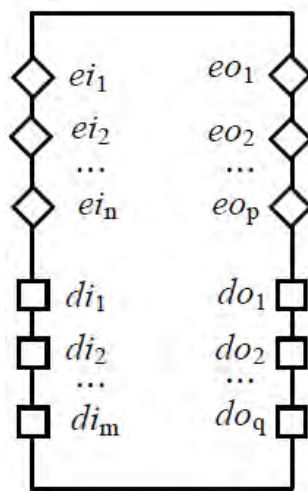


Рис. 2. Інтерфейс модуля ІМНДА

Множина Δ переходів між локальними станами автомату:

$$\Delta \subseteq S \times EI \times 2^{DI} \times 2^{DI} \times 2^S \times 2^S \times S. \quad (2)$$

Перехід з одного локального стану в інший $\delta \in \Delta$. $Pr_i(\delta)$ – i -та координата кортежу δ . Тоді $Pr_1(\delta)$ та $Pr_7(\delta)$ – вихідний та цільовий стан переходу відповідно; $Pr_2(\delta)$ – миттєвий вхідний сигнал; $Pr_3(\delta)$ та $Pr_4(\delta)$ – множини нульових та одиничних вхідних сигналів управління відповідно; $Pr_5(\delta)$ та $Pr_6(\delta)$ – множини дозвільних та заборонних станів автомату відповідно. Робота автомату обмежується наступними виразами:

$$Pr_5(\delta) \cap Pr_6(\delta) = \emptyset \text{ – стан автомату не може бути одночасно "0" та "1";}$$

$Pr_3(\delta) \cap Pr_4(\delta) = \emptyset$ – потенційний сигнал управління на вході повинен бути або одиничним, або нульовим.

Запропонований автомат, так само, як СТ-автомат, поєднує властивості як автомата Мура, так і автомата Мілі (відносно вихідних сигналів).

Структурна ієрархія модульного НДА дозволяє в один момент часу мати кілька дозволених переходів [6]. Перехід δ вважається тригерним, коли $Pr_2(\delta) = \emptyset$, або форсованим зовнішнім сигналом $Pr_2(\delta) \neq \emptyset$, тобто $Pr_2(\delta) \in EI$, натомість тригерний перехід завжди активний. Усі активні переходи в автоматах даного типу можуть виконуватися синхронно.

Базові ієрархічні модулі дозволяють створювати комбінації з кількох модулів (складені модулі), або модульні мережі. Таким чином, запропонована структура недетермінованого автомата дозволяє доволі легко розробляти програми для ПЛК на основі LD або FBD мов стандарту IEC 61311-3.

Попри те, що модель НДА дозволяє реалізацію дозволених паралельних переходів за певних умов, наприклад, при одночасному читанні і запису стану елемента S . Для усунення подібних колізій в [7] пропонується двотактна модель НДА. Змінна стану S розділяється на S' та S'' . У першому такті формується компонента S'_j у результаті переходу S''_i з i -го у j -й стан $S''_i \wedge C_{i,j}$, де $C_{i,j}$ – дозвіл цього переходу. У другому такті S'_j передається на вихід блоку:

$$S'_j = S''_j. \quad (3)$$

Для реалізації запропонованої двотактної моделі НДА мовою LD використовуються релейні структури для моделювання елементів пам'яті, що представляють стан. Відповідно до двокомпонентних побудов стану реалізаційної форми НДА виділяють реле першого ступеня для реалізації перших компонентів станів і реле другого ступеня відповідно для реалізації других компонентів. На рис. 3 приведена загальна схема реалізації базисного модуля ІМНДА на основі комбінування мов LD і FBD.

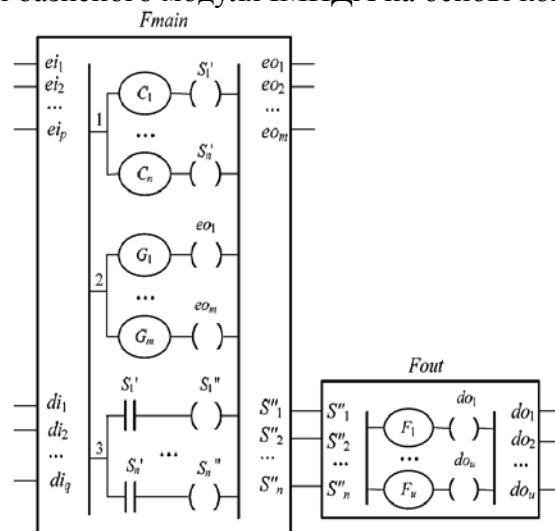


Рис. 3. Загальна схема реалізації базисного модуля ІМНДА.

Модуль складається з двох функціональних блоків F_{main} і F_{out} , кожен з яких описується за допомогою LD-діаграм. LD-діаграма, інкапсульована в ФБ F_{main} , і складається з трьох груп. Перша група формує значення S'_j першого такту НДА. Макрокола, що обчислюють умови збудження реле C_i ($i = \overline{1, n}$), позначені на рис. 3 овалами. Обчислення цих умов виконується відповідно до виразу $S''_i \wedge C_{i,j}$. Друга група обчислює вихідні значення подієвих ("імпульсних") сигналів eo_m . Умови переходів G_k ($k = \overline{1, m}$) обчислюються наступним чином:

$$G_k = \bigvee_{(S_i, S_j) \in E_k} (S_i'' \wedge C_{i,j}), \quad (4)$$

де E_k - множина переходів автомата, маркованих сигналом eo_k .

Третя група здійснює перехід $S'_j = S''_j$. Таким чином, на виході F_{main} маємо значення вихідних сигналів eo_m та сигналів стану S''_j .

LD діаграма, інкапсульована в ФБ F_{out} , обчислює значення вихідних сигналів управління do на основі компонентів станів S''_n другого такту. Використовувані макрокола F_k ($k = \overline{1, u}$) у вигляді паралельно з'єднаних контактів обчислюють функції:

$$F_k = \bigvee_{S_i \in Z_k} S_i'', \quad (5)$$

де Z_k – множина станів, при активних значеннях яких видається інформаційний сигнал do_k .

Слід зазначити, що у випадку моделювання дискретного автомата з використанням графів або мереж Петрі безпосереднє застосування мов ІЕС 61131-3 доволі проблематично, тому в роботі [7] запропонована структура інструментальної системи проектування ДПС на основі ІМНДА. Фрагмент запропонованої інструментальної системи приведено на рис. 4.

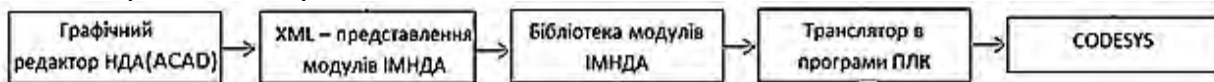


Рис. 4. Фрагмент структури системи підтримки проектування ДПС на основі ІМНДА.

Для формування базового модуля НДА застосовується графічний редактор АСАD. Транслятор XML-Описів ІМНДА в програми для ПЛК призначено для автоматичного перетворення ІМНДА в програми ПЛК, представлені у відповідності зі стандартом PCOpen XML. З метою дослідження властивостей дискретних систем управління, а також застосування їх у навчальному процесі студентів кафедри технічної кібернетики ХНТУ, було розроблено навчально-дослідницький стенд на основі контролера ОВЕН ПЛК63, рис. 5.

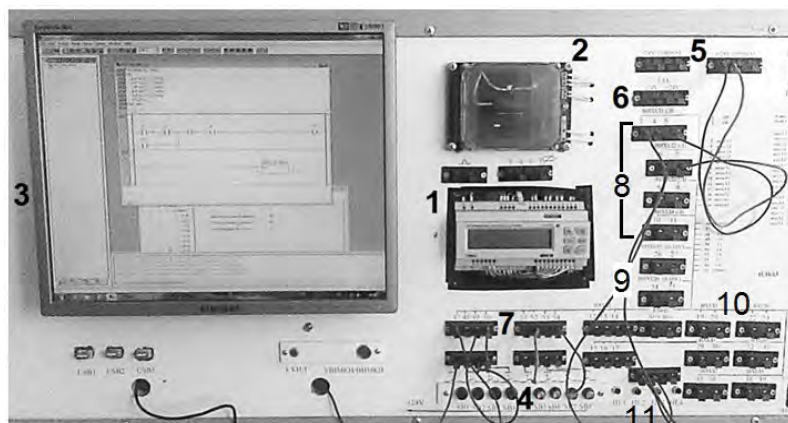


Рис. 5. Лабораторний стенд на базі ПЛК63
1 – ПЛК63; 2 – ЕП1; 3 – монітор ПК; 4-10 клеми для підключення зовнішніх пристроїв; 11 – світлодіодні індикатори.

Контролер має моноблочну конструкцію з можливістю підключення модуля розширення MP1. Має вісім дискретних і вісім універсальних аналогових входів. Тип аналогового датчика (ТП, ТО, резистивний або активний струми чи напруги) задається програмно. Також контролер має шість виходів, один з яких дискретний, решта – аналогові або дискретні. Окрім самого контролера, стенд обладнаний персональним комп'ютером з необхідним програмним забезпеченням та моделлю об'єкта управління - емулятором печі ЕП1, обладнаним датчиком температури. Характеристики контролера дозволяють використовувати його для управління різноманітними технологічними об'єктами та реалізовувати складні алгоритми програмного управління. Стенд оснащено клемми для швидкого та зручного підключення входів та виходів контролера. Дискретні входи контролера можуть бути підключені до кнопок, що емулюють дискретні сигнали або до дискретних датчиків, які можуть бути встановлені на моделях конвеєрів, підйомників, виконавчих механізмах.

Програмування контролера ПЛК63 здійснюється у середовищі CoDeSys з використанням мов IEC 61131-3:

- структурований текст (ST — Structured Text);
- послідовні функціональні схеми (SFC — Sequential Function Chart);
- діаграми функціональних блоків (FBD — Function Block Diagram);
- релейно-контактні схеми, або релейні діаграми (LD — Ladder Diagram);
- список інструкцій (IL — Instruction List).

Запропонована конфігурація стенду дозволяє виконувати наступні навчальні завдання:

- здобуття навичок програмування на мовах IEC 61131-3 у середовищі CoDeSys\$;
- проектування і дослідження дискретних автоматів;
- проектування і дослідження САР технологічних об'єктів;
- розробка простих SCADA – проектів із застосуванням ПЛК63 і моделей об'єктів, як реальних так і програмних;
- побудова простих мереж Modbus з використанням кількох контролерів і пристроїв вводу/виводу;
- проектування і дослідження релейних схем управління.

Висновки

Модульна структура ІМНДА має добру сумісність із відомими засобами програмування ПЛК. Запропонована методика дозволяє створювати набори бібліотечних блоків у середовищі розробки програм для ПЛК, наприклад, CODESYS, з подальшим використанням у прикладних програмах контролерів. Особливо просто ієрархічні модулі НДА реалізуються у вигляді функціональних блоків, опис яких можна реалізовувати на мовах LD або ST.

Створення інструментальних систем проектування цифрових автоматів дозволить суттєво підвищити ефективність проектування систем управління на основі ПЛК.

Список використаної літератури

1. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов / В.М. Глушков. — М.: Физматгиз, 1962. — 476 с.
2. Соловьев В.В. Проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем / В.В. Соловьев. — М.: Горячая линия-Телеком, 2001. — 635с.
3. Полин Е.Л. Абстрактные композиционные автоматы / Е.Л. Полин, К.В. Защелкин // Труды Одесского политехнического университета. — 2006. — Вып. 1 (25). — С. 88-94.

4. Cassandras C.G. Introduction to Discrete Event Systems / C.G. Cassandras, C.S. Lafortune. — Springer, 2008. — 772 с.
5. Вашкевич Н.П. Недетерминированные автоматы в проектировании систем параллельной обработки / Н.П. Вашкевич. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2004. — 280 с.
6. Дубинин В.Н. Проектирование и реализация систем управления дискретными событийными системами на основе иерархических модульных недетерминированных автоматов. (Ч. 1. Формальная модель) / В.Н. Дубинин, Д.Н. Дроздов, Д.В. Артамонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. — 2016. — № 1 (37). — С. 28-39.
7. Дубинин В.Н. Проектирование и реализация систем управления дискретными событийными системами на основе иерархических модульных недетерминированных автоматов. (Ч. 2. Методы и средства) / В.Н. Дубинин, Д.А. Будаговский, Д.Н. Дроздов, Д.В. Артамонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. — 2016. — № 2 (38). — С. 18-32.

References

1. Glushkov, V. M. Sintez tsifrovyykh avtomatov. Fizmatgiz. Moscow. (1962)
2. Solovev, V. V. Proektirovanie tsifrovyykh sistem na osnove programmirovemykh logicheskikh integralnykh shem. Goryachaya liniya-Telekom. Moscow. (2001)
3. Polin, E. L., Zashelkin, K. V. Abstraktnye kompozitsionnye avtomaty. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. **1** (25), 88-94. (2006)
4. Cassandras, C. G., Lafortune, C. S. Introduction to Discrete Event Systems. Springer. (2008)
5. Vashkevich, N. P. Nedeterminirovannyye avtomaty v proektirovanii sistem parallelnoy obrabotki. Izd-vo PGU. Penza. (2004)
6. Dubinin, V. N., Drozdov, D. N., Artamonov, D. V. Proektirovanie i realizatsiya sistem upravleniya diskretnymi sobytiynymi sistemami na osnove ierarhicheskikh modulnykh nedeterminirovannykh avtomatov (Ch. 1. Formalnaya model). Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tehnicheskie nauki. **1**(37), 28-39. (2016)
7. Dubinin, V. N., Budagovskiy, D. A., Drozdov, D. N., Artamonov, D. V. Proektirovanie i realizatsiya sistem upravleniya diskretnymi sobytiynymi sistemami na osnove ierarhicheskikh modulnykh nedeterminirovannykh avtomatov (Ch. 2. Metody i sredstva). Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tehnicheskie nauki. **2** (38), 18–32. (2016)

УДК 656.072

П.В. ЛУБ'ЯНИЙ, І.А. СЕЛІВЕРСТОВ, Р.В. КАЛІМБЕТ
Херсонський національний технічний університет

ОРГАНІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ МАРШРУТНОЇ СИСТЕМИ МІСТА НА ОСНОВІ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ПАСАЖИРІВ

У роботі аналізується сучасний стан організації управління роботою систем міського пасажирського транспорту з метою розробки заходів щодо підвищення рівня управління на основі можливостей нового методу оцінки якості обслуговування пасажирів. Найбільш проблемним питанням є точне моделювання поведінки пасажирів у транспортній системі. Хоча гіпотеза про ймовірнісний характер вибору пасажиром маршруту є загальноприйнятною, більшість існуючих методів зводиться до використання нормованої моделі, в якій ймовірність вибору пасажиром шляху пересування прямо пропорційна його привабливості та обернено пропорційна загальній привабливості всього набору альтернативних шляхів для пересування. Проте нормалізована модель не пояснює причин випадкового характеру процедури вибору маршруту і не відповідає на питання про кількість реальних альтернатив при реалізації потреби пасажирів в поїздках. Використання "моделі поведінкового попиту" можна вважати найбільш точним для подолання проблем калібрувальної моделі, але слід зазначити, що цей підхід запозичений з мікроекономіки товару і не цілком відповідає поведінці пасажирів в системі міського пасажирського транспорту. Крім того, використання якісних, а не кількісних показників частоти використання конкурентних маршрутів значно зменшує можливості та точність моделей.

Ключові слова: пасажир. транспорт, шлях проходження, транспортна мережа, маршрутна мережа, маршрут.

П.В. ЛУБ'ЯНИЙ, И.А. СЕЛИВЕРСТОВ, Р.В. КАЛИМБЕТ
Херсонский национальный технический университет

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ МАРШРУТНОЙ СИСТЕМЫ ГОРОДА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЕРЕВОЗОК ПАССАЖИРОВ

В работе анализируется современное состояние организации управления работой систем городского пассажирского транспорта с целью разработки мероприятий по повышению уровня управления на основе возможностей нового метода оценки качества обслуживания пассажиров. Наиболее проблемным вопросом является точное моделирование поведения пассажиров в транспортной системе. Хотя гипотеза о вероятностном характере выбора пассажира маршрута является общепринятой, большинство существующих методов сводится к использованию нормированной модели, в которой вероятность выбора пассажиром пути следования прямо пропорциональна привлекательности этого пути и обратно пропорциональна общей привлекательности всего набора альтернативных путей для передвижения. Однако нормализованная модель не объясняет причин случайного характера процедуры выбора маршрута и не отвечает на вопрос о количестве реальных альтернатив при реализации потребности пассажира в поездках. Использование "модели поведенческого спроса" можно считать наиболее точным для преодоления проблем калибровочной модели, но следует отметить, что этот подход заимствован из микроэкономики товара и не вполне соответствует поведению пассажира в системе городского пассажирского транспорта. Кроме того, использование качественных, а не количественных показателей частоты использования конкурентных маршрутов значительно уменьшает возможности и точность моделей.

Ключевые слова: пассажир. транспорт, путь следования, транспортная сеть, маршрутная сеть, маршрут.

P.V. LUBIANY, I.A. SELIVERSTOV, R.V. KALIMBET
Kherson National Technical University

ORGANIZATION OF MANAGEMENT OF THE WORK OF THE ROUTE SYSTEM OF THE CITY ON THE BASIS OF ASSESSMENT OF QUALITY OF TRANSPORT OF PASSENGERS

Efficient and reliable urban passenger transport is a major factor in socio-political and economic stability. The paper analyzes the current state of the organization of the management of the work of city passenger route systems in order to develop measures to improve the level of management based on the possibilities of a new method of assessing the quality of passenger service. The most problematic issue here is the precise modeling of passenger behavior in the transport system. Although the hypothesis about the probabilistic nature of the passenger's choice of the passageway is generally accepted, most of the existing techniques are reduced to the use of a normalized model in which the probability of a passenger's choice of path is directly proportional to his attractiveness and inversely proportional to the overall attractiveness of the entire set of alternative paths for correspondence. However, the normalized model does not explain the reasons for the random nature of the procedure for choosing a route and does not answer the question about the number of real alternatives when realizing the passenger's need for travel. The positioning of the problem in the «modelling behavioural demand» can be considered the most accurate to overcome the problems of the calibration model, but it should be noted that the approach is borrowed from the commodity microeconomics and does not entirely correspond to the behaviour of the passenger in the system of urban passenger transport. In addition, the use of qualitative, rather than quantitative meters of the frequency of the use of competitive paths significantly reduces the possibilities and accuracy of models. The article justified the amount and method of obtaining the basic characteristics of the local routing system that should form the basis of the routing database system. The essence of this method is to record the actual options for the passage of a passenger from home to work for a sufficiently long period of time. This allows you to determine the statistical probabilities of selecting a passenger of a route. These probabilities are unmatched and objective, as they represent the actual processes occurring in the transport system, and characterize the respondent's relation to the parameters of the transport process.

Keywords: passenger: transport, route of transit, transport network, route networks, route.

Постановка проблеми

Ефективна і надійна робота міського пасажирського транспорту (МПТ) є найважливішим фактором соціально-політичної та економічної стабільності. МПТ забезпечує основну частину трудових поїздок населення, безпосередньо впливаючи на ефективність функціонування системи міського господарства, підприємств, організацій, установ. Маршрутний пасажирський транспорт – один із важливих чинників забезпечення життєдіяльності, на його частку припадає понад 85-90% всіх поїздок в містах. Сформована система організації перевезень, заснована на підвищенні щільності маршрутної мережі і забезпеченні регулярності руху транспорту, не завжди задовольняє попит на транспортні послуги, особливо в "час-пік". Це зумовлює необхідність застосування нових управлінських рішень щодо організації роботи систем міських пасажирських перевезень. Разом з цим з'явилася потреба в створенні якісно нових систем,

здатних гнучко реагувати на постійно мінливі умови функціонування і вимоги споживачів. Незважаючи на зусилля органів місцевого самоврядування та транспортних підприємств по адаптації до ринкових перетворень, в останні роки в зазначеній сфері мають місце такі проблеми:

- відсутність загальноприйнятої методики оцінки результатів роботи міського маршрутного транспорту;
- відсутність об'єктивної інформації про потреби населення в пересуваннях;
- велике розмаїття можливих варіантів розвитку системи;
- велика кількість суб'єктів, що діють в конкретній економічній сфері;
- висока соціальна значимість об'єкта, яка обумовлює наявність серйозних вимог до якості управлінських рішень;
- слабкий розвиток системи моніторингу роботи транспорту і відсутність відповідної бази даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Пошуку дієвих методів планування роботи систем масового пасажирського транспорту в містах присвячено значну кількість робіт, детальний аналіз яких можна знайти в роботі [1].

Найбільш проблематичним питанням тут є точне моделювання поведінки пасажирів в транспортній системі. Хоча гіпотеза про ймовірнісний характер вибору пасажиром шляху проходження і є загальноприйнятною, більшість з існуючих методик зводяться до використання нормованої моделі, в якій ймовірність вибору пасажиром шляху проходження прямо пропорційна привабливості цього шляху і обернено пропорційна сумарній привабливості всього набору альтернативних варіантів шляху для кореспонденції. Однак нормована модель не пояснює причин випадкового характеру процедури вибору шляху і не дає відповіді на питання про кількість реальних альтернатив при реалізації потреби пасажира в пересуванні.

Постановку задачі в підході "моделювання поведінкового попиту" [2] можна вважати найбільш точною для подолання проблем калібрувальної моделі, але слід зазначити, що підхід [2] запозичений з товарної мікроекономіки і не зовсім відповідає поведінці пасажира в системі міського пасажирського транспорту. Крім того, використання якісних, а не кількісних вимірників частоти використання конкурентних варіантів шляху істотно знижує можливості і точність моделей.

Для підвищення точності моделювання в роботі [3] постулати з роботи [2] доповнені допущенням про незначну частку помилкових рішень, прийнятих пасажиром при виборі шляху проходження і обмеженнями на розгляд тільки трудових пересувань. Це дало можливість формалізувати процедуру вибору пасажиром шляху проходження і визначити ймовірність вибору шляху як ймовірність того, що параметри цього шляху опиняться для пасажира більш привабливими (ефективними), ніж параметри інших варіантів шляху.

З іншого боку, за допомогою методу обстеження переваг пасажирів – методу безпосередньої фіксації вибору, який описаний в роботі [4], існує можливість отримувати фактичні значення ймовірності вибору кожного варіанту шляху проходження, які використовує пасажир.

Мета дослідження

Метою роботи є розробка основних заходів, необхідних для організації управління роботою міської пасажирської маршрутною системою на новому рівні, з урахуванням можливостей описаного в [3], нового методу оцінки якості перевезень пасажирів у містах.

проходження і, тим самим, отримати об'єктивну оцінку їх роботи.

Для цього потрібно знайти відносне зміщення часу очікування транспортних засобів конкурентних варіантів шляху проходження, яке призводить до отримання статистичних ймовірностей і характеризує відносне зниження привабливості шляху проходження в порівнянні з кращим варіантом шляху.

Далі, за допомогою регресійного аналізу, отримані зміщення зіставляються з параметрами відповідних шляхів слідування, і формується модель, яка характеризує відношення пасажирів до параметрів шляху.

Розробка інструменту для оцінки ефективності роботи маршрутного транспорту [3] дозволяє перейти до створення інструменту прийняття ефективних рішень в сфері маршрутних перевезень пасажирів – програми розрахунку параметрів МС і окремих маршрутів. Алгоритм розв'язання задачі включає в себе наступні етапи:

1. Формування масиву вихідних даних.
 - 1.1 Моделювання транспортної мережі міста.
 - 1.2 Моделювання діючої маршрутної мережі в рамках транспортної мережі міста.
 - 1.3 Формування потенційної структури рухомого складу за видами транспорту.
 - 1.4 Моделювання функцій привабливості шляхів слідування для однорідних груп пасажирів.
 - 1.5 Моделювання потреб населення в пересуваннях для ранкового періоду "пік".
2. Перевірка адекватності отриманої моделі на діючій маршрутній мережі.
 - 2.1 Розрахунок параметрів роботи маршрутів і мережі в цілому за допомогою програмного забезпечення.
 - 2.2 Порівняння розрахункових параметрів роботи маршрутів і фактичних даних.
 - 2.3 Уточнення моделей в рамках довірчих інтервалів.
3. Формування раціональної маршрутної мережі міста.
 - 3.1 Формування сукупності альтернативних маршрутів.
 - 3.2 Інтерактивний вибір оптимального варіанта.
 - 3.2.1 Модифікація чинного варіанту маршрутної мережі за рахунок сукупності альтернативних маршрутів.
 - 3.2.2 Визначення альтернативних виконавців для частини маршрутів з урахуванням фінансових можливостей міста і перевізників.
 - 3.2.3 Оцінка варіантів використання різного рухомого складу на частини маршрутів.
 - 3.2.4 Оцінка варіантів ціни за проїзд на соціально значущих маршрутах.
 - 3.3 Розробка варіантів роботи маршрутної мережі при закритті окремих ділянок транспортної мережі.

Крім інструменту вирішення управлінських завдань, для ефективного управління системою маршрутного пасажирського транспорту в містах потрібна наявність бази даних про потреби населення і параметри роботи маршрутів. Для створення такого комплексу є всі передумови з точки зору сучасного рівня знань про об'єкт – міська маршрутна система. Проблема полягає в часі і засобах, необхідних для вирішення цього завдання.

База даних про потреби населення і параметри роботи міських маршрутів є необхідною умовою прийняття обґрунтованих рішень в сфері маршрутного пасажирського транспорту.

Крім цього вона дає можливість оцінки рівня якості обслуговування пасажирів, надійності і ефективності роботи транспорту на маршрутах, прогнозування попиту на перевезення.

Створення такої бази має бути результатом вибіркового моніторингу різних

елементів транспортного процесу, який з одного боку надає інформацію для оперативного управління процесом перевезень з боку міської влади та виконання ними контрольних функцій, з іншого – поповнює базу даних, обробка та аналіз яких дозволять підняти на новий рівень управління на поточному та перспективному рівнях. У перспективі, для зберігання і обробки бази даних необхідна розробка спеціального програмного продукту, можливо на одній з наявних платформ (наприклад, 1С).

Інструментами моніторингу повинні бути:

- обстеження різних елементів транспортного процесу за допомогою професійно підготовлених обліковців, телеапаратури та засобів автоматизованого обліку, встановлених на маршрутних транспортних засобах;
- фіксування методом моментних спостережень стану маршрутних перевезень, комунікацій різних видів транспорту і транспортної мережі за допомогою пересувних лабораторій;
- дослідження поведінки пасажирів в транспортній системі за допомогою методу фіксації виявленого вибору і соціологічних опитувань;
- документовані звіти транспортних підприємств про виконану на маршрутах роботу.

Обсяг і спосіб отримання основних характеристик роботи міської маршрутної системи, які повинні складати основу бази даних про маршрутної системи:

1. Ємності зупиночних пунктів, інтенсивність підходу пасажирів і час очікування транспорту - виходять за допомогою спеціальних обстежень силами обліковців або за допомогою телеапаратури.
2. Техніко-експлуатаційні показники роботи маршрутів - обстеження проводяться табличним методом обліковцями або засобами автоматизованого обліку, за допомогою пересувної лабораторії.
3. Пасажиропотоки на ділянках маршрутної мережі і інтервали руху на маршрутах обстежується візуальним методом обліковцями або за допомогою телеапаратури.
4. Можливість вибору пасажирями шляхів слідування - методом фіксації фактичного вибору.

Висновки

За допомогою наведеної методики управління міським пасажирським транспортом можливе вирішення наступних завдань:

- розробка генеральних планів розвитку маршрутної системи до 10-ти і більше років вперед для формування політики капітальних вкладень управлінням транспорту і зв'язку органів місцевого самоврядування на основі переваг пасажирів, планів розвитку території міста та можливостей міського бюджету. Сюди включаються питання розвитку комунікацій та інфраструктури різних видів транспорту, визначення раціональних типів рухомого складу, рівня фінансування пріоритетних видів транспорту і т.д .;
- деталізація планів і розробка оптимального варіанта функціонування маршрутної системи в рамках постійних потреб населення в пересуваннях на період до 5-ти років;
- розрахунок і обґрунтування раціональної величини тарифів на перевезення пасажирів;
- розробка типових планів роботи маршрутів при виникненні позаштатних ситуацій;
- оцінка доцільності відкриття або зміни параметрів роботи маршрутів з ініціативи учасників процесу в рамках діючої маршрутної системи;

- інші завдання, що вимагають оцінки наслідків прийнятих рішень для пасажирів та інших учасників транспортного процесу.

Список використаної літератури

1. Доля В.К. Теоретические основы и методы организации маршрутных автобусных перевозок пассажиров в крупных городах: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.22.10 / В.К. Доля. – М., 1993. – 301 с.
2. Грановский Б.И. Моделирование пассажирских потоков в транспортных системах / Б.И. Грановский // Итоги науки и техники. Серия: Автомобильный и городской транспорт. – 1986. – Т. 11. – С. 67-107.
3. Горбачов П.Ф. Підхід до визначення ймовірності вибору пасажиром шляху пересування / П.Ф. Горбачов // Вісник ХНАДУ – Харків: Вид-во ХНАДУ, 2006. – Вип. 19. – С. 88-91.
4. Горбачёв П.Ф. Определение вероятности выбора пассажиром пути следования / П.Ф. Горбачёв, В.В. Дубровский // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. – № 2. – С. 7–9.

References

1. Dolya, V. K. Teoreticheskie osnovyi i metodyi organizatsii marshrutnyih avtobusnyih perevozk passazhirovo v krupnyih gorodah: diss. ... d-ra tehn. nauk: 05.22.10. Moscow. (1993)
2. Granovskiy, B. I. Modelirovanie passazhirskih potokov v transportnyih sistemah. Itogi nauki i tehniki. Seriya: Avtomobilnyiy i gorodskoy transport. **11**, 67-107. (1986)
3. Horbachov, P. F. Pidkhid do vyznachennia ymovirnosti vyboru pasazhyrom shliakhu peresuvannia. Visnyk KhNADU.**19**, 88-91. (2006)
4. Gorbachyov, P. F., Dubrovskiy, V. V. Opredelenie veroyatnosti vyibora passazhirom puti sledovaniya. Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti. **2**, 7–9. (2001)

УДК 515.2

В.Л. МАРТИНОВ

Київський національний університет будівництва і архітектури

Г.А. ВІРЧЕНКО

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ВІКОН ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БУДІВЕЛЬ КАМПУСІВ

Розроблено комп'ютеризований спосіб визначення раціональної орієнтації світлопрозорих конструкцій у стінах енергоефективних будівель кампусів з точки зору мінімального теплового балансу з оточуючим середовищем, при якому тепловий баланс вікон менший за тепловий баланс стіни. Даний спосіб визначення орієнтації можливо використовувати при проектуванні як енергоефективних, так і звичайних будівель, при новому будівництві, в тому числі на території кампусів.

Ключові слова: енергоефективні будівлі, раціональна орієнтація вікон, тепловий баланс вікна.

В.Л. МАРТЫНОВ

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

Г. А. ВИРЧЕНКО

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского"

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОКОННЫХ ПРОЕМОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ КАМПУСОВ

Разработан компьютеризированный способ определения рациональной ориентации оконных проемов с расположением светопрозрачных конструкций в стенах здания с точки зрения минимального теплового баланса с окружающей средой, при которой тепловой баланс окон меньше теплового баланса стен. Данный способ определения ориентации можно использовать при проектировании как энергоэффективных, так и обычных зданий, в том числе на территории кампусов.

Ключевые слова: энергоэффективные здания, рациональная ориентация окон, тепловой баланс окна.

V. L. MARTYNOV

Kyiv National University of Construction and Architecture

G. A. VIRCHENKO

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

DETERMINATION OF THE RATIONAL ORIENTATION OF WINDOWS OF ENERGY EFFICIENT BUILDINGS OF CAMPUS

The task of reducing the energy costs of campus buildings is relevant for improving their energy efficiency. This is possible due to the optimization of geometric parameters of buildings, including at the expense of rational azimuth orientation of windows in enclosing structures. The orientation of translucent structures greatly affects the level of thermal balance of buildings. The rational arrangement of window openings on the facades of buildings contributes to increasing

the energy efficiency of buildings to 10 percent. The thermal balance of modern windows during a heating period with a certain orientation may be smaller compared to opaque wall structures. The designer needs to have a way to quickly determine the limits of the rational orientation of translucent structures when they are located in the enclosing structures of buildings.

A computerized way of determining the rational orientation of window openings with the location of translucent structures in the walls of the building is developed in terms of the minimum thermal balance with the environment, in which the thermal balance of the windows is less than the thermal balance of the walls. This method of determining the orientation can be used in designing both energy-efficient and ordinary buildings, including those within campus areas.

The proposed mathematical apparatus and developed techniques for automated architectural design of energy-efficient buildings are given in this article. This material is illustrated by concrete practical examples. The territory of Ukraine is divided into two temperature zones characterized by different air temperature during the year and the level of heat from solar radiation. For buildings located in two temperature zones of Ukraine, namely for the cities of Kyiv and Odesa, graphic models were constructed and the rational orientation of the windows was determined when they were located in the enclosing constructions of buildings of a certain constructive solution.

This approach requires its further theoretical development and wide implementation in the practice of architectural design.

Keywords: energy efficient buildings, rational orientation of windows, thermal balance of a window.

Постановка проблеми

При проектуванні будівель, розташованих на території кампусів, постає задача зменшення енергетичних витрат на опалення з метою підвищення їх енергоефективності. Це можливо за рахунок оптимізації геометричних параметрів будівель, у тому числі за рахунок раціональної азимутальної орієнтації вікон при їх розташуванні в огорожувальних конструкціях. Орієнтація світлопрозорих конструкцій значною мірою впливає на рівень теплового балансу конструкції (рівень надходження тепла від сонячної радіації та тепловтрати через огорожувальні конструкції) і тепловий баланс будівлі в цілому. Раціональне розташування віконних прорізів на фасадах будівель сприятиме підвищенню енергоефективності будівель до 10 відсотків. Будівельні норми [1] регламентують показник опору теплопередачі огорожувальних конструкцій, але не враховують рівень надходження сонячної радіації при різній орієнтації світлопрозорої конструкції та вплив її на тепловий баланс. Тепловий баланс сучасних вікон протягом опалювального періоду при певній орієнтації може бути меншим у порівнянні з непрозорими конструкціями стін. Проектувальникові необхідно мати спосіб швидкого визначення меж раціональної орієнтації світлопрозорих конструкцій при їх розташуванні в огорожувальних конструкціях будівель.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вирішенню питання підвищення енергоефективності будівель присвячено роботи [2–4], але в них визначалися оптимальні пропорції будівель з точки зору мінімізації тепловтрат через огорожувальні конструкції за одним параметром пропорцій. У роботах [5, 6] окремо оптимізувалася форма будівлі та окремо параметри утеплювача непрозорих конструкцій будівлі з точки зору мінімального теплового балансу огорожувальних конструкцій. У дослідженні [7] розглядалася багатопараметрична оптимізація енергоефективних будівель. У праці [8] оптимізувалася форма циліндричної будівлі та розподіл утеплювача для опалювального періоду. У публікації [9] запропоновано спосіб оптимізації багатогранної форми енергоекономічної будівлі та розподілу утеплювача по огорожувальних конструкціях.

Мета дослідження

Для підвищення енергоефективності будівель запропонувати спосіб визначення раціональної орієнтації віконних прорізів для розташування в непрозорих огорожувальних конструкціях, при якій тепловий баланс вікон менший за тепловий баланс стін протягом опалювального періоду.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для визначення раціональної орієнтації світлопрозорих конструкцій моделюється тепловий баланс ΔQ (тепловтрати та теплонадходження від сонячної радіації) огорожувальних конструкцій з оточуючим середовищем за опалювальний період. Функція теплового балансу непрозорої конструкції грані згідно з [1, 7] розраховується наступним чином

$$\Delta Q_{cmi} = \left[\frac{1}{R_{cmi}} \right] \cdot S_{cmi} \cdot \left(t_{ei} - \left(t_{zi} + \frac{r_i \cdot Q_{cpi}}{\alpha_{zcmi}} \right) \right) \cdot N_{oib}, \quad (1)$$

а функція теплового балансу світлопрозорої конструкції грані відповідно до [6, 9] визначається як

$$\Delta Q_{vi} = \left[\frac{1}{R_{vi}} \right] \cdot S_{vi} \cdot D_{di} - Q_{cpi} \cdot K_i \cdot \zeta_i \cdot \varepsilon_{oi} \cdot S_{vi}, \quad (2)$$

де t_{zi} – фактична температура зовнішнього повітря; t_{ei} – температура внутрішнього повітря; r_i – альbedo поверхні грані будівлі; Q_{cpi} – енергетична освітленість повітря короткохвильовою радіацією; α_{zcmi} – коефіцієнт теплообміну між зовнішньою поверхнею огорожувальної конструкції та зовнішнім повітрям; R_{cmi} – опір теплопередачі непрозорих огорожувальних конструкцій; N_{oib} – кількість днів опалювального періоду [1]; R_{vi} – опір теплопередачі світлопрозорих огорожувальних конструкцій [1]; D_{di} – кількість градусо-днів опалювального періоду [1]; S_{cmi} – площа непрозорої грані огорожувальних конструкцій; K_i – коефіцієнт дійсних умов хмарності, що впливають на надходження сонячної радіації [1]; ζ_i – коефіцієнт, що враховує затінення віконного прорізу непрозорими елементами [1]; ε_{oi} – коефіцієнт відносного надходження сонячної радіації для світлопрозорих конструкцій [1].

Розроблено програму *SOLAR*, яка будує моделі залежності теплового балансу $\Delta Q_{cmi}=f(A\delta)$ та $\Delta Q_{vi}=f(A\delta)$ світлопрозорих і непрозорих огорожувальних конструкцій (з різним опором теплопередачі) від азимутальної орієнтації конструкції $A\delta$ (рис.1). Якщо сумістити план будівлі з центром моделі, то можна визначати рівень теплового балансу кожної огорожувальної конструкції залежно від орієнтації (рис. 1, 2).

З моделі видно, що азимутальна орієнтація більш значною мірою впливає на тепловий баланс світлопрозорих конструкцій у порівнянні з непрозорими. Тепловий баланс (тепловтрати та теплонадходження від сонячної радіації) вікон з орієнтацією на південь та опором теплопередачі $R_{vi} \geq 0,75 \text{ м}^2\text{К}^0/\text{Вт}$ менший, ніж тепловий баланс стін з нормативним опором [1].

Якщо тепловий баланс світлопрозорих огорожувальних конструкцій не перевищує тепловий баланс непрозорих конструкцій $\Delta Q_{vi} \leq \Delta Q_{cmi}$, тоді перетин моделей визначає зону раціональної орієнтації світлопрозорих конструкцій в огорожувальних конструкціях

будівель (рис. 2). Розв'язання наведеної нижче системи рівнянь дозволяє аналітично визначити допустимі межі орієнтації вікон

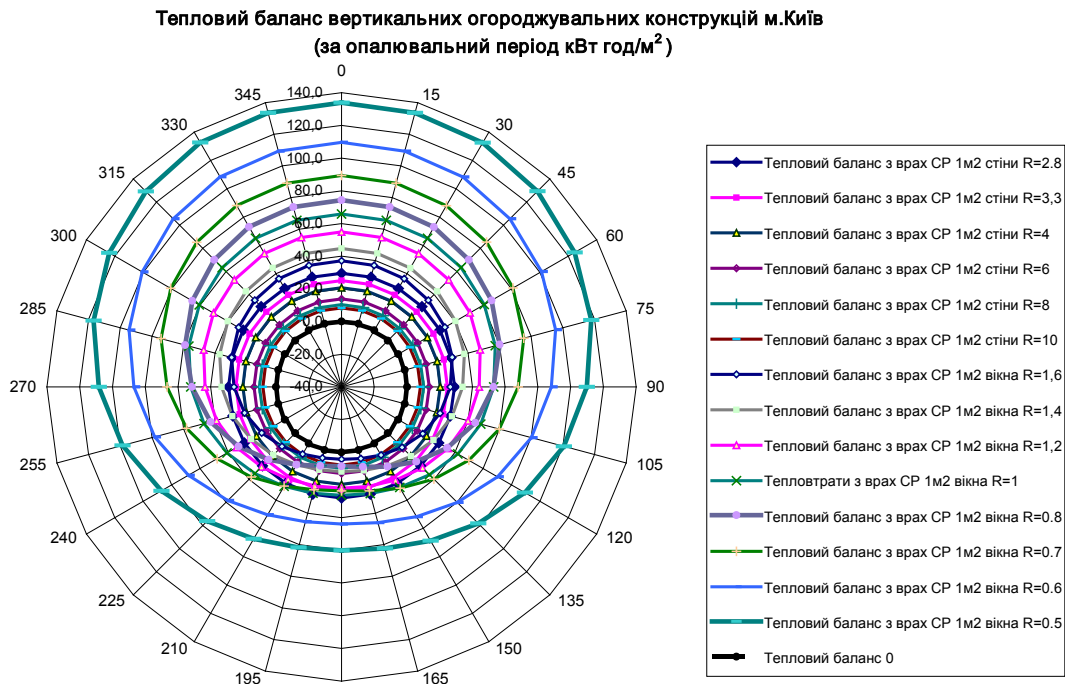


Рис. 1. Моделі $\Delta Q_{cti}=f(A_6)$ та $\Delta Q_{vi}=f(A_6)$ теплового балансу світлопрозорих і непрозорих огорожувальних конструкцій за опалювальний період за різного опору теплопередачі.

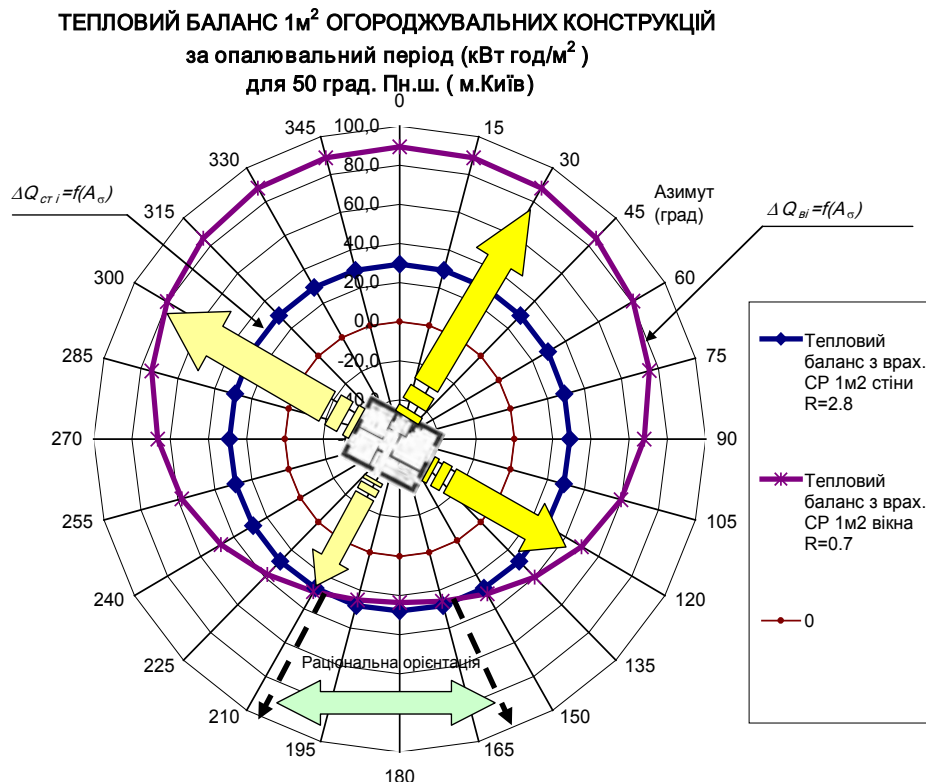
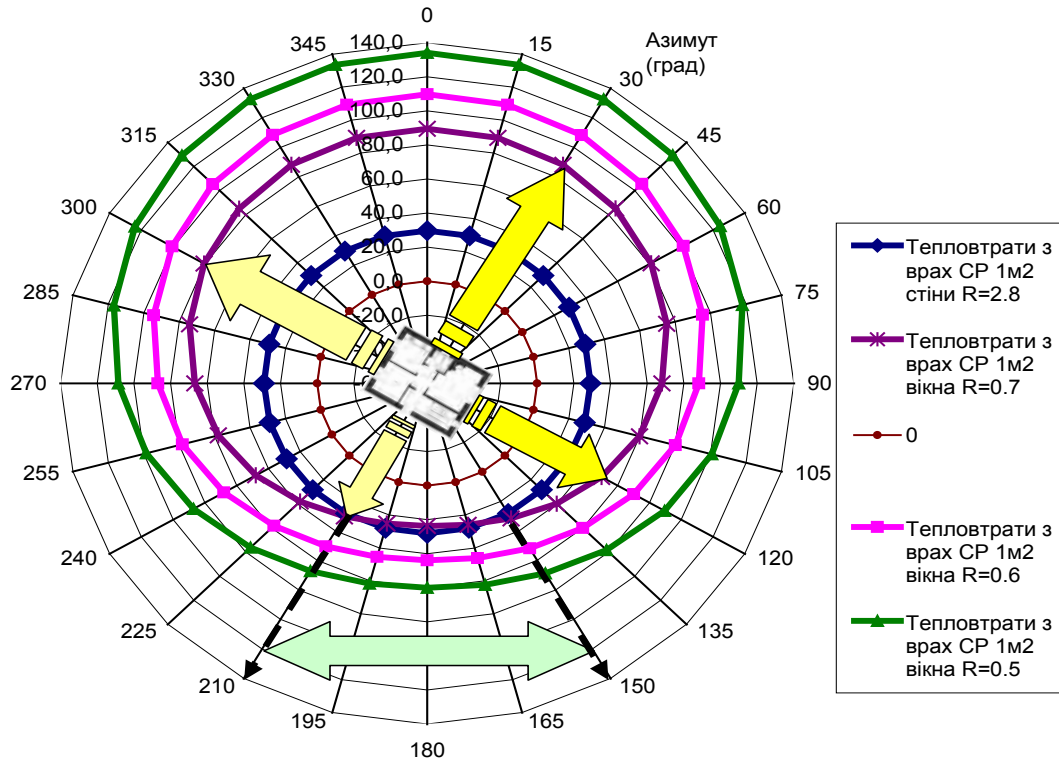


Рис. 2. Визначення раціональної орієнтації світлопрозорих конструкцій з використанням моделей $\Delta Q_{cti}=f(A_6)$ та $\Delta Q_{vi}=f(A_6)$ теплового балансу світлопрозорих і непрозорих огорожувальних конструкцій.

ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС 1 м^2 ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ
за опалювальний період (кВт год/ м^2)
для 50 град Пн.Ш. м.Київ



ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС 1 м^2 ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ
за опалювальний період (кВт год/ м^2)
для 46 град Пн.Ш. м.Одеса

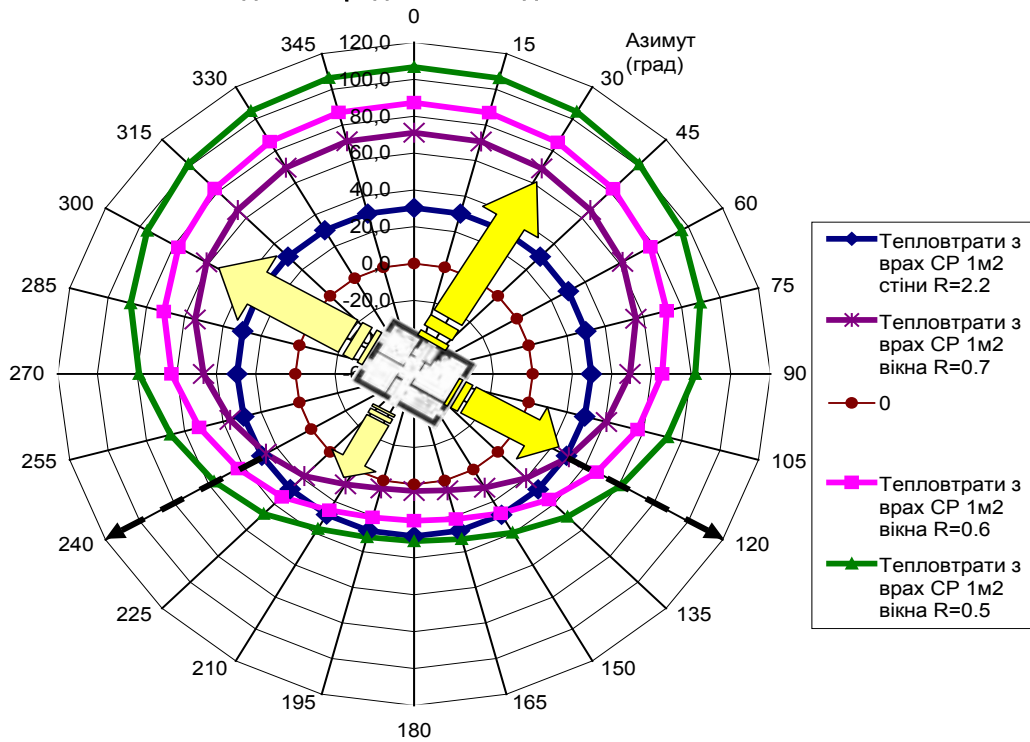


Рис. 3. Визначення раціональної орієнтації світлопрозорих конструкцій з використанням моделей теплового балансу вертикальних огороджувальних конструкцій для двох температурних зон України (міст Києва та Одеси).

$$\begin{cases} \Delta Q_a = f(A_\sigma) \\ \Delta Q_{cm} = f(A_\sigma) \end{cases} \quad (3)$$

Залежності (1)–(3) становлять математичну основу запропонованого комп'ютеризованого способу визначення раціональної орієнтації світлопрозорих конструкцій у стінах енергоефективних будівель кампусів з точки зору мінімального теплового балансу з оточуючим середовищем, при якому тепловий баланс вікон менший за тепловий баланс стіни.

Територія України поділена на дві температурні зони, що характеризуються різною температурою повітря протягом року та рівнем надходження тепла від сонячної радіації. Відповідно до [1] огорожувальні конструкції мають різний нормативний опір теплопередачі. Для будівель, розташованих у двох температурних зонах України, а саме для міст Києва та Одеси побудовано графічні моделі та визначено раціональну орієнтацію вікон при їх розташуванні в огорожувальних конструкціях будівель певного конструктивного вирішення. Ці дані показано на рис. 3.

Таким чином, нами описано математичний апарат і розроблені прийоми для автоматизованого архітектурного проектування енергоефективних будівель, які проілюстровано на конкретних практичних прикладах.

Висновки

У даній статті запропоновано комп'ютеризований спосіб визначення раціональної орієнтації віконних прорізів при розташуванні світлопрозорих конструкцій в огорожувальних непрозорих конструкціях енергоефективних будівель. Головною метою є підвищення енергоефективності з точки зору мінімального теплового балансу з оточуючим середовищем протягом опалювального періоду при забудові на території кампусів. При цьому описано належний математичний апарат, визначено раціональну орієнтацію вікон з опором теплопередачі $R=0,75\text{m}^2\text{K}^0/\text{Вт}$ для будівель у двох температурних зонах України, при якій тепловий баланс вікон менший, ніж тепловий баланс стін з заданим опором теплопередачі. Для м. Києва (I температурна зона) орієнтація становить від 155 до 205 градусів, для м. Одеси (II температурна зона) – від 120 до 240 градусів.

Напрацьований підхід дозволяє шляхом швидкого визначення меж раціональної орієнтації світлопрозорих конструкцій при їх розташуванні в огорожувальних конструкціях будівель раціонально розміщувати віконні прорізи на фасадах будівель, зокрема кампусів, що сприяє підвищенню їх енергоефективності. Викладені матеріали потребують свого подальшого теоретичного розвитку та широкого впровадження у практику архітектурного проектування.

Список використаної літератури

1. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2016. // Мінбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2016. – 35 с. – (Державні будівельні норми України).
2. Маркус Т.А. Здания, климат и энергия / Т.А. Маркус, Э.Н. Морис. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 540 с.
3. Табунщиков Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
4. Мартинов В.Л. Геометричне моделювання параметрів енергоактивних житлових будинків / В.Л. Мартинов // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції "Геометричне моделювання і комп'ютерні технології: теорія, практика, освіта". – Харків, 2009. – С. 153-158.

5. Сергейчук О.В. Оптимізація розподілу утеплювача по поверхні будівлі при заданому класі його ефективності / О.В. Сергейчук // Матеріали VI Міжнародної Кримської науково-практичної конференції "Геометричне та комп'ютерне моделювання: енергозбереження, екологія, дизайн". – Сімферополь, 2009. – С. 44–49.
6. Сергейчук О.В. Оптимізація форми енергоефективної будівлі, зовнішня оболонка якої n-параметрична поверхня / О.В. Сергейчук // Матеріали VII Міжнародної Кримської науково-практичної конференції "Геометричне моделювання та комп'ютерний дизайн". – Сімферополь, 2010. – С. 150-155.
7. Мартинов В.Л. Багатопараметрична оптимізація гранних енергоефективних будівель / В.Л. Мартинов // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції "Геометричне моделювання, комп'ютерні технології та дизайн: теорія, практика, освіта". – Ужгород, 2011. – С. 135-139.
8. Мартинов В.Л. Оптимізація циліндричної форми енергоефективних будівель та розподілу утеплювача / В.Л. Мартинов // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції "Актуальні проблеми геометричного моделювання". – Мелітополь, 2011. – С. 133-138.
9. Мартинов В.Л. Оптимізація багатогранної форми енергоекономічної будівлі та розподілу його утеплювача / В.Л. Мартинов // Технічна естетика і дизайн. – К.: КНУБА, 2012. – Вип. 89. – С. 143-147.

References

1. Teplova izolyatsiya budivel: DBN B.2.6-31:2016. Minbud Ukrainy (Derzhavni budivelni normy Ukrainy). Ukrarhbudininform. Kyiv. (2016)
2. Markus, T. A., Moris, E. N. Zdaniya, klimat i energiya. Gidrometeoizdat. Leningrad. (1985)
3. Tabunschikov Yu. A., Brodach M. M. Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teplovoy effektivnosti zdaniy. AVOK-PRESS. Moscow. (2002)
4. Martynov, V. L. Heometrychne modeliuвання parametriv enerhoaktyvnykh zhytlovykh budynkiv. Materialy VI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Heometrychne modeliuвання i kompiuterni tekhnolohii: teoriia, praktyka, osvita". Kharkiv. 153-158. (2009)
5. Serheichuk, O. V. Optymizatsiia rozpodilu uteplivacha po poverkhni budivli pry zadanomu klasi yoho efektyvnosti. Materialy VI Mizhnarodnoi Krymskoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Heometrychne ta kompiuterne modeliuвання: enerhozberezhennia, ekolohiia, dyzain". Simferopol. 44–49. (2009)
6. Serheichuk, O. V. Optymizatsiia formy enerhoefektyvnoi budivli, zovnishnia obolonka yakoi n-parametrychna poverkhnia. Materialy VII Mizhnarodnoi Krymskoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Heometrychne modeliuвання ta kompiuterni dyzain". Simferopol. 150-155. (2010)
7. Martynov, V. L. Bahatoparmetrychna optymizatsiia hrannykh enerhoefektyvnykh budivel. Materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Heometrychne modeliuвання, kompiuterni tekhnolohii ta dyzain: teoriia, praktyka, osvita". Uzhhorod. 135-139. (2011).
8. Martynov, V. L. Optymizatsiia tsylindrychnoi formy enerhoefektyvnykh budivel ta rozpodilu uteplivacha. Materialy XIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Aktualni problemy heometrychnoho modeliuвання". Melitopol. 133-138. (2011).
9. Martynov, V. L. Optymizatsiia bahatohranoi formy enerhoekonomichnoi budivli ta rozpodilu yoho uteplivacha. Tekhnichna estetyka i dyzain. **89**, 143-147. (2012)

УДК 631.1 : 681.5

А.А. ОМЕЛЬЧУК, Ю.О. ЛЕБЕДЕНКО, О.В. ПОЛИВОДА
Херсонський національний технічний університет

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ У ІНТЕГРОВАНИХ ПТАШИНИХ І РИБНИХ ГОСПОДАРСТВАХ

У статті проводиться дослідження технології інтегрованого птахівництва та рибництва. Аналізуються параметри функціонування, потреби та вимоги до систем управління, що повинні забезпечувати роботу подібних комплексів. Проектується комп'ютеризована система управління комбінованим рибо-кочиним господарством. Пропонується оптимальне керування інтегрованим рибо-пташиним господарством з метою мінімізації витрат на керування і енергетичних ресурсів, та забезпечення оптимальних умов вирощування риби та водоплавної птиці. Підкреслюється важливість екологічного вирощування птиці.

Ключові слова: система управління, інтегроване господарство, електродвигун, мережа.

А.А. ОМЕЛЬЧУК, Ю.А. ЛЕБЕДЕНКО, О.В. ПОЛИВОДА
Херсонский национальный технический университет

КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПТИЦЕВОДЧЕСКИХ И РЫБОВОДЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВАХ

В статье проводится исследование технологии интегрированного птицеводства и рыбоводства. Анализируются параметры функционирования, нужды и требования к системам управления, которые должны обеспечивать работу подобных комплексов. Проектируется компьютеризированная система управления комбинированным рыбо-утиным хозяйством. Предлагается оптимальное управление интегрированным рыбо-утиным хозяйством с целью минимизации затрат на управление и энергетических ресурсов, и обеспечения оптимальных условий выращивания рыбы и водоплавающей птицы. Подчеркивается важность экологического выращивания птицы.

Ключевые слова: система управления, интегрированное хозяйство, электродвигатель, сеть.

А.А. OMELCHUK, YU.O. LEBEDENKO, O.V. POLYVODA
Kherson National Technical University

COMPUTERIZED CONTROL SYSTEM FOR INTEGRATED POULTRY AND FISH FARMING

Today one of the priority branches of the country's economy is a cattle breeding. However, at the same time, this department continues its development and requires modern solutions in many areas, including automation of production. It is known that modern agrocomplexes that are saturated with highly effective control systems are more energy efficient, productive, and therefore more competitive. The article explores such a direction as poultry farming, namely the breeding of ducks in combination with fish farming, known as integrated farming. The parameters of functioning, needs and requirements to control systems that should

ensure the operation of such complexes are analyzed. A computerized control system for a combined fish and duck farm is being designed. The importance of ecological growing of poultry is underlined. Together with fish, mostly ducks are grown, less often geese. Combined fish and duck farm makes it possible to more fully use the forage resources of water bodies by obtaining two types of products - fish and poultry, as well as to obtain more food products from a unit area at a relatively low cost. For the automation of production processes in the keeping of poultry and fish, a certain set of equipment is used to ensure normal living conditions of animals.

The optimal control of the integrated fish and duck farm must be carried out in order to minimize the costs of management and energy resources, and to ensure optimal conditions for the cultivation of fish and waterfowl. To use the methods of the theory of optimal control, a model of an object in a state space is proposed. On the basis of the analysis, operational parameters were identified, which the control system must monitor to ensure efficient operation of the complex. A structure of the computerized control system for combined farming was developed. It is noted that the ecological breeding of bird with the possibility of walking has significant advantages, which consist in the quality of the meat of poultry and feathers. In addition, retention in cages is unnatural and harmful to birds, and especially for waterfowl.

Keywords: control system, integrated production, electric motor, network.

Постановка проблеми

На сьогодні однією з пріоритетних галузей господарства держави є тваринництво. Однак, разом з тим, тваринництво продовжує свій розвиток і потребує сучасних рішень у багатьох областях знань, зокрема, і в автоматизації виробництва. Відомо, що сучасні агрокомплекси, що насичені високоефективними системами керування більш енергоефективні, продуктивні, а тому – більш конкурентоспроможні. У статті досліджується такий напрямок, як птахівництво, а саме розведення качок у комплексі з рибозведенням, відоме як інтегроване рибо-пташине господарство [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Спільно з рибою вирощують в основному качок, рідше – гусей. Комбіноване рибочачине господарство дозволяє більш повно використовувати кормові ресурси водойм за рахунок отримання двох видів продукції – риби і птиці, та, до того ж, отримувати більше харчової продукції з одиниці площі при відносно низьких витратах.

На рис. 1 наведені декілька альтернативних порід качок. Для вирощування спільно з рибою зазвичай використовують качок пекінської породи (рис. 1, а), а також промислових гібридів. Для спільного вирощування з рибою використовують каченят у віці від трьох-чотирьох тижнів. З цього віку вони починають добре переносити добові коливання температури і можуть переходити на воду. На водойму висаджують міцних каченят з живою масою не нижче 0,5-0,8 кг. Через кожні сім днів після висадки проводиться контрольне зважування каченят і порівняння їх живої маси з нормативними показниками. Підвищення ефективності спільного вирощування риби та водоплавної птиці обумовлюється наступними факторами:

- качки не є конкурентами в харчуванні основним видам риб і поїдають, крім рослинності, пуголовків, дрібних жаб і їх ікру, які є конкурентами в харчуванні вирощуваних риб;
- качки поїдають м'яку підводну і плаваючу рослинність і сприяють очищенню водойми, збільшенню прозорості води;
- качиний послід – це органічне добриво, багате сполуками азоту, фосфору, калію, кальцію, мікроелементами, значна частина яких міститься у вигляді водорозчинних форм, доступних для засвоєння фіто-, зоопланктоном і донними організмами, що у свою чергу є їжею для риби.



а) Пекінська качка



б) Сіра українська качка



в) Мускусна качка



г) Індійський бігунок

Рис. 1. Різноманіття порід домашніх качок.

Не всі категорії ставків можуть бути використані для вихову качок, а тільки нагульні. Пов'язано це з тим, що в малькових, вирощувальних або нерестових ставках качки можуть заковтувати молодь риб.

Разом з качками вирощують коропа, як в монокультурі, тобто одного, без інших видів риб, так і спільно з білим і строкатим товстолобиком, а також їх гібридами (рис. 2).



а) Білий товстолобик



б) Короп

Рис. 2 - Породи риб, що можуть вирощуватися спільно з качками

Проблемами технологічних процесів у пташнику та розробками спеціалізованих систем управління технологічними процесами та енергозбереженням займалися такі дослідники, як І.І. Мартиненко, В.П. Машевський та інші. Продуктивність птиці протягом періоду її утримання змінюється у першу чергу з віком та під впливом температури. Температура в пташнику впливає також на масу яєць та їх якість, споживання птицею кількості корму, води та її самопочуття. При зниженні температури в приміщенні зменшується несучість птиці, збільшується витрата кормів на виробництво яєць і м'яса. При підвищеній температурі несучість також знижується, птиця споживає більше води, і співвідношення між кормами і водою зростає [2].

Мета дослідження

Метою роботи є дослідження технологічного процесу при комбінованому розведенні водоплавної птиці і риби, з подальшою розробкою на його основі комп'ютеризованої системи управління в інтегрованих пташних і рибних господарствах.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для автоматизації виробничих процесів в пташнику при утриманні птиці використовується певний комплекс обладнання, призначений для забезпечення нормальних умов життєдіяльності качок.

У комплекс входить: ланцюговий кормороздавач з спіралью-гвинтовим завантажувальним транспортером, бункер з шнеком, одноярусні двосторонні групові гнізда, що обладнані транспортером для збирання яєць. Основна проблема в регулюванні вологості і температури - забезпечити найкраще сприятливе середовище для харчування домашньої птиці. Контроль вологості також є важливим інструментом для запобігання поширенню хвороб. Зазвичай відносна вологість не повинна перевищувати 60%. Температура і вологість є взаємопов'язаними між собою параметрами. Моніторинг і контроль птахівничої ферми можна розділити на три основні завдання: вимір, розрахунок і коректування. Виміряні значення кліматичних змінних спочатку перетворюються з аналогового вигляду в цифровий, а потім передаються на комп'ютер. Через несприятливе середовище і високу вологість, центральний вузол зазвичай розташований поза птахофабрикою. Сигнал, що генерується датчиками, зазвичай слабкий, тому для підвищення потужності сигналу необхідно використовувати підсилювач. Передбачається використовувати бездротову мережу датчиків, в якій дані передаються на вузол базової станції (приймача), який підключений до комп'ютера. Сигнал може передаватися за допомогою вузлів-маршрутизаторів, якщо відстань між вимірювачами і центральним вузлом управління перевищує довжину однієї радіолінії. Для забезпечення потрібного повітрообміну і створення необхідного температурного режиму у пташнику використовується комплекс вентиляційного обладнання. Задані величини температури і повітрообміну повинні автоматично підтримуватися зміною частоти обертання двигунів витяжних вентиляторів при відхиленні температури повітря у вентиляційному приміщенні від встановленого значення. Також потрібно забезпечувати гаряче водопостачання для потреб технологічного процесу у пташнику.

Для автоматизації рибного господарства так само потрібно контролювати ключові параметри, а саме: вміст кисню, рівень рН, температуру води в системі, освітлення, рівень та швидкість водо-обороту води. У комп'ютеризовану систему управління вводяться максимальні і мінімальні значення показників вмісту кисню, рН, температури. У разі зниження показників до мінімального значення подається команда на включення системи оксигенації. Регулювання рН здійснюється увімкненням насоса, що подає воду в ємність з розчином лугу. Апаратно-програмний комплекс системи управління веде архів, що містить дані за кілька років. Таким чином, користувачеві надаються графіки звітних періодів від доби до року за будь-яким з параметрів. У програмному забезпеченні передбачається віддалений доступ до програмного забезпечення через мережу Інтернет з можливістю повідомлення через електронну пошту, Інтернет, смс-повідомлення про виникнення критичних та аварійних ситуацій. Система також повинна мати у своєму складі функцію автоматичного годування. Додатково комплекс автоматизації може керувати рівнем солі в системі, процесом змішування води з різних водойм, підрахунком риби в кожному з ставків.

Враховуючи специфіку сільськогосподарського виробництва застосовуються електродвигуни тривалого S1, короткочасного S2, повторно-короткочасного режиму роботи S3. На прикладі вентилятора розглянемо розрахунок і вибір електродвигуна по

потужності, частоті обертання, електричній модифікації, кліматичному виконанні, часу розгону, допустимій температурі нагріву.

Механічна характеристика робочої машини:

$$M_c = M_{co} + (M_{cn} - M_{co}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (1)$$

де M_{co} – момент рушення для машин з легким пуском, $M_{co} = 0,1M_n$, Н·м;

M_{cn} – номінальний момент, який визначається по існуючому двигуну;

ω – значення кутової швидкості, с^{-1} ;

ω_n – номінальна кутова швидкість, с^{-1} ;

Визначаємо потужність вентилятора:

$$P_{розр.} = \frac{L_g \cdot H_g \cdot 10^{-3}}{3,6 \cdot \eta_g \cdot \eta_{пер.}}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

де $P_{розр.}$ – розрахункова потужність вентилятора, кВт;

$\eta_{пер.}$ – ККД передачі;

H_g – напір, м;

η_g – ККД вентилятора, $\eta_g = 0,55$;

L_g – продуктивність вентилятора, $\text{м}^3/\text{год}$.

Подачу повітря розраховують за наступною формулою:

$$L_g = K_z \cdot L_{num.}, \text{ м}^3/\text{год.}, \quad (3)$$

де K_z – кількість голів, гол.;

$L_{num.}$ – норма подачі повітря, яка приходить на один вентилятор.

Оптимальне керування інтегрованим рибо-пташиним господарством необхідно здійснювати з метою мінімізації витрат на керування і енергетичних ресурсів, та забезпечення оптимальних умов вирощування риби та водоплавної птиці [3]. Використання методів теорії оптимального керування припускає наявність моделі об'єкту в просторі станів у вигляді

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad \mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad (4)$$

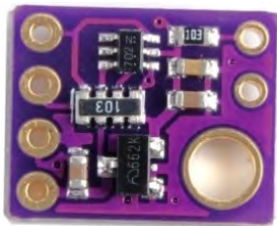
де \mathbf{x} – вектор станів об'єкта; \mathbf{u} – вектор керуючих впливів; \mathbf{f} – вектор, як правило, нелінійних залежностей; \mathbf{y} – вектор виходу.

Вектор виходу, що характеризує структуру системи моніторингу, доцільно формувати з урахуванням умов вирощування та утримування водоплавної птиці та риби у вигляді

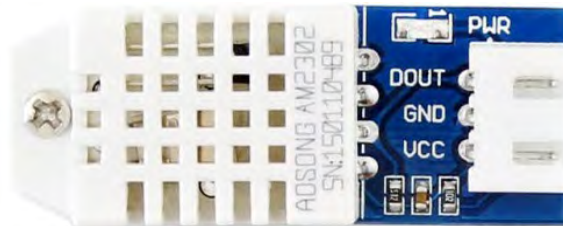
$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} \end{pmatrix}^T \quad (5)$$

де y_{11} – рівень наповнення годівниці птахів, y_{12} – температура повітря, y_{13} – вологість повітря, y_{14} – рівень концентрації CO_2 , y_{15} – положення птахів, y_{21} – рівень води у водоймі, y_{22} – температура води, y_{23} – рівень кисню, y_{24} – прозорість води, y_{25} – положення риби.

Пропонується задіяти мережу з наступних видів датчиків у системі управління (рис. 3). Цифровий датчик освітленості GY-302 на чіпі BH1750 призначений для вимірювання фонового освітлення. Має високу чутливість і поширений послідовний інтерфейс I2C. Модуль датчика температури і вологості підвищеної точності DHT22, у який інтегровано необхідні додаткові компоненти для підключення датчика до мікроконтролеру.



а) датчик освітленості GY-302



б) датчик вологості повітря DHT-22



в) інфрачервоний датчик руху



г) інфрачервоний вимірювач концентрації CO_2



д) міні-комп'ютер Raspberry Pi

Рис. 3. Датчики у системі управління.

Підходить для підключення як до контролерів Arduino так і до інших мікроконтролерів з напругою логічних рівнів 5 В і 3.3 В. Інфрачервоний датчик руху для Arduino і інших мікроконтролерів дозволяє виявляти рух тварини на відстані до 7 метрів. Інфрачервоний вимірювача концентрації CO² MH-Z19B (рис. 3, г) призначений для кількісного визначення питомого вмісту вуглекислого газу в повітрі. Датчик має два вихідних інтерфейсу, температурну компенсацію, високу лінійність і мале енергоспоживання. У якості центрального блоку управління пропонується застосовувати Raspberry Pi 3 B+ (рис. 3, д).

Структура системи управління наводиться на рис. 4.

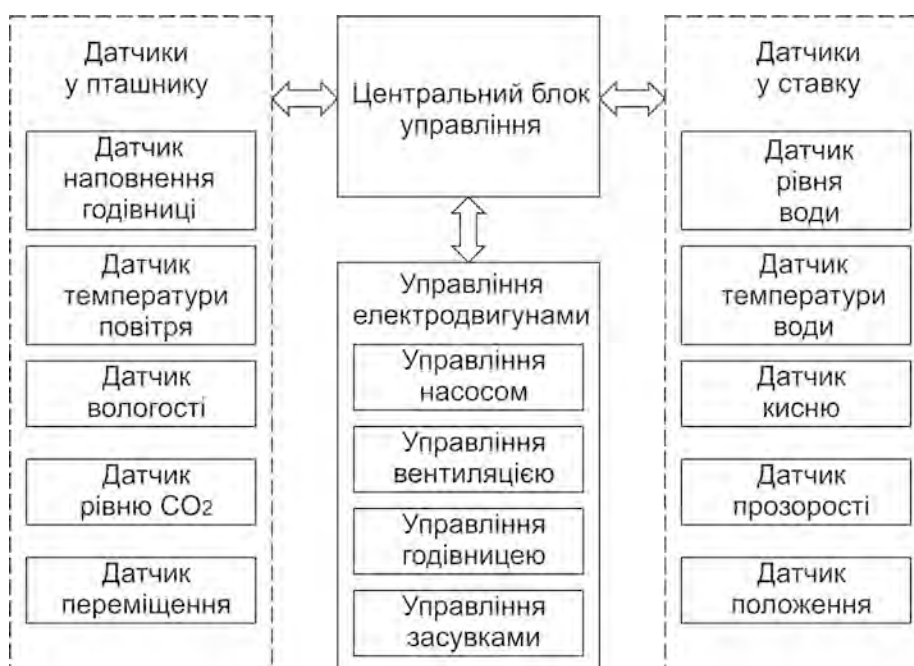
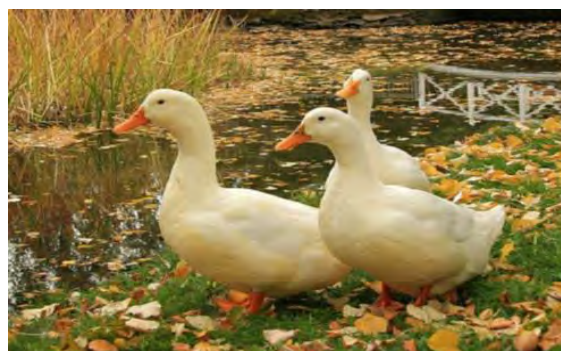


Рис. 4. Структура комп'ютеризованої системи управління.

Порівняння умов утримання птиці наведено на рис. 5.



а) у клітках



б) з можливістю вигулу

Рис. 5. Умови утримання птиці.

Зазначимо, що екологічне утримання птиці з можливістю вигулу має істотні переваги, які виявляються у якості отриманого м'яса птиці, пуху, пера. Крім того, утримання у клітках є неприродним та шкідливим для птиці, і особливо для водоплавної.

Висновки

У статті у першому наближенні досліджується технологічний процес інтегрованого птахівництва та рибицтва. На основі проведеного аналізу виділені робочі параметри, які має контролювати система управління, щоб забезпечити ефективну роботу комплексу. Розроблена структурна комп'ютеризована система управління комбінованим рибочасиним господарством. Окремо зазначається необхідність екологічного вирощування птиці, з можливістю вільного пересування і доступом до водойми.

Список використаної літератури

1. Андрющенко А.І. Ставове рибицтво / А.І. Андрющенко, С.І. Алимов — Харків: Вид. центр НАУ., К.: Оберіг, 2008. — 635 с.
2. Віхрова Л.Г. Автоматизована енергоощадна система управління параметрами температурного режиму пташника / Л.Г. Віхрова, Р.П. Ткаченко, А.В. Рибаченко // *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* — 2010. — № 23. — С. 183–188.
3. Омельчук А.А. Проблеми узгодженого керування складною електромеханічною системою / А.А. Омельчук, Ю.О. Лебеденко, Г.В. Рудакова // *Наукові праці Національного університету харчових технологій.* — К.: НУХТ, 2013. — № 49. — С. 19–23.

References

1. Andriushchenko, A. I., Alymov, S. I. Stavove rybnytstvo. Vyd. tsentr NAU. Kharkiv. Oberih. Kyiv. (2008)
2. Vikhrova, L. H., Tkachenko, R. P., Rybachenko, A. V. Avtomatyzovana enerhooshchadna systema upravlinnia parametramy temperaturnoho rezhymu ptashnyka. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia. **23**, 183-188. (2010)
3. Omelchuk, A. A., Lebedenko, Yu. O., Rudakova, H. V. Problemy uzghodzhenoho keruvannia skladnoiu elektromekhanichnoiu systemoiu. Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii. **49**, 19-23. (2013)

УДК 666.97.033+681.5.015.8:519

Ю.В. ЧОВНЮК

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
М.Г. ДИКТЕРУК, М.С. КОБЕЦ

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

ВЫБОР РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРА ПРИ МОНИТОРИНГЕ И КОНТРОЛЕ ПРОЦЕССОВ ВЛАГОПЕРЕНОСА В МУЗЕЙНЫХ ЭКСПОНАТАХ/КАРТИНАХ МЕТОДОМ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЧ/КВЧ ЭНЕРГИИ

Для мониторинга и контроля процессов влагопереноса в экспонатах, помещённых в музеях (например, в картинах художников – мастеров прошлых веков, в гобеленах, в скульптурах и пр.) предложено использовать метод поглощения энергии электромагнитных волн (СВЧ – радиочастотного диапазона и КВЧ – диапазона миллиметровых волн) нетепловой интенсивности. Контроль за процессом влагопереноса в музейных экспонатах данным способом основан на том, что поглощение энергии СВЧ/КВЧ – электромагнитных волн нетепловой интенсивности при их прохождении через дисперсные системы (именно таковой представляется полотно художественной картины, краски, нанесенные на него, защитные слои (полировка) и пр.) определяется количеством свободной воды и удельной проводимостью исследуемого объекта. При экспонировании художественных полотен в помещениях музеев (картинных галереях) объёмное содержание воды в системе и её удельная проводимость увеличиваются, достигая порою таких значений, при которых может быть нарушена целостность полотна (ткани полотна), появляются трещины, изгибы полотна, что, в конечном счёте, ведёт к его разрушению с течением времени. При этом СВЧ/КВЧ – электромагнитные волны имеют нетепловую интенсивность именно для того, чтобы зондирующий картину/экспонат (электромагнитный) сигнал как падающий, так и отражённый, не создавал её/его повреждение при поглощении в тонком поверхностном слое. Дополнительный влагоперенос внутрь экспонатов музея вызван наличием в музейном помещении (картинной галерее) потока посетителей, особенно в те дни, когда проводятся выставки. Если имеется стабилизация поглощения СВЧ/КВЧ энергии, которую можно получить с помощью специальных систем контроля микроклимата музейных помещений, тогда процесс разрушения полотен/экспонатов можно приостановить (или, по крайней мере, существенно уменьшить). На точность определения параметров поглощаемой СВЧ/КВЧ энергии данным методом существенно влияет ряд факторов (в частности, рабочая частота генератора электромагнитных волн, точность её настройки, ширина частотного диапазона излучения и пр.), которые связаны как с точностью измерения ослабления СВЧ/КВЧ сигнала (методом СВЧ/КВЧ – рефлектометрии), так и с особенностями исследуемого экспоната/картины.

Ключевые слова: выбор, рабочая частота, генератор, мониторинг, контроль, влагоперенос, музейный экспонат, художественное полотно, метод, поглощение, СВЧ/КВЧ электромагнитные волны, нетепловая интенсивность, энергия.

Ю.В. ЧОВНЮК

Національний університет біоресурсів і природокористування України

М.Г. ДІКТЕРУК, М.С. КОБЕЦЬ

Київський національний університет будівництва і архітектури

ВИБІР РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ ГЕНЕРАТОРА ПРИ МОНІТОРИНГУ І КОНТРОЛІ ПРОЦЕСІВ ВОЛОГОПЕРЕНОСУ У МУЗЕЙНИХ ЕКСПОНАТАХ/КАРТИНАХ МЕТОДОМ ПОГЛИНАННЯ НВЧ/КВЧ ЕНЕРГІЇ

Задля моніторингу і контролю процесів вологопереносу у експонатах, які розміщені у музеях (наприклад, у картинах художників – майстрів минулих віків, у гобеленах, у скульптурах та ін.), запропоновано використовувати метод поглинання енергії електромагнітних хвиль (НВЧ – радіочастотного діапазону й КВЧ – діапазону міліметрових хвиль) нетеплової інтенсивності. Контроль за процесом вологопереносу у музейних експонатах даним способом заснований на тому, що поглинання енергії НВЧ/КВЧ електромагнітних хвиль нетеплової інтенсивності при їх проходженні через дисперсні системи (саме такою представляється полотно художньої картини, фарби, нанесені на нього, захисні прошарки (полірування) та ін.) визначається кількістю вільної води та питомою електропровідністю досліджуваного об'єкту. При експонуванні художніх полотен у приміщеннях музеїв (картинних галереях) об'ємний вміст води у системі та її питома електропровідність збільшуються, досягаючи інколи таких значень, при яких може бути порушена цілісність полотна (тканини полотна), з'являються тріщини, згини полотна, що, у кінцевому випадку, призводить до його руйнування з плином часу. При цьому НВЧ/КВЧ електромагнітні хвилі мають нетеплову інтенсивність саме для того, щоб зондуючий картину/експонат (електромагнітний) сигнал як падаючий, так і відбитий, не створював її/його пошкодження при поглинанні у тонкому поверхневому прошарку. Додатковий вологоперенос всередину експонатів музею, викликаний наявністю у приміщенні музею (у картинній галереї) потоку відвідувачів, особливо у ті дні, коли проводяться виставки. Якщо наявна стабілізація поглинання НВЧ/КВЧ енергії, яку можна отримати за допомогою спеціальних систем контролю мікроклімату музейних приміщень, тоді процес руйнування художніх картин/експонатів можна призупинити (або, принаймні, суттєво зменшити). На точність визначення параметрів НВЧ/КВЧ енергії, яка поглинається, даним методом суттєво впливає низка факторів (зокрема, робоча частота генератора електромагнітних хвиль, точність її налаштування, ширина частотної смуги випромінювання та ін.), які пов'язані як з точністю вимірювання послаблення НВЧ/КВЧ сигналу (методом НВЧ/КВЧ рефлектометрії), так і з особливостями експонату/картини, що досліджується.

Ключові слова: вибір, робоча частота, генератор, моніторинг, контроль, вологоперенос, музейний експонат, художнє полотно, метод, поглинання, НВЧ/КВЧ електромагнітні хвилі, нетеплова інтенсивність, енергія.

Y.V. CHOVDNYUK
National University of Bioresources and Life Sciences of Ukraine
M.G. DIKTERUK, M.S. KOBETZ
Kyiv National University of Construction and Architecture

CHOICE OF GENERATOR'S WORKING FREQUENCY DURING THE MONITORING AND CONTROL OF MOISTURE TRANSFER IN MUSEUM'S EXHIBITS/PICTURES WITH THE HELP OF UHF/EHF ENERGY ABSORPTION METHOD

In order to monitoring and control of moisture transfer in museum's exhibits (for example, in pictures of painters – masters of past centuries, hobbles, sculptures etc.), one may use the method of electromagnetic waves energy absorption (UHF – radio frequency range and EHF – range o millimeter waves) with a very low level of heat intensity of these waves. The control of moisture transfer in museum's exhibits with a help of such method is based on a phenomenon of UHF/EHF electromagnetic waves absorption, when they have non-heat intensity, during the process of transmission of such waves along dispersive systems (just so may be called the canvases of a pictures, a paints, protective layer on a canvases (polish), etc.). This value of absorption is determined by the quantity of a free water and by the conductivity of researched object, as well. When canvases are exhibited at museum's rooms (painting galleries), the volume content of a water in the system and its conductivity are increased, and that's why they may have such values which can destroy the canvases' condition of being intact (for example, their materials), there are cracks in a canvases, their bending and so on. All these phenomena destroy canvases during a certain period of time. By the way, UHF/EHF electromagnetic waves of non-heat intensity have such values of it in order to no destroy the exhibit/canvas surface during the act of absorption of incident/reflected electromagnetic search signal in the thin surface layer. The additive moisture transfer into museum's exhibits is due to the flow of visitors at museum's rooms (at painting gallery) just during those days when exhibitions are. If one has the stabilization of UHF/EHF energy absorption which may be obtained with the help of a special control system of microclimate of museum's rooms, then the process of destroying of canvases/exhibits may be suspend (or may be substantially decreased). The accuracy of determination of absorption parameters of UHF/EHF energy with the help of this method substantially depends on some factors (for example, the working frequency of electromagnetic waves generator, the accuracy of its tuning, the bandwidth of frequency range of emission, etc.). These factors are connected with an accuracy of measuring of UHF/EHF signal attenuation (with the help of UHF/EHF reflectometer method) and with a characteristic properties of the researching exhibit/canvas.

Keywords: choice, working frequency, generator, monitoring, control, moisture transfer, museum's exhibit, painting canvas, method, absorption, UHF/EHF electromagnetic waves, non-heat intensity, energy.

Постановка проблемы

Развитие технологий способствует повышению уровня жизни людей, в том числе трансформирует урбанистическую среду в сторону увеличения комфорта пребывания в помещениях, вместе с тем решая оптимизационные задачи потребления энергоресурсов и энергосбережения. В полной мере это относится и к музейным помещениям, призванным сохранять длительное время в комфортном состоянии экспонируемые в них произведения искусства.

Конечно, необходимым условием, которое следует соблюдать для поддержания в норме всех параметров экспонатов (картин художников), является существование надёжной системы управления (регулирования) воздушных потоков, температуры и влажности в помещениях музея, где расположены экспонаты и могут находиться группы людей (посетителей), вносящих свой влажностно-температурный дисбаланс. Контроль последнего является, пожалуй, одним из основных условий приемлемого содержания произведений искусства в музейных помещениях.

Поскольку полотно художественной картины (её ткань) может быть отнесена к разряду дисперсных материалов, мы в дальнейшем будем пользоваться именно этим термином, подразумевая под ним полотно картины, гобелен и пр. Для определения показателя влагосодержания в дисперсном материале можно, по мнению авторов данного исследования, воспользоваться неразрушающим дисперсный материал методом поглощения СВЧ/КВЧ энергии электромагнитных волн нетепловой интенсивности.

Контроль за влагосодержанием дисперсного материала данным способом основан на том, что поглощение энергии сверхвысокочастотных (СВЧ)/крайне высокочастотных (КВЧ) электромагнитных волн при прохождении их через дисперсные системы определяется количеством свободной воды и удельной проводимостью системы. При посещении музейных помещений посетителями, как правило, объёмное содержание воды в дисперсных материалах и их удельная (электро-) проводимость увеличиваются, достигая порой таких значений, при которых может произойти существенная деструкция дисперсного материала (появляются трещины, коробления, изгибы на полотне картины и пр.), что, в конечном итоге приводит к потере шедевра искусства в целом либо требуется специальная дорогостоящая реставрация его.

Если в музейных помещениях присутствует система контроля за их микроклиматом, которая практически мгновенно отслеживает возможные колебания влаги, температуры, скорости воздушных потоков в указанных помещениях, то для её нормальной эксплуатации необходимо обеспечить подачу в контроллеры этой системы оперативной информации, в частности, о влагосодержании помещения, чтобы сама система смогла быстро внести коррективы в параметры помещения, в соответствии с нормами его эксплуатации и нормами содержания в нём шедевров искусства.

Таким образом, влагосодержание в музейном помещении можно определять по стабилизации поглощения СВЧ/КВЧ энергии электромагнитных волн нетепловой интенсивности. Именно на таком принципе могут быть построены датчики влагосодержания помещения, оперативно передающие информацию о влагосодержании на контроллеры системы мониторинга микроклимата помещения с целью его коррекции в сторону нормальных значений, предусмотренных правилами и нормативами эксплуатации музейных помещений и содержания в них произведений искусства. На точность определения момента стабилизации поглощения СВЧ/КВЧ энергии электромагнитных волн нетепловой интенсивности, как, впрочем, и на точность определения самой величины влагосодержания в дисперсном материале влияет ряд факторов, связанных как с точностью измерения ослабления СВЧ/КВЧ сигнала, так и с особенностями исследуемого дисперсного материала.

Анализ последних исследований и публикаций

Остановимся вначале вкратце на методах контроля поглощения СВЧ энергии, которые используются в таких дисперсных материалах, как бетонная смесь. Так, для определения окончания процесса уплотнения бетонной смеси при формировании железобетонных изделий было предложено использовать метод поглощения СВЧ энергии радиоволн в работе [1]. Контроль за процессом уплотнения бетонной смеси данным способом основан на том, что поглощение энергии сверхвысокочастотных электромагнитных волн при прохождении их через дисперсные системы на основе

цементу визначається кількістю вільної води і удільною провідністю системи [2, 4]. Автор [3] обословив формулу для комплексної постійної розповсюдження електромагнітних хвиль в речовині, в частині, для немагнітних ізотропних діелектриків. В роботі [5] досліджені діелектричні явища і подвійний шар в дисперсних системах і поліелектролітах. Автори [6] розглянули діелектричні властивості води в розчинах. В [7] запропоновано метод неруйнівного контролю якості бетону за його електропровідності. Фактори, впливаючі на удільне омическе опір бетонного зразка, вивчені в [8]. Вимірювання вологості бетонної суміші і її складових вологомірами СВЧ виконано в [9]. В [10–12] описані радіоізмірювальні прилади, техніка надвисоких частот і, в частині, техніка СВЧ-вологімірії.

Результати цитованих вище робіт будуть частково використані в даному дослідженні, присвяченому моніторингу і контролю процесу вологопереносу в музейних експонатах/картинах методом поглинання СВЧ/КВЧ енергії електромагнітних хвиль нетеплової інтенсивності.

Ціль дослідження

Ціль роботи – створення і обґрунтування наукової концепції моніторингу і контролю процесу вологопереносу в музейних експонатах/картинах методом поглинання СВЧ/КВЧ енергії електромагнітних хвиль нетеплової інтенсивності, що дозволяє вибрати оптимальну робочу частоту генератора вказаних хвиль.

Изложение основного материала исследования

Розповсюдження електромагнітних хвиль (нетеплової інтенсивності) в речовині виражається через комплексну постійну розповсюдження [3]:

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (1)$$

де γ – комплексна постійна розповсюдження; α – коефіцієнт затухання; $j^2 = -1$; β – фазова постійна.

Для немагнітних ізотропних діелектриків α і β рівні:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{1}{2} \varepsilon' \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{1/2}; \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{1}{2} \varepsilon' \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} + 1 \right) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

де λ_0 – довжина хвилі в вільному просторі; ε' і ε'' – дійсна і мнимі частини комплексної відносної діелектричної проникності.

Використаємо результати робіт [2, 4], де показано, що на надвисоких частотах (і більше) діелектричні характеристики дисперсних систем в залежності від складу і температури з задовільною для практики точністю можуть бути розраховані за наступними формулами:

$$\varepsilon_p' \approx \left\{ \sum_{i=1}^n \sqrt{\varepsilon_i' \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\varepsilon_i''}{\varepsilon_i'} \right)^2 \right]} \cdot P_i \right\}^2 - \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i''}{2\sqrt{\varepsilon_i'}} \left[1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\varepsilon_i''}{\varepsilon_i'} \right)^2 \right] \cdot P_i \right\}^2 ; \quad (4)$$

$$\varepsilon_p'' \approx \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i''}{\sqrt{\varepsilon_i'}} \left[1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\varepsilon_i''}{\varepsilon_i'} \right)^2 \right] \cdot P_i \right\} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^n \sqrt{\varepsilon_i' \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\varepsilon_i''}{\varepsilon_i'} \right)^2 \right]} \cdot P_i \right\} ; \quad (5)$$

$$\varepsilon_c'' = \varepsilon_p'' + \varepsilon_\sigma'' ; \quad (6)$$

$$\varepsilon_\sigma'' = \frac{\sigma}{\omega_0 \varepsilon_0} , \quad (7)$$

где ε_p'' и ε_p' – расчётные значения действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости системы; ε_i' и ε_i'' – действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости i -ой компоненты; n – количество компонент; P_i – объёмное содержание i -ой компоненты; ε_c'' – мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости системы, обусловленная потерями на релаксацию и сквозную проводимость; ε_σ'' – мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости, обусловленная потерями на сквозную проводимость системы; σ – низкочастотная удельная проводимость системы, См/м; ω_0 – циклическая частота; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Причём низкочастотная удельная проводимость σ дисперсных материалов рассчитывается по формуле Бруггемана [5]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot P_0^{3/2} , \quad (8)$$

где σ_0 – удельная проводимость проводящей фазы системы, См/м; P_0 – объёмная концентрация проводящей фазы.

Таким образом, формулы (4)–(8) практически можно применять для расчёта диэлектрических характеристик дисперсных систем.

На выбор рабочей частоты СВЧ/КВЧ генератора оказывают влияние химический и минералогический состав красок, температура, гранулометрический состав наполнителей красок, погрешность измерительной аппаратуры и т.д.

Изменение химико-минералогического состава красок, нанесенных на полотно картины, влечёт за собой изменение удельной проводимости жидкой фазы красочного теста, а следовательно, и изменение коэффициента затухания (см. формулы (2), (6), (7), (8)). Как видно из формулы (7), влияние данного параметра ε_σ'' обратно пропорционально частоте. Для уменьшения влияния вариаций химико-минералогического состава красок частоту СВЧ/КВЧ генератора необходимо повышать. Кроме того, более высокую частоту следует выбирать потому, что изменение проводимости системы и перераспределение воды в дисперсном материале во времени будут сказываться на изменении α , а, значит, и на точности определения окончания процесса влагопереноса в дисперсном материале.

Изменение температуры оказывает влияние на релаксационные потери в дисперсном материале, которые определяются потерями в воде, и на потери, связанные со сквозной проводимостью системы. По данным [6], ε'' для воды в диапазоне температур от 10...20⁰С имеет отрицательный температурный коэффициент, приблизительно равный 0,02 на 1⁰С для $\lambda_0 = 3,28$ см и 0,032 на 1⁰С – для $\lambda_0 = 9,2$ см, т.е. с уменьшением частоты влияние температуры увеличивается. Таким образом, для дисперсного материала одного состава можно найти такую частоту, при которой коэффициент затухания α в рабочем диапазоне температур будет практически постоянен. При изменении состава или вида красок, нанесенных на полотно, частота температурной компенсации будет другой. Поэтому, если температура дисперсного материала в процессе мониторинга (контроля) за ним остаётся постоянной, то лучше повышать частоту СВЧ/КВЧ генератора.

Как и авторы [9] мы считаем, что отсутствует влияние гранулометрического и минералогического состава заполнителей дисперсного материала на поглощение СВЧ/КВЧ энергии ним, поэтому при выборе частоты СВЧ/КВЧ генератора влиянием гранулометрического состава заполнителей указанного материала можно пренебречь.

Для точного определения параметров поглощения СВЧ/КВЧ энергии нетепловой интенсивности дисперсными материалами необходимо фиксировать незначительные изменения ослабления СВЧ/КВЧ сигнала. Поэтому нужно иметь прибор, обладающий высокой точностью в широком диапазоне частот, и измерять величину ослабления сигнала в той области показаний прибора, где случайная относительная погрешность измерения минимальна. Данным требованиям, например, соответствует автоматический измеритель затухания типа ДІ-3 (ДІ-9), имеющий диапазон частот 0,25...16,5 ГГц, оптимальная область которого, выраженная в децибелах, составляет величину порядка 50дБ относительно 1мВт при случайной погрешности измерения 0,1 дБ [10].

Если проводимость и температура дисперсного материала в процессе влагопереноса не изменяются (например, для быстропротекающих процессов), то можно предложить следующий метод расчёта частоты СВЧ/КВЧ генератора.

Пусть нам нужно зондировать СВЧ/КВЧ сигналами нетепловой интенсивности дисперсный материал толщиной h , причём температура и состав его известны. Тогда, задаваясь оптимальной областью показаний прибора, выраженной в децибелах (обозначим эту область A_{opt}), и пренебрегая потерями на отражение от границ раздела воздух – дисперсный материал, дисперсный материал – воздух, найдём коэффициент затухания по формуле:

$$\alpha = \frac{A_{opt}}{8,686h} \text{ м}^{-1}. \quad (9)$$

Но α , как видно из формулы (2), зависит от диэлектрических характеристик дисперсного материала. Будем считать, что формулы (4)–(8) верны и для дисперсных материалов, являющихся холстом картины. Тогда, зная объёмные концентрации воды, красок, заполнителей и пр. и их диэлектрические характеристики, а также удельную проводимость теста красок σ_0 (например, из опыта) и подставляя эти значения в формулы (4)–(8), можно найти ε' и ε'' данного дисперсного материала, а по формуле (2) – величину коэффициента затухания, задавшись при этом определённым значением частоты. Варьируя последний показатель, можно подобрать такую частоту, при которой коэффициент затухания α по формуле (2), станет равным по величине α , полученному из формулы (9). Именно эта частота и является оптимальной рабочей частотой СВЧ/КВЧ генератора электромагнитных волн нетепловой интенсивности.

Потери на отражение от границ раздела воздух – дисперсный материал, дисперсный материал – воздух могут быть практически сведены к нулю путём применения четвертьволновых пластин из материала с диэлектрической проницаемостью, равной корню квадратному из показателя проницаемости исследуемой среды [3]. Диэлектрические характеристики воды для любой температуры и частоты можно найти по формулам, приведенным в работе [6]. Диэлектрические характеристики воздуха $\varepsilon' = 1$ и $\varepsilon'' = 0$. Значения диэлектрических характеристик остальных компонентов дисперсного материала могут быть рассчитаны по формулам (4), (5) на основании экспериментальных данных. Причём при расчёте рабочей частоты СВЧ/КВЧ генератора мнимой частью диэлектрической проницаемости данных компонент можно пренебречь ввиду их малости.

При расчёте α по формуле (9) не учитывались, как величина мощности СВЧ/КВЧ генератора, так и ослабление электромагнитного поля СВЧ/КВЧ, связанное с диаграммой направленности антенн и расстоянием между ними. Для этого необходимо к $A_{\text{опт}}$ прибавить величину мощности генератора, выраженную в децибелах относительно уровня 1 мВт, и отнять потери (в децибелах), связанные с диаграммой направленности антенн.

Данный метод расчёта при небольшой модификации был использован нами для расчёта оптимальных размеров измерительных ячеек при исследовании диэлектрических дисперсных систем (холстов картин художников), причём рассчитанные и экспериментальные значения α для указанных дисперсных материалов на частотах 9,24 ГГц (СВЧ – диапазон) и 56 ГГц (КВЧ - диапазон) отличались не более чем на 10...15%.

Выводы

1. Для мониторинга и контроля процессов влагопереноса в экспонатах, помещённых в музеях (например, в картинах художников – мастеров прошлых веков, в гобеленах, в скульптурах и пр.) предложено использовать метод поглощения энергии электромагнитных волн (СВЧ – радиочастотного диапазона и КВЧ – диапазона миллиметровых волн) нетепловой интенсивности.
2. Контроль за процессом влагопереноса в музейных экспонатах данным способом основан на том, что поглощение энергии СВЧ/КВЧ – электромагнитных волн нетепловой интенсивности при их прохождении через дисперсные системы (именно таковой представляется полотно художественной картины, краски, нанесенные на него, защитные слои (полировка) и пр.) определяется количеством свободной воды и удельной проводимостью исследуемого объекта.
3. При экспонировании художественных полотен в помещениях музея (картинных галереях) объёмное содержание воды в системе и её удельная проводимость увеличиваются, достигая порою таких значений, при которых может быть нарушена целостность полотна (ткани полотна), появляются трещины, изгибы полотна, что, в конечном счёте, ведёт к его разрушению с течением времени. При этом СВЧ/КВЧ – электромагнитные волны имеют нетепловую интенсивность именно для того, чтобы зондирующий картину/экспонат (электромагнитный) сигнал как падающий, так и отражённый, не создавал её/его повреждение при поглощении в тонком поверхностном слое.
4. Дополнительный влагоперенос внутрь экспонатов музея вызван наличием в музейном помещении (картинной галерее) потока посетителей, особенно в те дни, когда проводятся выставки. Если имеется стабилизация поглощения СВЧ/КВЧ энергии, которую можно получить с помощью специальных систем контроля микроклимата музейных помещений, тогда процесс разрушения полотен/экспонатов можно приостановить (или, по крайней мере, существенно уменьшить).
5. На точность определения параметров поглощаемой СВЧ/КВЧ энергии данным методом существенно влияет ряд факторов (в частности, рабочая частота генератора электромагнитных волн, точность её настройки, ширина частотного диапазона

излучения и пр.), которые связаны как с точностью измерения ослабления СВЧ/КВЧ сигнала (методом СВЧ/КВЧ – рефлектометрии), так и с особенностями исследуемого экспоната/картины.

6. Полученные в работе результаты могут быть в дальнейшем использованы для уточнения и совершенствования существующих инженерных методов расчёта систем контроля микроклимата музейных помещений, в которых экспонируются картины художников и другие произведения искусства.

Список использованной литературы

1. Атаев С.С. Об автоматизации контроля уплотнения бетонной смеси / С.С. Атаев, Н.П. Блещик, И.И. Монастырный // Бетон и железобетон. – 1972. – №12. – С. 12-18.
2. Михалевич А.А. Диэлектрические свойства цементного теста / А.А. Михалевич, Н.К. Кобляков // Тезисы сообщений к Всесоюзной конференции "Повышение эффективности и качества бетона и железобетона". – Минск, 1977. – Ч.1. – С. 45-56.
3. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны / А.Р. Хиппель. – М.: ИЛ, 1960. – 439 с.
4. Михалевич А.А. Диэлектрические характеристики цементно-песчаных растворов на сверхвысоких частотах / А.А. Михалевич, Н.К. Кобляков // Вопросы строительства и архитектуры. – Минск, 1979. – № 9. – С. 33-37.
5. Духин С.С. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах / С.С. Духин, В.Н. Шилов. – Киев: Наукова думка, 1972. – 206 с.
6. Hasted J.V. The dielectric properties of water in solutions / J.V. Hasted, S.H.M. El Sabeh // Frans. Faraday Soc. – 1953. – Vol. 49. – № 369. – P.109-123.
7. Ахвердов И.Н. Неразрушающий контроль качества бетона по электропроводности / И.Н. Ахвердов, Л.Н. Маргулис. – Минск: Наука и техника, 1975. – 174 с.
8. Малинин Ю.С. Исследование факторов, влияющих на удельное омическое сопротивление цементного теста / Ю.С. Малинин, С.Е. Ленский // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института цементной промышленности. – 1967. – №2. – С. 116-124.
9. Берлинер М.А. Измерение влажности бетонной смеси и её компонентов влагомерами СВЧ / М.А. Берлинер, В.А. Иванов, В.А. Клоков // Бетон и железобетон. – 1969. – №2. – С. 8-15.
10. Гаврилов Ю.С. Справочник по радиоизмерительным приборам / Ю.С. Гаврилов, А.А. Ерёмченко, Л.Ю. Зубилевич и др. – М.: Энергия, 1976. – 624 с.
11. Бензарь В.К. Техника СВЧ-влагометрии / В.К. Бензарь. – Минск: ВШ, 1974. – 349 с.
12. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот / А.Ф. Харвей. – М.: Советское радио, 1965. – Т. 1. – 784 с.

References

1. Ataev, S. S., Bleschik, N. P., Monastyrnyiy, I. I. Ob avtomatizatsii kontrolya uplotneniya betonnoy smesi. Beton i zhelezobeton. **12**, 12-18. (1972)
2. Mihalevich, A. A., Koblyakov, N. K. Dielektricheskie svoystva tsementnogo testa. Tezisy i soobscheniy k Vsesoyuznoy konferentsii "Povyishenie effektivnosti i kachestva betona i zhelezobetona". Part. I. Minsk. (1977)
3. Hippel, A. R. Dielektriki i volnyi. IL. Moscow. (1960)
4. Mihalevich, A. A., Koblyakov, N. K. Dielektricheskie harakteristiki tsementno-peschanyih rastvorov na sverhvyisokih chastotah. Voprosyi stroitelstva i arhitekturyi. **9**, 33-37. (1979)
5. Duhin, S. S., Shilov, V. N. Dielektricheskie yavleniya i dvoynoy sloy v dispersnyih sistemah i polielektrolitah. Naukova dumka. Kiev. (1972)
6. Hasted, J. V., El Sabeh, S. H. M. The dielectric properties of water in solutions. Frans. Faraday Soc. **49**, 369, 109-123. (1953)

7. Ahverdov, I. N., Margulis, L. N. Nerazrushayuschiy kontrol kachestva betona po elektroprovodnosti. Nauka i tehnika. Minsk. (1975)
8. Malinin, Yu. S., Lenskiy, S. E. Issledovanie faktorov, vliyayuschih na udelnoe omicheskoe soprotivlenie tsementnogo testa. Trudyi Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta tsementnoy promyishlennosti. **2**, 116-124. (1967)
9. Berliner, M. A., Ivanov, V. A., Klokov, V. A. Izmerenie vlazhnosti betonnoy smesi i eygo komponentov vlagomerami SVCh. Beton i zhelezobeton. **2**, 8-15. (1969)
10. Gavrilov, Yu. S., Eryomenko, A. A., Zubilevich L. Yu. i dr. Spravochnik po radioizmeritelnyim priboram. Energiya. Moscow. (1976)
11. Benzar, V. K. Tehnika SVCh-vlagometrii. VSh. Minsk. (1974)
12. Harvey, A. F. Tehnika sverhvyisokih chastot. V. 1. Sovetskoe radio. Moscow. (1965)

УДК 656.11:658.012

А.Н. КЛИМОВИЧ, В.Н. ШУТЬ
Брестский государственный технический университет

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТКОМ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ НАСТРОЙКИ ДОРОЖНОЙ РАЗМЕТКИ

Методы управления транспортными потоками имеют ряд недостатков. Предлагается адаптивный метод на основе поэтапной настройки использования переменных схем разметки дороги, входящей в перекресток, с помощью управляемых знаков, что значительно повышает пропускную способность перекрестка, снижает задержку транспорта на светофорных объектах. В работе предложено формульное описание разметки и проведена классификация разметок.

Ключевые слова: адаптивное управление, дорожная разметка, формульная запись разметки, детекторы транспорта, транспортная система, светофорный объект, конкурирующий транспортный поток, пропускная способность полосы движения

A. KLIMOVICH, V. SHUTS
Brest State Technical University

ADAPTIVE ALGORITHM OF ROAD-CROSSING REGULATION ON THE BASIS OF ADJUSTMENT OPTIMIZATION OF ROAD MARKING

The task of traffic regulation in the city remains relevant for many years. Crossroads are places where traffic jams are formed, there is a pollution of exhaust gases and the emergency danger increases. The stochastic nature of the change in the intensities of traffic flows approaching to the intersection from different directions makes difficult the task of the efficient intersection management. Most research in the field of traffic management in the road network is focused on improving management through traffic signal regulation. In this case control actions are changes in such parameters as the duration of the traffic light cycle, the number of traffic lights and their order. Often this set of changes in the parameters of a traffic light object is not enough, and the traffic jam at the intersection keeps growing.

Traffic load image can significantly change during the day, which leads to inefficient use of the bands, some of which can be overloaded, and some can be idle, although its capacity can be used for traffic in the other direction. The paper suggests a method for increasing the throughput of a crossroads by introducing dynamic road markings. We introduce a classification and numerical description for different types of markup. This description represents the throughput in different directions for a given type of markup. Here we give an example of all possible types of marking for a two-lane entrance to the intersection. We propose a method for selecting a specific type of markup depending on the current state of traffic flows. Intersections should be equipped with electronic displays showing the current state of marking, which is determined by dividing the lanes into a direct and opposite direction, as well as by the permitted directions for each lane. The type of markup is selected by the controller installed at the intersection and acting on the basis of the vehicle counting sensors located along the perimeter. The proposed method of organizing traffic allows to increase the throughput of intersections and the transport network in general, to reduce the number of traffic jams and the resulting pollution.

Keywords: adaptive management, road markings, formulaic entry markup, detectors of transport, transport system, traffic light, competing traffic, the throughput of the lanes.

Постановка проблеми

Современное дорожное движение является сложной динамической системой взаимного влияния людей, транспортных средств и элементов дорожной инфраструктуры. Обеспечение быстрого и безопасного движения в таких условиях требует применения комплекса организационных и архитектурно-планировочных мероприятий по обустройству автомобильных дорог, а также применения современных технических средств организации дорожного движения на базе информационных технологий.

При этом имеющийся в настоящее время опыт применения технических средств рассматривает отдельные транспортные средства и не учитывает взаимосвязи между разнородными компонентами дорожного движения [1–2], что делает актуальным разработку новых средств автоматизации дорожного движения (особенно в рамках перекрестков), позволяющих осуществлять комплексное регулирование, исходя из постоянно меняющихся дорожных условий. Несоответствие сложившейся улично-дорожной сети крупных городов условиям насыщенных и перенасыщенных транспортных потоков усложняет движение на регулируемых узлах. Такая ситуация требует переосмысления теории и практики управления уличным движением и применения современных средств и методов управления.

Анализ последних исследований и публикаций

При исследовании заторов, а также при проектировании новых систем управления транспортом особое внимание следует уделять такому элементу дорожного регулирования как перекресток. Перекресток является местом пересечения нескольких путей. Наиболее распространенный перекресток X-образный является местом пересечения двух путей. Здесь наблюдается снижение пропускной способности пути, т.к. часть времени на движение должна быть передана пересекающему (конкурирующему) потоку. Светофорный объект на перекрестке выполняет функцию коммутирующего устройства, предоставляющего поочередное право на движение через перекресток автотранспортным средствам (АТС) с конкурирующих направлений.

Стохастический характер изменения интенсивностей АТС, подъезжающих к перекрестку с различных направлений, делает задачу удовлетворительного, адекватного управления перекрестком трудно выполнимой. Все исследования в области управления транспортными потоками в улично-дорожной сети (УДС) сосредоточены на улучшение управления в узловых точках УДС, посредством светофорного регулирования [3], т.е. идет разрешение ситуации, уже сложившейся на перекрестке и, зачастую, весьма неблагоприятной, с большим числом АТС, остановившихся перед светофором. Управляющими воздействиями в таком случае являются изменения длительности светофорного цикла, такта, число светофорных фаз и их порядка следования [4–5]. Часто этого набора изменений параметров светофорного объекта (СФО) недостаточно, и "пробка" на перекрестке разрастается.

Отказ функционирования транспортной системы наступает в результате заторов на транспортной сети. Появление заторов, когда имеется запас пропускной способности сети, объясняется не только не оптимальностью работы светофорной сигнализации, но и её недостаточностью. Дополнением к регулированию дорожного движения на перекрестке посредством СФО должно стать адаптивное изменение дорожной разметки.

Цель исследования

Разработать адаптивный метод управления транспортными потоками на основе поэтапной настройки использования переменных схем разметки дороги, входящей в перекресток, с помощью управляемых знаков.

Изложение основного материала исследования

Интенсивность движения в городе в течение суток, недели и года меняется в значительных пределах. На изменение интенсивности движения влияют также ДТП (дорожно-транспортное происшествие), закрытие улиц, ремонт проезжей части и другие временные факторы. Поэтому возможно значительное изменение соотношения интенсивности движения по направлениям. Чтобы учесть неравномерность движения, необходима гибкая система, которая позволяет менять направления движения по полосам, например, увеличения интенсивности движения налево требует увеличение количества полос в данном направлении. Система в этом случае с помощью управляемых знаков меняет направление движения по одной из полос и движение налево переходит в режим двухполосного или одна полоса используется для движения прямо и налево.

Возможность использования переменных схем с помощью управляемых знаков и оперативного управления значительно повышает пропускную способность УДС и снижает задержку транспорта, поэтому требует широкого использования в городских транспортных системах.

Постановка задачи. Существующая дорожная разметка имеет ряд недостатков, которые можно свести в две группы:

- недостатки для водителей;
- недостатки для ГИБДД и коммунальных служб.

К основным проблемам, с которыми сталкиваются водители в процессе движения по дорогам со стандартной разметкой, следует назвать ее константность (неизменность).

При движении по перегону к очередному перекрестку водителю неизвестна разметка на этом перекрестке вплоть до момента приезда на него. При этом, в случае, если водитель не был осведомлен о том, что в рамках конкретного перекрестка запрещен поворот в определенном направлении, то возможно ему придется преодолеть дополнительное расстояние до следующего перекрестка, что несет дополнительные временные и материальные затраты.

В рамках второй группы недостатков следует отметить повышенную опасность возникновения дорожно-транспортных происшествий. Так, при движении в потоке (пачке) и приближению к перекрестку водители транспортных средств начинают массово перестраиваться для того, чтобы с минимальными затратами продолжить движение и поддерживать выбранный маршрут. В случае если последующая разметка сильно отличается от предыдущей, или автомобиль меняет направление движения, а также в случае невнимательного отношения водителей к предупреждающим знакам и резкого перестроения, зачастую происходят дорожно-транспортные происшествия (ДТП).

Кроме того, в процессе эксплуатации возникают вопросы о долговечности стандартной разметки. Так, пункт 5.1.10 СТБ 1231-2000 "Разметка дорожная: общие технические условия" утверждает, что: дорожная разметка, выполненная термопластичными, холодными пластиками или другими подобными материалами, должна обладать функциональной долговечностью не менее 1 года, а красками и эмалями – не менее 6 мес. [6].

Однако больший срок не устанавливается, так же как и не устанавливается максимальный срок эксплуатации, что приводит к местам в черте городов, где разметка практически не видна или вовсе отсутствует. Данный недостаток, кроме того, затрагивает и водителей, которые, ничего не подозревая, могут нарушать правила дорожного движения.

Таким образом, наличие ряда недостатков, сдерживающих эффективное осуществление движения транспортных средств по дорогам городов, обуславливает необходимость внедрения новых средств регулирования и контроля. В работе предлагается на перегонах между перекрестками устанавливать электронные табло,

которые будут подбирать разметку под движущиеся в потоке транспортные средства и при необходимости с минимальными перестроениями корректировать движение автомобилей в рамках требуемых полос. При этом водители заранее оповещены о форме разметки на предстоящем по ходу движения перекрестке, так как электронное табло устанавливается на расстоянии $\frac{3}{4}$ от предстоящего по ходу движения перекрестка и у водителей достаточно времени для нужного им перестроения.

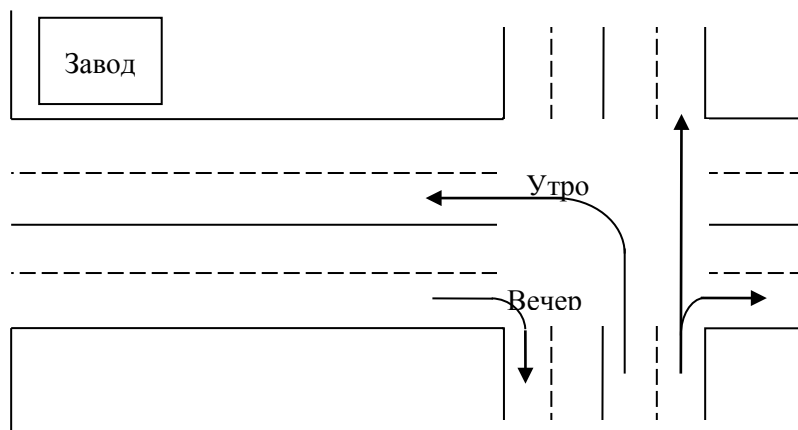


Рис. 1 . Фрагмент УДС.

На рис. 1 и 2 приведен пример, демонстрирующий изменяющуюся разметку в течении дня в зависимости от структуры транспортных потоков в утренние и вечерние часы. На рис.1 изображен фрагмент УДС с явным центром тяготения (завод). В утренние часы АТС с магистрали съезжают на перекрестке налево, чтобы двигаться к заводу. Для утра необходима разметка, изображенная на рис 2а), или б). Причем разметка 2б может пропустить больше левоповоротных автомобилей. В то время как разметка 2в) характерна для вечера. Индикатором смены разметки является информация с детекторов транспорта, расположенных по каждой полосе движения. Например, появление очереди на левоповоротной полосе движения перед перекрестком, зафиксированное детекторами транспорта, будет сигналом для системы управления о смене разметки и увеличения числа полос для этой категории транспорта.

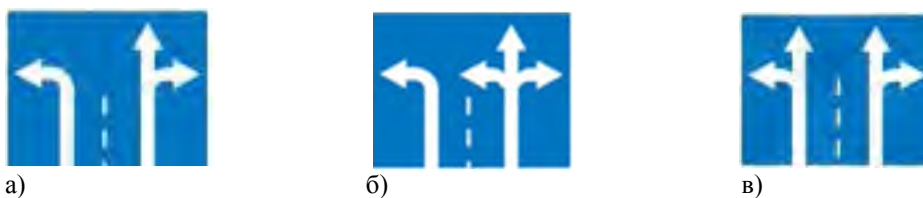


Рис.2. Варианты разметки для представленного фрагмента УДС.

Формульная запись разметки. Для того чтобы эффективно управлять электронным табло переменной разметки, а, следовательно, и перекрестком, необходимо иметь базу данных по всем возможным разметкам. Разметка делается для всех полос одного направления дороги (дорога разделена сплошной линией на прямое и встречное направление). Каждое направление разделено прерывистой линией на полосы движения с нумерацией $i = \overline{1; m}$, начинающейся от правого края бордюра каждого направления дороги. Разметка i -ой полосы это вектор \vec{P}_{ij} , указывающий на одно из трех направлений $j = \overline{1; 3}$ движения транспорта с i -ой полосы перекрестка: направо 1, прямо 2 и налево 3.

Так вектор \vec{P}_{11} указує на рух з першої смуги направо, а вектор \vec{P}_{12} на рух по першій смузі прямо, вектор \vec{P}_{23} указує на поворот з другої смуги наліво. Таким чином, вектор \vec{P}_{ij} розмітки відображає можливість руху в тому або іншому напрямку з кожної з смуг. Розметка для одного напрямку дороги це сукупність \vec{P} векторів \vec{P}_{ij} :

$$\vec{P} = \vec{P}_{11} + \vec{P}_{12} + \dots + \vec{P}_{ij} + \dots + \vec{P}_{m3}, \quad (1)$$

де m – число смуг одного напрямку дороги, $i = \overline{1; m}$, $j = \overline{1; 3}$. Тут знак "+" означає не арифметичне сумування, а об'єднання елементів.

На рис. 3а зображено перехресток з розміткою дороги для прямого напрямку руху. На рис. 3б зображено дорожній знак цієї розмітки з формульною його записом. Розставимо дужки в формульній записі цього знака наступним чином: $\vec{P} = (\vec{P}_{11} + \vec{P}_{12}) + (\vec{P}_{22} + \vec{P}_{23})$. Тоді сукупність векторів в кожній дужці стосується до однієї смуги руху. Це буде формульним описом окремої смуги руху, тобто, таким чином, в кожній дужці перерахована сукупність векторів, або інакше, напрямків руху з конкретної смуги. Формули розмітки з групуванням по смузі розташовані в першому стовпці табл. 1.

Можливий варіант групування по напрямку. Якщо при групуванні по смузі визначальним був перший індекс (номер смуги), то при групуванні по напрямку визначальним є другий індекс вектора (напрямок руху). Розставимо дужки в попередньому прикладі наступним чином: $\vec{P} = \vec{P}_{11} + (\vec{P}_{12} + \vec{P}_{22}) + \vec{P}_{23}$. Запис розміток при групуванні по напрямку занесемо в третій стовпець табл. 1.

Тут уже можливі перетворення в вигляді сумування векторів. Вектори \vec{P}_{12} і \vec{P}_{22} мають одне напрямлення 2 (прямо). Замінемо вираження в дужках на узагальнений вектор напрямлення прямо \vec{P}_2 . Також замінемо вектори \vec{P}_{11} , \vec{P}_{23} на \vec{P}_1 , \vec{P}_3 . Тоді отримаємо $\vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3$. Позначимо через p пропускну здатність однієї смуги руху (кількість автомобілів, що проходять через поперечне переріз смуги за одиницю часу, авт./хв.). Тоді модулі векторів $|\vec{P}_1|$, $|\vec{P}_2|$, $|\vec{P}_3|$ розподіляться наступним чином $0.5p$, p і $0.5p$ (див. рис. 3). Коефіцієнт 0.5 вказує на те, що напрямку 1 (направо), а також напрямку 3 (наліво), в даній розмітці виділено 0.5 смуги. В той же час напрямку 2 (прямо) виділена ціла смуга.

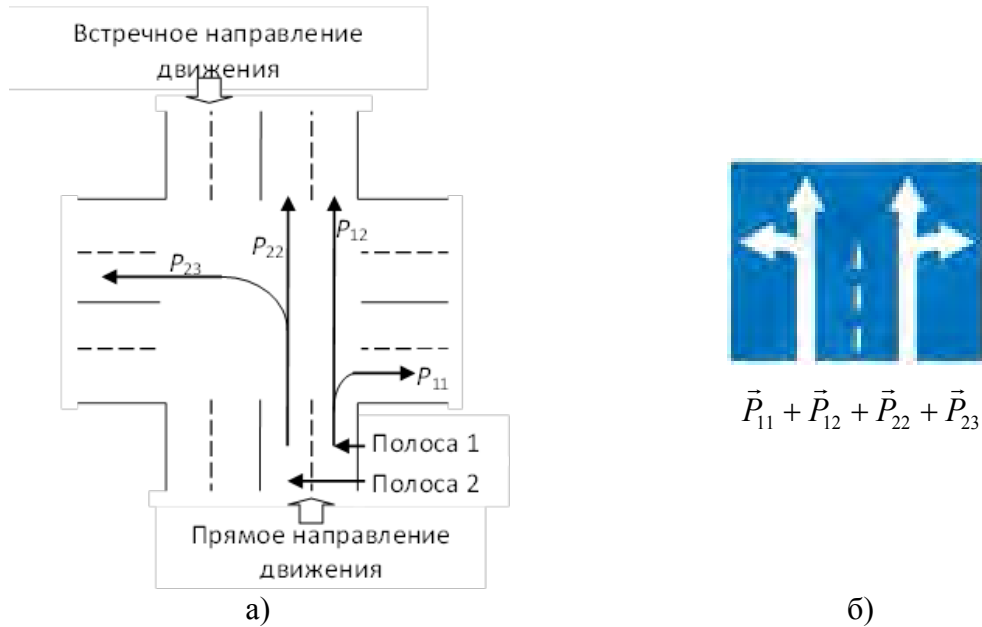


Рис. 3. Пример двухполосного перекрестка и соответствующего ему знака и формульной записи.

Составим упорядоченную тройку из пропускных способностей каждого направления $(|\vec{P}_1|, |\vec{P}_2|, |\vec{P}_3|)$ или $(0.5p, p, 0.5p)$. Выполним нормирование тройки путем деления каждого её элемента на $|\vec{P}| = 2p$ (пропускная способность всего направления движения по всем её двум полосам). Тогда получим $(|\vec{P}_1|/|\vec{P}|, |\vec{P}_2|/|\vec{P}|, |\vec{P}_3|/|\vec{P}|)$ или $(0.5p/2p, p/2p, 0.5p/2p)$, или $(0.25, 0.5, 0.25)$. Упорядоченная тройка $(0.25, 0.5, 0.25)$ является числовой характеристикой конкретной, данной разметки. Каждая координата тройки (w_1, w_2, w_3) указывает на долю w_j , $j = \overline{1;3}$, которую составляет конкретное направление (направо, прямо, налево) в общей пропускной способности всего направления движения. Все тройки внесем в четвертый столбец табл. 1.

Следует отметить, что запись по направлению более информативна, так как позволяет оценить ресурс, выделяемый данной разметкой на то, или иное направление движения. Полученные числовые характеристики можно использовать для адаптивного управления путем подбора наиболее близкой разметки для приближающегося к перекрестку потока АТС (пачки АТС). Структура пачки (под структурой понимается соотношение числа авто, разъезжающих на перекрестке направо, прямо и налево) должна совпадать или быть наиболее близкой к структуре разметки.

К перекрестку приближается пачка \vec{X} АТС из n автомобилей $\vec{X} = \vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3$, где $|\vec{X}_1| = n_1$ число авто, которые поедут направо, $|\vec{X}_2| = n_2$ число авто прямо и $|\vec{X}_3| = n_3$ – налево. Составим целевую функцию ситуации от параметра разметки \vec{P} :

$$\min F(\vec{P}) = \|\vec{X} - \vec{P}\| = \|\vec{X}_1 - \vec{P}_1\| + \|\vec{X}_2 - \vec{P}_2\| + \|\vec{X}_3 - \vec{P}_3\| \quad (2)$$

Перейдем к следующей целевой функции от параметра \vec{P} :

$$\min Z(\vec{P}) = \left| \frac{n_1}{n} - \frac{|\vec{P}_1|}{|\vec{P}|} \right| + \left| \frac{n_2}{n} - \frac{|\vec{P}_2|}{|\vec{P}|} \right| + \left| \frac{n_3}{n} - \frac{|\vec{P}_3|}{|\vec{P}|} \right| \quad (3)$$

Минимум целевой функции $Z(\vec{P})$ является минимумом и для функции $F(\vec{P})$, то есть обе функции достигают минимума при одном параметре \vec{P} . Преобразуем выражение (3):

$$\min Z(\vec{P}) = \left| \frac{n_1}{n} - w_1 \right| + \left| \frac{n_2}{n} - w_2 \right| + \left| \frac{n_3}{n} - w_3 \right| \quad (4)$$

Выражение (4) является универсальным инструментом для адаптивного подбора соответствующей разметки под входящим в перекресток транспортный поток. То есть, из всех разметок \vec{P} табл. 1 берется разметка \vec{P}^* , при которой достигается минимум функции $Z(\vec{P})$. Она обеспечивает наиболее быстрый разезд АТС на перекрестке.

Классификация разметок. Составим все возможные разметки для двухполосного входа в перекресток. Число таких разметок составит 17. Все полученные разметки можно классифицировать в три группы (табл. 1): актуальные, форс-мажорные, неактуальные.

К актуальным относятся те разметки, которые используют все три выхода с перекрестка. Это рабочие разметки, которые постоянно в процессе управления перекрестком используются. Частота использования их разная и зависит от структуры транспортных потоков, пересекающих перекресток (здесь под структурой транспортного потока понимается соотношение транспортных средств поворачивающих направо, прямо и налево), то есть конкретному пересекающему перекресток транспортному потоку на электронном табло установлена наиболее близкая ему разметка. «Наиболее близкая» означает, что из всего набора разметок только при этой разметке перекресток покинут все авто за минимальное время.










Форс-мажорные разметки используют только два выхода с перекрестка из трех возможных. Данной разметкой один выход с перекрестка закрыт. Эта группа разметок используется не так часто. Только в случае ДТП или при проведении ремонтных работ, чтобы закрыть проезд по улице, относящейся к данному выходу с перекрестка.

Неактуальная разметка имеет только один выход с перекрестка. Эта группа разметок практически не используется. В табл. 1 разметки расположены в порядке уменьшения частоты использования.

Исходя из движущегося к перекрестку в конкретный (текущий) момент времени потока АТС с характеристиками $\vec{X}(n_1, n_2, n_3)$ находится вектор (разметка) \vec{P} путем перебора по табл. 1, чтобы свести к минимуму функцию $Z(\vec{P})$ на основании выражения (4). Перебор делается по числовым характеристикам вектора $\vec{P}(w_1, w_2, w_3)$. Таким образом осуществляется адаптивный подбор наиболее близкой к потоку разметки, которая постоянно сменяется на электронном табло.

Таблица 1

Формулы двухполосных разметок

№	Формула разметки с группировкой по полосе движения	Формула разметки с группировкой по направлению движения	Числовая характеристика разметки (w_1, w_2, w_3)	Дорожный знак
1	2	3	4	5
1	$(P_{11}+P_{12})+(P_{22}+P_{23})$	$P_{11}+(P_{12}+P_{22})+P_{23}$	(0,25 , 0,5 , 0,25)	
2	$(P_{11}+P_{12}+P_{13})+P_{23}$	$P_{11}+P_{12}+(P_{13}+P_{23})$	(0,16 , 0,16 , 0,66)	
3	$P_{11}+(P_{21}+P_{22}+P_{23})$	$(P_{11}+P_{21})+P_{22}+P_{23}$	(0,66 , 0,16 , 0,16)	
4	$(P_{11}+P_{12})+P_{23}$	$P_{11}+P_{12}+P_{23}$	(0,25 , 0,25 , 0,5)	
5	$P_{11}+(P_{22}+P_{23})$	$P_{11}+P_{22}+P_{23}$	(0,5 , 0,25 , 0,25)	
6	$(P_{11}+P_{12})+P_{22}$	$P_{11}+(P_{12}+P_{22})$	(0,25 , 0,75 , 0)	
7	$P_{12}+(P_{22}+P_{23})$	$(P_{12}+P_{22})+P_{23}$	(0 , 0,75 , 0,25)	
8	$(P_{12}+P_{13})+P_{23}$	$P_{12}+(P_{13}+P_{23})$	(0 , 0,25 , 0,75)	
9	$P_{11}+(P_{21}+P_{22})$	$(P_{11}+P_{21})+P_{22}$	(0,75, 0,25, 0)	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
10	$P_{11}+(P_{21}+P_{23})$	$(P_{11}+P_{21})+P_{23}$	(0,75 , 0 , 0,25)	
11	$(P_{11}+P_{13})+P_{23}$	$P_{11}+(P_{13}+P_{23})$	(0,25 , 0 , 0,75)	
12	$P_{11}+P_{23}$	$P_{11}+P_{23}$	(0,5 , 0 , 0,5)	
13	$P_{11}+P_{22}$	$P_{11}+P_{22}$	(0,5 , 0,5 , 0)	
14	$P_{12}+P_{23}$	$P_{12}+P_{23}$	(0 , 0,5 , 0,5)	
15	$P_{13}+P_{23}$	$(P_{13}+P_{23})$	(0 , 0 , 1)	
16	$P_{11}+P_{21}$	$(P_{11}+P_{21})$	(1 , 0 , 0)	
17	$P_{12}+P_{22}$	$(P_{12}+P_{22})$	(0 , 1 , 0)	

Выводы

Предложенный адаптивный метод на основе поэтапной настройки использования переменных схем разметки дороги, входящей в перекресток, с помощью управляемых знаков, позволяет значительно повысить пропускную способность перекрестка и снизить задержку транспорта на светофорных объектах.

Список использованной литературы

1. Врубель Ю.А. Характеристики дорожного движения: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-44 01 02 "Организация дорожного движения" / Ю.А. Врубель. — Минск.: БНТУ, 2007. — 268 с.
2. Маркелов В.М. Интеллектуальные транспортные системы как инструмент управления / В.М. Маркелов, И.В. Соловьев, В.Я. Цветков // Государственный Советник. — 2014. — №3. — С. 42-49.

3. Кременец Ю.А. Технические средства регулирования дорожного движения / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский. — М.: Транспорт, 1981. — С. 84-116.
4. Анфилец С.В. Адаптивный алгоритм управления на основе поэтапной настройки светофорных объектов по магистрали / С.В. Анфилец, В.Н. Шуть // Доклады БГУИР. — 2011. — № 6 (60). — С. 79-84.
5. Шуть В.Н. Адаптивное управление транспортными потоками в улично-дорожной сети города / В.Н. Шуть — Брест: Издательство БрГТУ, 2015. — 188 с.
6. Anfilets S.V. Shut Evaluating the Effectiveness of the Adaptive Control System in Brest Region / S.V. Anfilets // International Congress of Heavy Vehicles, Road Trains and Urban Transport. — Minsk, 2010. — P. 222–226.
7. Разметка дорожная. Общие технические условия: СТБ 1231-2000. — Введ. 01.01.06. — Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2006. —82 с.

References

1. Vrubel, Yu. A. Harakteristiki dorozhnogo dvizheniya: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov specialnosti 1-44 01 02 "Organizaciya dorozhnogo dvizheniya". BNTU. Minsk. (2007)
2. Markelov, V. M., Solovev, I. V., Cvetkov, V. Ya. Intellektualnye transportnye sistemy kak instrument upravleniya. Gosudarstvennyy Sovetnik. **3**, 42-49. (2014)
3. Kremenec, Yu. A., Pecherskiy, M. P. Tehnicheskie sredstva regulirovaniya dorozhnogo dvizheniya. Transport. Moscow. (1981)
4. Anfilec, S. V., Shut, V. N. Adaptivnyy algoritm upravleniya na osnove poetapnoy nastroyki svetofornyh obektov po magistrali. Doklady BGUIR. **6** (60), 79-84. (2011)
5. Shut, V. N. Adaptivnoe upravlenie transportnymi potokami v ulichno-dorozhnoy seti goroda. Izdatelstvo BrGTU. Brest. (2015)
6. Anfilets, S. V. Shut Evaluating the Effectiveness of the Adaptive Control System in Brest Region. International Congress of Heavy Vehicles, Road Trains and Urban Transport. Minsk. (2010).
7. Razmetka dorozhnaya. Obschie tehnicheckie usloviya: STB 1231-2000. — Vved. 01.01.06. Belarus. gos. in-t standartizacii i sertifikacii. Minsk. (2006)

УДК 004.942: 004.715

А.М. ХОШАБА

Винницький національний технічний університет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРУЗОЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В работе рассматриваются важные вопросы производительности вычислительных систем как: цели и задачи, общая модель производительности, фундаментальные проблемы определения оценок производительности. Названы понятия и наиболее часто встречаемые причины возникновения утечки производительности процессора и памяти. Сформулирована постановка задачи исследования производительности вычислительных систем в результате использования веб-сервисов, приведены примеры скриптов нагрузочного воздействия, наведена их характеристика и особенности работы. Приведен пример рекомендаций по созданию сценариев воздействия на веб-сервис. Показано расчет оценок производительности сценария воздействия на веб-сервис, наведен график выполнения работы сценария.

Ключевые слова: производительность вычислительных систем, нагрузочное воздействие, бенчмарки, веб-сервисы.

О.М. ХОШАБА

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ ВПЛИВІВ І ВІДНОВЛЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

У роботі розглядаються важливі питання продуктивності обчислювальних систем як: цілі та завдання, загальна модель продуктивності, фундаментальні проблеми визначення оцінок продуктивності. Названі поняття і причини виникнення витоків продуктивності процесора та пам'яті що найбільш часто зустрічаються на практиці. Сформульовано постановку задачі дослідження продуктивності обчислювальних систем в результаті використання веб-сервісів, наведені приклади скриптів навантажувального впливу, наведена їх характеристика та особливості роботи. Наведено приклад рекомендацій по створенню сценаріїв впливу на веб-сервіс. Показано розрахунок оцінок продуктивності сценарію впливу на веб-сервіс, наведений графік виконання роботи сценарію впливу.

Ключові слова: продуктивність обчислювальних систем, навантажувальний вплив, бенчмарки, веб-сервіси.

O.M. KHOSHABA

Vinnitsia National Technical University

INVESTIGATION OF PROCESSES OF LOADING EFFECTS AND RECOVERY OF COMPUTER SYSTEMS PERFORMANCE

In the article important issues of the performance of computing systems are considered such as: goals and tasks, a general performance model, fundamental problems in determining performance estimates. The concepts and the most common reasons for a processor and memory leak are identified. The statement of a research problem for processor and memory perform leak as a result of uses web services is formulated, examples of scripts of loading influence are

resulted, their characteristic and features of work are directed. An example of recommendations for creating scenarios of the impact on a web service is given. The calculation of the performance evaluations of the impact scenario on the web service is shown, the schedule for the performance of the script is plotted. An important part for study of the performance of computing systems was the development of benchmarks. The main lacks of existing benchmarks include the absence of: load and recovery models, their combined impact, distributed sources of impact. To study the performance of of computing systems in most cases create exposure scenarios. Such scenarios by the type of impact can have different dynamic (velocity) estimates and have different mathematical models. The study of the performance of computer systems using the example of a web service was performed in the operating system Linux Centos 7.0, kernel 3.10, the processor Intel Core i7-3667U, 2.0GHz, with 8 GB of RAM. The software was an apache web server. The load was effected using the httpperf utility, performance monitoring was sar, iostat, vmstat. Estimates of the performance of the exposure scenario were verified using mathematical modeling in the SciLab environment using special scripts. Also, the task of researching the performance of computing systems on the example of using web services is formulated, examples of stress loading scripts are given, their characteristics and work features are indicated. Particular importance is given to the model of impact formation. An example of recommendations for creating scenarios of the impact on a web service is given.

Keywords: computer system performance, benchmarks, web services, sar, iostat, vmstat, SciLab.

Постановка проблеми

Основой производительности вычислительных систем (ВС) является моделирование нагрузочных воздействий (НВ) и восстановлений [1]. Производительность ВС может рассматриваться как самостоятельная дисциплина, так и в основе множества прикладных аспектов практической инженерии. Проектирование, разработка и сопровождение информационных систем (ИС) также невозможна без решения вопроса производительности ВС [2]. Эффективная разработка и сопровождение ИС в области изучения производительности требуют: определение модели предметной области и формирование спецификаций к проектированию данных систем; создание и генерацию заданных тестовых нагрузок; построение системы с использованием жизненного цикла и определения бизнес-процессов функционирования основных компонент ВС.

Разработка математических моделей и методов производительности ВС ставит своей целью не только выполнение моделирования процессов, происходящих в ВС, но и управление ими, устранение различных опасных последствий негативных воздействий [3].

Анализ последних исследований и публикаций

К основным задачам которые решаются с помощью моделей производительности ВС и программного обеспечения (ПО) в основном относятся следующие: оптимизация показателей выполнения ПО в среде ВС; поиск проблемных областей (“узкого места”) в работе (производительности) ВС или ПО; обнаружение аномалий в работе ВС или ПО, оценка работы прикладных программ, сервисов, систем управления базами данных, операционных систем, виртуальных и облачных информационных структур [3].

Общая модель производительности ВС может быть представлена в виде [1]:

$$k_{pn} \frac{d^n P}{dt^n} + \dots + k_{p1} \frac{dP}{dt} + k_0 P = k_{qm} \frac{d^m Q}{dt^m} + \dots + k_{q1} \frac{dQ}{dt} + k_0 Q \quad (1)$$

Фундаментальные проблемы определения оценок производительности ВС связаны с построением концептуальной математической модели, отбором и уменьшением пространства признаков при построении прогностических коэффициентов математических моделей, разработкой критериев определения состояний объектов и субъектов исследований для принятия оптимальных решений.

Проблеми производительности ВС, в частности утечка памяти и процессора, могут возникать в следствии самых разных причин. В общем случае, утечка производительности процессора представляет собой ситуацию (рис. 1), при которой в результате сбоев или целенаправленных действий происходит ненужная (лишняя, не контролируемая) работа одного из ядер процессора. Такая работа может сопровождаться чередованием загрузки ядер до 99-100% в результате которой не наблюдается зависания системы. Такая ситуация плохо контролируется пользователями по причине ее возникновения так как не наблюдается работа сторонних программ. Часто, при нахождении причины, вызвавшей такую ситуацию, невозможно удалить процесс, который поддерживает утечку, в результате чего приходится перезагружать систему.

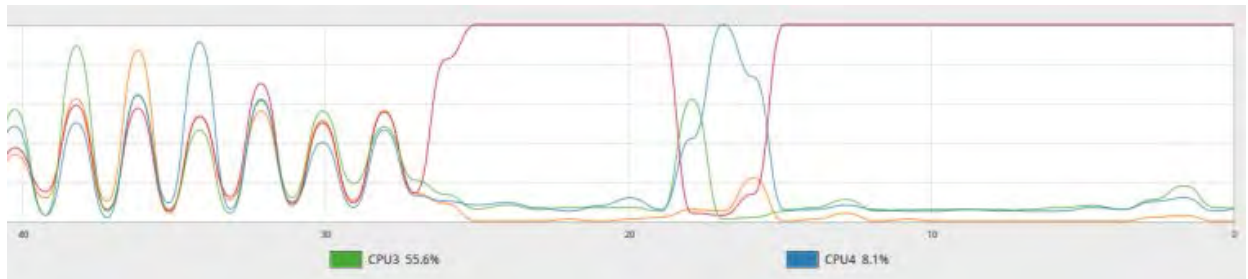


Рис. 1. Ситуация утечки производительности процессора.

К другим, наиболее распространенным из причин утечки производительности процессора и памяти могут являться заражение компьютерными вирусами и другими вредоносными программами, ошибки в работе операционных и файловых систем, неправильные пользовательские и системные настройки операционных систем, неправильная установка антивирусных и ресурсоемких программ (плагинов) на браузерах. В приведенных примерах в большинстве случаев отмечается ситуация утечки производительности процессора. Однако, на практике более известной и описанной проблемой среди пользователей является утечка памяти в процессе работы или завершения программ.

Цель исследования

Постановка задачи. Существует множество инструментов нагрузочного тестирования ВС и ПО. Однако, к их недостаткам следует отнести практическое отсутствие описания математической модели (основных параметров) НВ, к которым относятся: функциональная характеристика нагрузки (полиномы n -ой степени, степенные, экспоненциальные, показательные) и временные промежутки формирования отдельных серий запросов, общее время НВ (или количество серий запросов). Данные параметры нагрузочного воздействия существенно влияют на динамические характеристики работы ВС и ПО. Поэтому, к постановке задачи исследования процессов НВ и восстановлений относится:

- 1) создание и выполнение генерации сценария воздействия на веб-сервис с использованием функции полинома третьей степени;
- 2) определение модели работы веб-сервиса с ресурсами ВС;
- 3) выполнение исследования и определение оценок производительности ВС на примере веб-сервиса.

Изложение основного материала исследования

Теоретические сведения

Аппаратные средства ВС имеют определенную потенциальную составляющую в виде статических величин, которые позволяют различать программно-аппаратные комплексы (ПТК) друг от друга по возможности решения различных сложных. Обычно

пользователей интересуют потенциальные возможности в работе таких аппаратных компонентов ПТК как процессоры (такты частота), сетевые устройства (пропускная способность каналов передачи данных), видеоадаптеры (скорость прорисовки пикселей на экране), дисковые устройства (скорость чтения и записи данных).

При решении ряда задач ПО использует различные возможности этих и других аппаратных средств. Поэтому, такое динамическое использование (потребление) ресурсов аппаратных средств представляет собой кинетическую (динамическую) составляющую. Кинетическая (динамическая) составляющая использования аппаратных средств выражается функцией. Значения потенциальной и кинетической составляющей могут быть представлены в виде абсолютных и относительных величин.

Работа прикладной или системной задачи может быть представлена определенным воздействием на ресурсы ВС. По завершении задачи ресурсы, выделенные для ее решения, через некоторое время освобождаются. Поэтому воздействие задачи на ресурсы системы в виде потребления и расходования составляют два основных процесса производительности ВС: воздействия и восстановления. Часто, процессы воздействия и восстановления определяются как состояния или фазы функционирования объектов ПТК.

Для исследования производительности ВС выделяют субъектно-объектную модель которая состоит в следующем. В каждый фиксированный момент времени ВС представляет собой конечное множество компонентов, разделяемых по критерию активности на два подмножества: подмножество субъектов (S) и объектов (O) таких, что:

$$S \cap O = \emptyset; \quad (2)$$

В любой момент времени t_k подмножество субъектов и объектов не является пустым:

$$S \neq \emptyset; \quad (3)$$

$$O \neq \emptyset; \quad (4)$$

Объектом исследования процессов производительности ВС является аппаратная часть программно-технического комплекса (ПТК). К программной части ПТК принадлежат субъекты исследования процессов производительности ВС. В любой момент времени t при $\Delta t \rightarrow 0$ объект (O) может принадлежать только одному субъекту (S).

Определение оценок производительности вычислительных систем

Оценки производительности ВС находятся в виде скалярных (количественных и качественных) и векторных величин, выражаются в виде функций [4]. К примеру, пусть в результате экспериментальных исследования по изучению сценария воздействия на заданный ресурс (устройства) получена с помощью инструментов мониторинга некоторая функция $v_T(t)$. Данная функция представляет собой скорость выполнения работы некоторой задачи (в данном случае сценария воздействия). Тогда, выполненную работу можно представить в виде функции:

$$w_T(t) = \int v_T(t) dt \quad (5)$$

Скорость изменения протекания процессов определяется из выражения:

$$v_T(t) = w'_T(t) \quad (6)$$

$$a_T(t) = v'_T(t) \quad (7)$$

$$a_{TD}(t) = a'_T(t) \quad (8)$$

Оценки скорости протекания процесса или скорости выполнения задачи (9), изменения скорости протекания процесса (10) и выполненной работы (11) получаем следующим образом:

$$V_T = \int_{t_1}^{t_2} a_T(t) dt \quad (9)$$

$$A_T = \int_{t_1}^{t_2} a_{TD}(t) dt \quad (10)$$

$$W_T = \int_{t_1}^{t_2} v_T(t) dt \quad (11)$$

К показателям производительности ВС, которые тесно связаны с параметрами функционирования субъектов (объектов) ВС относятся [2,4]: пропускная способность (throughput), время ответа (response time), утилизация (utilization) и доступность (availability). Данные оценки и показатели производительности могут быть применены для сценариев воздействия на объект (субъект) исследования.

Создание сценариев воздействия на веб-сервис

Важной составной частью исследования производительности ВС является разработка сценариев (бенчмарков). К основным недостаткам существующих бенчмарков относятся отсутствие: моделей нагрузки и восстановления, их комбинированного воздействия, распределенных источников воздействия.

Для исследования производительности ВС в большинстве случаев создают сценарии воздействия. Такие сценарии по типу воздействия могут иметь различные динамические (скоростные) оценки и характеризоваться следующей моделью:

$$D_{LOAD} = k_A \frac{d^2 Q}{dt^2} + k_V \frac{dQ}{dt} + k_W f_Q(t) \quad (12)$$

В этом случае, равнопеременные при $k_A \neq 0$ считаются равноускоренные (при $k_A > 0$) или равнозамедленные (при $k_A < 0$) нагрузочные воздействия. При $k_A = 0$ сценарии воздействия будут считаться равномерными по генерации запросов к субъекту (объекту) исследования.

Сформируем сценарии воздействия по первому случаю как совокупность известной функциональной зависимости групп запросов (Force of Impact, F_{Impact}) и временных интервалов (Pause, P_s) между ними:

$$F_{Common} = F_{Impact} + P_s \quad (13)$$

Для создания сценария воздействия можно принять следующую функциональную зависимость:

$$F_{Impact} = 500 * t \text{ [запросов / с]} \quad (14)$$

Тогда временные промежутки сценариев воздействия будут следующими:

для $S0 - 0$ с, $S1 - 1$ с, $S2 - 2$ с, $S3 - 3$ с.

Целью проведения равнопеременных воздействий является определения состояний объекта (субъекта) исследования. К примеру, состояния веб-сервиса при воздействии по сценарию $S0$ показаны в табл. 1. Различие в границах количества запросов определяется аппаратно-программным окружением и нагрузкой на ВС.

Целью проведения равномерных и равнопеременных воздействий на субъект исследования является определение основных процессов производительности ВС: НВ и

восстановления. В общем случае, производительность также характеризуется временным (или постоянным) прекращением или существенным понижением обработки данных объектом исследования в результате которого понижается его доступность по направляемым к нему запросам.

К примеру, скрипт, реализующий последовательность запросов по первому случаю (сценарий *S0*) показан на рис. 1а. Второй случай представлен также скриптом, показанным на рис. 1б. В случае тестирования, скрипты пишутся и выполняются в среде *bash* программирования. Для автоматизации исследований программы составляются на языках высокого уровня, к примеру, по настоящему исследованию – на *python*.

Таблица 1

Характеристика состояний субъекта исследования (веб-сервиса)

Название состояния	Количество запросов (10^3 c^{-1})	Критерий определения состояния
Стабильное (нормальное)	от 1 до 2,5	Отсутствие очереди запросов, отсутствие ошибок
Нагрузочное	от 2,5 до 8	Появление очереди запросов, отсутствие ошибок
Стрессовое	свыше 8	Появление ошибок, потеря запросов

<pre>#!/bin/bash for i in {100..9000..500} do httpperf --hog --server localhost --uri "/" -- num-conn \$i --num-call 1 --timeout 5 --rate \$i --port 80 done</pre> <p style="text-align: center;">а)</p>	<pre>#!/bin/bash for i in {1..180} do httpperf --hog --server localhost --uri "/" -- num-conn 1000 --num-call 1 --timeout 5 -- rate 1000 --port 80 done</pre> <p style="text-align: center;">б)</p>
--	---

Рис. 2. Bash скрипты, реализующие различные последовательности запросов к веб-сервису: а) равнопеременные (равноускоренные) запросы; б) равномерные запросы

Результаты исследования производительности ВС на примере веб-сервиса

Исследование производительности ВС на примере веб-сервиса выполнялось в операционной системе Linux Centos 7.0, ядре 3.10, процессоре Intel Core i7-3667U, 2.0GHz, оперативная память 8ГБ. Программное обеспечение: веб-сервер *apache*. Нагрузочное воздействие осуществлялось с помощью утилиты *httperf*, мониторинг - с помощью *sar*, *iostat*, *vmstat*.

Для скрипта (рис. 2а) согласно оценкам (6-8) принималась следующая модель:

$$v_T(t) = 0.1428t^3 - 5.2727t^2 + 553.2215t - 492.2981; \quad (15)$$

$$a_T(t) = 0.4284t^2 - 10.5454t + 553.2215; \quad (16)$$

$$w_T(t) = 0.0357t^4 - 1.7576t^3 + 276.6108t^2 - 492.2981t. \quad (17)$$

Данная модель (15) для $v_T(t)$ является полиномом третьей степени и имеет следующие характеристики качества аппроксимации:

Индекс корреляции $R = 0.9994$;

Индекс детерминации $R^2 \approx 0.9987$;

Средняя ошибка аппроксимации $A \approx 3.7013\%$

Оценки производительности сценария воздействия проверялись с помощью

математического моделирования в среде SciLab с помощью скрипта в сокращенном виде (рис. 3а). Результаты работы скрипта определения динамических оценок производительности сценария воздействия $S0$ показаны на рис. 3б: количество выполненной работы задачей ($w_T(t)$) – верхняя линия, скорость выполнения процесса ($v_T(t)$) – нижняя.

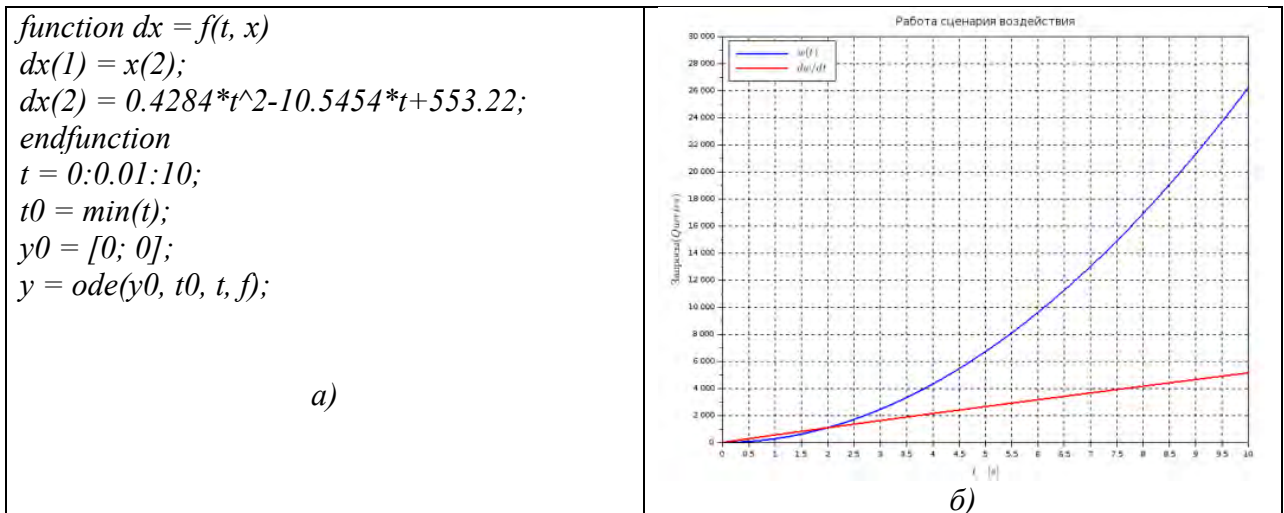


Рис. 3. Скрипт среды окружения SciLab, позволяющий получить оценки производительности сценария воздействия $S0$ а) и результат его работы б)

Выводы

В работе рассмотрены важные вопросы производительности вычислительных систем к которым относятся цели и задачи, общая модель производительности, фундаментальные проблемы определения оценок производительности. Названы наиболее часто встречаемые причины возникновения утечки производительности процессора и памяти. Сформулирована постановка задачи исследования производительности вычислительных систем на примере использования веб-сервисов, приведены примеры скриптов нагрузочного воздействия, наведена их характеристика и особенности работы. Особое значение уделено модели формирования воздействия. Приведен пример рекомендаций по созданию сценариев воздействия на веб-сервис.

Показана оценка производительности сценариев воздействия на веб-сервис, наведены графики выполнения работы на основе скриптов, написанных в среде SciLab.

Список использованной литературы

1. Хошаба А.М. Моделирование состояний при нагрузочных воздействиях на сервисы вычислительной системы / А.М. Хошаба // XIII Міжнародна науково-практична конференція "Математичне та імітаційне моделювання систем": Тези допов. – Київ, 2018. – С. 269-272.
2. Хошаба А.М. Концептуальная модель производительности вычислительных систем / А.М. Хошаба // XI Міжнародна науково-практична конференція "Математичне та імітаційне моделювання систем": Тези допов. – Київ, 2016. – С. 417-420.
3. Хошаба О.М. Дослідження надійності функціонування систем з керування потоками даних у комп'ютерних мережах / А.М. Хошаба // II Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології в освіті, науці і техніці": Тези допов. – Черкаси, 2014. – С. 107-108.

4. Хошаба А.М. Построение информационной системы для компьютерного моделирования производительности программно-технического комплекса / А.М. Хошаба // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – №3(56). – С. 303-307.

References

1. Khoshaba, A. M. Modelirovanie sostoyaniy pri nagruzochnykh vozdeystviyah na servisii vyichislitelnoy sistemyi. XIII Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia "Matematychnye ta imitatsiine modeliuвання system": Tezy dopov. Kyiv. 269-272. (2018)
2. Khoshaba, A. M. Kontseptualnaya model proizvoditelnosti vyichislitelnykh system. XI Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia "Matematychnye ta imitatsiine modeliuвання system": Tezy dopov. Kyiv. 417-420. (2016)
3. Khoshaba, A. M. Doslidzhennia nadiinosti funktsionuvannya system z keruvannya potokamy danykh u kompiuternykh merezhakh. II Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia "Informatsiini tekhnolohii v osviti, nautsi i tekhnitsi": Tezy dopov. Cherkasy. 107-108. (2014)
4. Khoshaba, A. M. Postroenie informatsionnoy sistemyi dlya kompyuternogo modelirovaniya proizvoditelnosti programmno-tehnicheskogo kompleksa. Vestnik Hersonskogo natsionalnogo tehnicheskogo universiteta. 3(56), 303-307. (2015)

ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

**Херсонський національний
технічний університет**

Відповідальний за випуск	Хомченко Анатолій Никифорович, д.ф.-м.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України
Технічний редактор	Литвиненко Олена Іванівна к.т.н., доцент
Макетування	Омельчук А.А.

Свідоцтво про державну реєстрацію засобу масової інформації
– серія КВ № 23529-13369Р от 03.08.2018

Підписано до друку 29.08.2018 р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Ум. друк. аркушів 21.62. Замовлення № 18. Тираж 120 прим.

Матеріали друкуються в авторській редакції.
Відповідальність за достовірність даних, зазначених у статтях,
несуть їх автори.

© Херсонський національний технічний університет 2018

Видавництво та друк: «ОЛДІ-ПЛЮС»
73033, м. Херсон, а/с 15
E-mail: oldi-ks@i.ua
Свід. ХС № 2 від 16.08.2000 р.