В. С. Яковина, М. М. Сенів, В. В. Литвин, І. І. Симець

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ПРОГРАМНИЙ МОДУЛЬ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ СИСТЕМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ КОЛМОГОВОРА-ЧЕПМЕНА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ НАДІЙНІСНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Надзвичайно важливою компонентою якості складних технічних систем є їхня надійність, тобто властивість системи виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення експлуатаційних показників у заданих межах, що відповідають умовам використання та заданим режимам технічного обслуговування, збереження і транспортування. Сучасний стан розвитку методів аналізу надійності технічних систем характеризується поєднанням аналітичних методів дослідження надійності з обчислювальними можливостями сучасних комп'ютерних засобів. Тому актуальною проблемою є автоматизація моделювання складних технічних систем яка, за умови відповідного рівня формалізації моделей, уможливує їх побудову та проведення аналізу надійності з використанням сучасних комп'ютерних засобів. В роботі описано програмний модуль автоматизованого розв'язання систем диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, який є складовою програмного комплексу автоматизації надійнісного проектування складних технічних систем. Розроблений модуль дає змогу розв'язувати системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена без залучення спеціалізованих програмних продуктів (Matlab, Mathcad) для аналізу структурних схем надійності та автоматизованого визначення надійнісних показників складних технічних систем. Представлений модуль, за рахунок інтеграції в програмний комплекс автоматизації надійнісного проектування, дає змогу швидше опрацьовувати вхідні дані великих об'ємів та візуалізувати отримані результати обчислень.

Ключові слова: програмне забезпечення; надійність; структурна схема надійності (ССН); граф станів-переходів.

Вступ. Задача оцінки показників надійності сучасних складних технічних систем, особливо систем відповідального призначення, набуває дедалі більшої актуальності, оскільки їх відмови є недопустимі через можливі людські жертви чи величезні матеріальні втрати. Тому питанням забезпечення та оцінки показників надійності приділяють увагу вже на початкових етапах проектування таких систем, де формується їх архітектура, тобто структура та алгоритм функціонування. Технічні системи можуть бути невідновлюваними та відновлюваними, тривалого і короткого часу роботи, резервованими і нерезервованими. Сучасні технічні системи характеризуються великою кількістю елементів (модулів) і, як наслідок, – великими розмірностями простору станів, які можуть сягати десятків-сотень тисяч станів, що практично унеможливує їх аналіз без використання обчислювальних потужностей комп'ютерних засобів. Використання структурно-автоматних моделей (Modarres, Kaminskiy & Krivtsov, 1999; Bennetts, 1982; Polovko & Gurov, 2006) дає змогу автоматизувати побудову графа станів і переходів, але вимагає значних затрат на опис самої моделі.

Сучасний стан розвитку методів аналізу надійності складних технічних систем характеризується поєднанням аналітичних методів дослідження надійності з обчислювальними можливостями сучасних комп'ютерних засобів. Серед аналітичних методів найбільшого поширення набули методи, які базуються на теорії марковських процесів, та, водночас, використовують моделі надійності у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, що дають змогу визначити часові залежності ймовірностей перебування системи у можливих станах (працездатності, відновлення, відмови тощо). Ці методи можна успішно застосувати для надійнісного аналізу технічних систем різного типу: невідновлюваних і відновлюваних, нерезервованих і резервованих з різними видами резервування, з різними пріоритетами ремонту тощо (Bennetts, 1982; Polovko & Gurov, 2006; Volochiy, 2004; Catelani, Ciani & Venzi, 2014). Але використання цих методів для реальних складних систем пов'язане з розв'язанням задач великої розмірності та складними розрахунками, які унеможливають виконання цих робіт вручну.

З огляду на це актуальною проблемою є автоматиза-

Інформація про авторів:

Яковина Віталій Степанович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення.

Email: vitaliy.s.yakovyna@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-0133-8591>

Сенів Максим Михайлович, канд. техн. наук, доцент, кафедра програмного забезпечення. Email: max1sudden@gmail.com

Литвин Василь Володимирович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем та мереж.

Email: vasy17.lytvyn@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-9676-0180>

Симець Іван Ігорович, аспірант, кафедра програмного забезпечення. Email: cemivan1995@gmail.com

Цитування за ДСТУ: Яковина В. С., Сенів М. М., Литвин В. В., Симець І. І. Програмний модуль розв'язування систем диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для автоматизації надійнісного проектування. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 5. С. 141–146.

Citation APA: Yakovyna, V. S., Seniv, M. M., Lytvyn, V. V., & Symets, I. I. (2019). Software Module of Solving Systems of Chapman-Kolmogorov Differential Equations for Automation of Reliable Design. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(5), 141–146.

<https://doi.org/10.15421/40290528>

ція моделювання складних технічних систем яка, за умови відповідного рівня формалізації моделей, робить можливою їх побудову та проведення надійнісного аналізу з використанням можливостей сучасних обчислювальних систем. Для вирішення описаної вище проблеми доцільно використовувати спеціалізовані алгоритмічні та програмні засоби, які значно скорочують трудо- та часомісткий процеси оцінювання надійності технічних систем. Складовою такого програмного комплексу є програмний модуль розв'язування систем диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, що описаний в цій роботі.

Викладення основного матеріалу. Існують такі способи опису функціонування технічної системи в сенсі її надійності (Bennetts, 1982): структурна схема; функції алгебри логіки; граф станів-переходів; диференціальні та алгебраїчні рівняння.

Структурна схема. Структуру досліджуваного об'єкта представляють у вигляді сукупності однофункціональних вузлів (модулів) та необхідних взаємозв'язків між ними. Алгоритм функціонування відображає характер і послідовність взаємодії між вузлами (модулями). Опис способу функціонування технічної системи з погляду надійності починають із побудови її структурної схеми надійності. *Структурна схема надійності* – це графічне зображення логічної схеми системи у підсистемах і (або) елементах. Це дає змогу визначити шляхи сприятливого стану системи за тим, як пов'язані між собою блоки (підсистеми – елементи) (Modarres, Kaminskiy & Krivtsov, 1999). При графічному поданні структурної схеми надійності кожен елемент (модуль) системи зображають у вигляді геометричної фігури (найчастіше прямокутника) і з'єднують елементи між собою лініями таким способом, щоб структурна схема відображала умову працездатності системи (Software, 2019).

На рис. 1 показано приклади структурних схем надійності деяких нескладних систем.

Рис. 1. Структурні схеми надійності простих технічних систем

Із наведених структурних схем наочно видно умови працездатності: наприклад, система (а) працездатна, якщо працездатні усі її елементи; система (б) працездатна, якщо працездатний будь-який її елемент; система (в) працездатна, якщо працездатний перший елемент і будь-який із двох у другій групі і будь-який із трьох у третій групі елементів (Bennetts, 1982; Polovko & Gurov, 2006).

Функції алгебри логіки. Найзручнішим у практичному використанні є спосіб одночасного визначення умов працездатності системи під час створення графічного зображення її структурної схеми надійності. Умови працездатності системи можна описувати за допомогою функцій алгебри логіки під час створення графічного зображення її структурної схеми надійності. Суть цього способу полягає у такому. Під час аналізу топології схеми спочатку виявляються сегменти схеми, які є послідовним з'єднанням елементів, а відтак розглядається спосіб з'єднання виявлених сегментів між собою. При послідовному з'єднанні елементи об'єднуються логічною операцією AND, а при паралельному з'єднанні

сегменти об'єднуються логічною операцією OR (Polovko & Gurov, 2006).

Матриця станів системи. У матриці станів міститься інформація про функціонування системи в сенсі її надійності. Кожен рядок матриці є вектором, компонентами якого слугують ознаки про те, в якому стані перебуває кожен елемент, коли сама система знаходиться в стані і. Елемент може перебувати не тільки у двох станах: працює чи відновлюється, елемент системи може перебувати в стані простою, який зумовлений різними причинами. Для подальшої роботи системи потрібне знання того, чи викликаний зазначений простій елемента чергою на відновлення чи відмовою інших елементів, або елемент є резервним і знаходиться в неавантаженому стані і т. ін. (Polovko & Gurov, 2006).

Граф станів-переходів. Через відмови і відновлення система в дискретні моменти часу переходить з одного стану в інший. У процесі тривалої експлуатації вона може побувати в кожному з можливих станів неодноразово. Тоді зручно процес її функціонування описувати графом, вузлам якого приписуються стани системи, а гілкам – можливі переходи зі стану в стан. Якщо в графі є n -вузлів, то серед них буде k -вузлів, які відповідають несправним станам, і $(n-k)$ – справним. Множина станів і переходів системи є вхідними даними для подальшого дослідження надійності технічної системи та складання диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена (Volochniy, 2004; Catelani, Ciani & Venzi, 2014).

Диференціальні і алгебраїчні рівняння. Надійнісну поведінку системи в часі можна інтерпретувати як випадковий процес із скінченною множиною значень і неперервною зміною аргументу (часу), тобто як дискретно-неперервний стохастичний процес. Часові залежності безумовних ймовірностей значень випадкового процесу та умовних ймовірностей переходів описуються системою диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена такого виду:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -\sum_{j=1}^N \lambda_{ij}(t)P_i(t) + \sum_{j=1}^N \lambda_{ji}(t)P_j(t); i, j = \overline{1, N}, \quad (1)$$

де: $P_i(t)$, $P_j(t)$ – ймовірності значень випадкового процесу (ймовірності перебування системи) у момент часу t відповідно у станах x_i та x_j ; $\lambda_{ij}(t)$ – інтенсивність переходу із стану x_i у стан x_j ; $\lambda_{ji}(t)$ – інтенсивність переходу із стану x_j у стан x_i ; N – кількість можливих станів системи.

Розв'язок системи таких рівнянь дає змогу визначити такі показники надійності: ймовірність безвідмовної роботи, функцію та коефіцієнт готовності, середня тривалість безвідмовної роботи, середнє напруження на відмову, середня тривалість відновлення тощо (Volochniy, 2004; Catelani, Ciani & Venzi, 2014; Du, Guo & Beeram, 2008; Gorbatyy, 2014).

Аналіз сучасного стану ПЗ для надійнісного проектування. Відомі програмні продукти для надійнісного проектування, такі як RAM Commander (ALD, Israel), ReliaSoft Synthesis Master Suite (ReliaSoft, USA), Reliability Workbench (Isograph, UK), FavoWeb та інші, дають змогу автоматизувати процес розрахунку показників надійності, проте вимагають попередньої "ручної" побудови графа станів та переходів (Bennetts, 1982; Polovko & Gurov, 2006; Volochniy, 2004).

RAM Commander (ціна \$1,810.00/one-time/user) (Commander, 2019) – комплексний пакет програм для вдосконалення і дослідження надійності електромеханічних,

механічних та інших систем, створений провідними фахівцями з надійності. RAM Commander охоплює весь спектр завдань, пов'язаних з надійністю, починаючи від створення й імпортування переліку матеріалів і закінчуючи складанням звітів щодо надійності, готовності, ремонтпридатності (рис. 2).

Рис. 2. Робоче вікно RAM Commander

RAM Commander дає змогу проводити розрахунок функціональної надійності, аналіз видів і наслідків потенційних відмов по методу FMEA / FMECA, будувати і аналізувати дерева відмов (FTA – fault tree analysis), створювати температурні криві, оптимізувати ремонт і кількість запасних частин, вибирати і робити коригувальні дії, проводити аналіз чутливості і влаштовувати експертні оцінки.

Однією з найважливіших переваг RAM Commander є відповідність проведених у ньому розрахунків основним міжнародним стандартам: MILHDBK-217 F Notice, Белькорп Issue, HRD4, HRD5 British Telecom.

FavoWeb – це веб-орієнтована FRACAS-система (англ. *Failure Reporting Analysis and Corrective Action System* – Система оповіщення про відмови, аналіз і коригувальні дії).

Система дає змогу створювати бази даних, переводячи різноманітні дані в структуровану інформацію про надійність. Має потужний механізм коригувальних дій: підтримка роботи груп аналізу відмов / дефектів / матеріалів, аналіз глибинних причин відмов, усунення проблем. Містить модуль Workflow для автоматизації сповіщення про відмови і серійні номери.

Reliability Workbench (\$1,499.00/one-time/user) (Workbench, 2019) – це система, яка складається з набору продуктів для виконання ряду стандартних методів аналізу надійності. Система автоматично формує розрахункові аналітичні моделі надійності і безпеки систем та обчислює ймовірність безвідмовної роботи, середнє напруження на відмову, коефіцієнт готовності, середня тривалість відновлення, ймовірність відмови відновленої системи.

Описані вище програмні комплекси за всіх їхніх переваг мають низку недоліків, серед яких основними є висока вартість ліцензії, складність навчання й обслуговування програмного засобу (для роботи з ними потрібно мати певну кваліфікацію в області теорії надійності), потребу певних "ручних" розрахунків вхідних даних (умова працездатності, множина станів тощо). Тому виникає потреба у створенні простого та багатофункціонального програмного комплексу для надійнісного

проектуювання, який також мав би високу швидкодію. Складовою такого комплексу є програмний модуль розв'язування систем диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена.

Розроблення та інтеграція програмного модуля автоматизованого розв'язання систем диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена. Розроблений модуль є функціональною частиною програмного комплексу для аналізу надійнісних характеристик технічних систем на основі структурних схем надійності. Для повноцінної роботи модуль потребує вхідної інформації про стани і всі зв'язки між ними для досліджуваної системи та інформації про компоненти системи (інтенсивності відмов і відновлення модулів).

Тому для зручної взаємодії та обміну інформацією між компонентами програмного комплексу розроблено гнучку модульну архітектуру із використанням модуля контролю (рис. 3). Цей комплекс складається із підсистем, які відповідають за візуалізацію і обчислення певних характеристик, а також модуля контролю, який забезпечує швидкий і зручний зв'язок між функціональними модулями.

Рис. 3. Місце модуля у програмному комплексі

Розроблений програмний модуль розв'язує системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта. Унаслідок роботи створеного модуля отримуємо ймовірності перебування досліджуваної системи у всіх можливих станах на заданому проміжку часу, і на основі цих результатів можна визначити інтеграл (2), який є характеристикою надійності системи – середня тривалість безвідмовної роботи (середня тривалість напрацювання до відмови)

$$t_{ср} = \int_0^{\infty} p(t) dt. \quad (2)$$

Для програмної реалізації цього модуля розроблено гнучку ієрархію класів, яка дає змогу легко модифікувати цей модуль (рис. 4), а саме швидко і зручно додавати функції для розв'язку системи диференціальних рівнянь іншими відомими методами (Ейлера, Мілна тощо) або із використанням стороннього API (Matlab, Matcad).

Нижче наведено перелік основних класів модуля розв'язування систем диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена:

- RungeKuttaMethod – клас призначений для розв'язку системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта.
- ControlModule – клас призначений для координування роботи системи, відповідає за обмін даними і зв'язок між програмними модулями системи.

- SystemState, State – класи для представлення матриці станів і переходів між ними.
- SystemConfiguration – клас для різноманітних програмних конфігурацій.

Рис. 4. Діаграма класів модуля розв'язування систем диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена

Вирішено використовувати програмну реалізацію методу Рунге-Кутта, тому що цей метод має високу точність і, незважаючи на свою трудомісткість, широко використовується при чисельному рішенні систем диференціальних рівнянь. Метод Рунге-Кутта стійкий до помилок у початкових умовах і до спотворень у правій частині рівняння, оскільки кінцеві зміни цих величин призводять до кінцевих змін у результатах обчислень, а не накопичуються при просуванні від кроку до кроку. На рис. 5 зображено реалізацію методу Рунге-Кутта мовою програмування C#.

```

RungeKuttaMethod.cs * X GraphWindow.xaml.cs GraphWindow.xaml MatLabEquation.cs
VIPER
10 for (int k = 0; k < maxTime; k+=step)
11 {
12     var resultTemp1 = new List<double>();
13     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
14     {
15         k0[i + k * equationCount] = Func(initialValues, i, equationCount, coefficients) * step;
16     }
17     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
18     {
19         k1_help[i] = initialValues[i] + k0[i + k * equationCount] / 2;
20     }
21     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
22     {
23         k2[i + k * equationCount] = Func(k1_help, i, equationCount, coefficients) * step;
24     }
25     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
26     {
27         k3_help[i] = initialValues[i] + k2[i + k * equationCount] / 2;
28     }
29     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
30     {
31         k4[i + k * equationCount] = Func(k3_help, i, equationCount, coefficients) * step;
32     }
33     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
34     {
35         k5_help[i] = initialValues[i] + k4[i + k * equationCount];
36     }
37     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
38     {
39         k6[i + k * equationCount] = Func(k5_help, i, equationCount, coefficients) * step;
40     }
41     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
42     {
43         k7_help[i] = initialValues[i] + k6[i + k * equationCount];
44     }
45     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
46     {
47         k8[i + k * equationCount] = Func(k7_help, i, equationCount, coefficients) * step;
48     }
49     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
50     {
51         k9_help[i] = initialValues[i] + k8[i + k * equationCount];
52     }
53     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
54     {
55         k10[i + k * equationCount] = Func(k9_help, i, equationCount, coefficients) * step;
56     }
57     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
58     {
59         k11_help[i] = initialValues[i] + k10[i + k * equationCount];
60     }
61     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
62     {
63         k12[i + k * equationCount] = Func(k11_help, i, equationCount, coefficients) * step;
64     }
65     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
66     {
67         k13_help[i] = initialValues[i] + k12[i + k * equationCount];
68     }
69     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
70     {
71         k14[i + k * equationCount] = Func(k13_help, i, equationCount, coefficients) * step;
72     }
73     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
74     {
75         k15_help[i] = initialValues[i] + k14[i + k * equationCount];
76     }
77     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
78     {
79         k16[i + k * equationCount] = Func(k15_help, i, equationCount, coefficients) * step;
80     }
81     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
82     {
83         k17_help[i] = initialValues[i] + k16[i + k * equationCount];
84     }
85     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
86     {
87         k18[i + k * equationCount] = Func(k17_help, i, equationCount, coefficients) * step;
88     }
89     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
90     {
91         k19_help[i] = initialValues[i] + k18[i + k * equationCount];
92     }
93     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
94     {
95         k20[i + k * equationCount] = Func(k19_help, i, equationCount, coefficients) * step;
96     }
97     for (int i = 0; i < equationCount; i++)
98     {
99         k21_help[i] = initialValues[i] + k20[i + k * equationCount];
100    }
101    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
102    {
103        k22[i + k * equationCount] = Func(k21_help, i, equationCount, coefficients) * step;
104    }
105    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
106    {
107        k23_help[i] = initialValues[i] + k22[i + k * equationCount];
108    }
109    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
110    {
111        k24[i + k * equationCount] = Func(k23_help, i, equationCount, coefficients) * step;
112    }
113    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
114    {
115        k25_help[i] = initialValues[i] + k24[i + k * equationCount];
116    }
117    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
118    {
119        k26[i + k * equationCount] = Func(k25_help, i, equationCount, coefficients) * step;
120    }
121    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
122    {
123        k27_help[i] = initialValues[i] + k26[i + k * equationCount];
124    }
125    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
126    {
127        k28[i + k * equationCount] = Func(k27_help, i, equationCount, coefficients) * step;
128    }
129    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
130    {
131        k29_help[i] = initialValues[i] + k28[i + k * equationCount];
132    }
133    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
134    {
135        k30[i + k * equationCount] = Func(k29_help, i, equationCount, coefficients) * step;
136    }
137    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
138    {
139        k31_help[i] = initialValues[i] + k30[i + k * equationCount];
140    }
141    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
142    {
143        k32[i + k * equationCount] = Func(k31_help, i, equationCount, coefficients) * step;
144    }
145    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
146    {
147        k33_help[i] = initialValues[i] + k32[i + k * equationCount];
148    }
149    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
150    {
151        k34[i + k * equationCount] = Func(k33_help, i, equationCount, coefficients) * step;
152    }
153    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
154    {
155        k35_help[i] = initialValues[i] + k34[i + k * equationCount];
156    }
157    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
158    {
159        k36[i + k * equationCount] = Func(k35_help, i, equationCount, coefficients) * step;
160    }
161    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
162    {
163        k37_help[i] = initialValues[i] + k36[i + k * equationCount];
164    }
165    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
166    {
167        k38[i + k * equationCount] = Func(k37_help, i, equationCount, coefficients) * step;
168    }
169    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
170    {
171        k39_help[i] = initialValues[i] + k38[i + k * equationCount];
172    }
173    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
174    {
175        k40[i + k * equationCount] = Func(k39_help, i, equationCount, coefficients) * step;
176    }
177    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
178    {
179        k41_help[i] = initialValues[i] + k40[i + k * equationCount];
180    }
181    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
182    {
183        k42[i + k * equationCount] = Func(k41_help, i, equationCount, coefficients) * step;
184    }
185    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
186    {
187        k43_help[i] = initialValues[i] + k42[i + k * equationCount];
188    }
189    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
190    {
191        k44[i + k * equationCount] = Func(k43_help, i, equationCount, coefficients) * step;
192    }
193    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
194    {
195        k45_help[i] = initialValues[i] + k44[i + k * equationCount];
196    }
197    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
198    {
199        k46[i + k * equationCount] = Func(k45_help, i, equationCount, coefficients) * step;
200    }
201    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
202    {
203        k47_help[i] = initialValues[i] + k46[i + k * equationCount];
204    }
205    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
206    {
207        k48[i + k * equationCount] = Func(k47_help, i, equationCount, coefficients) * step;
208    }
209    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
210    {
211        k49_help[i] = initialValues[i] + k48[i + k * equationCount];
212    }
213    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
214    {
215        k50[i + k * equationCount] = Func(k49_help, i, equationCount, coefficients) * step;
216    }
217    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
218    {
219        k51_help[i] = initialValues[i] + k50[i + k * equationCount];
220    }
221    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
222    {
223        k52[i + k * equationCount] = Func(k51_help, i, equationCount, coefficients) * step;
224    }
225    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
226    {
227        k53_help[i] = initialValues[i] + k52[i + k * equationCount];
228    }
229    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
230    {
231        k54[i + k * equationCount] = Func(k53_help, i, equationCount, coefficients) * step;
232    }
233    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
234    {
235        k55_help[i] = initialValues[i] + k54[i + k * equationCount];
236    }
237    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
238    {
239        k56[i + k * equationCount] = Func(k55_help, i, equationCount, coefficients) * step;
240    }
241    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
242    {
243        k57_help[i] = initialValues[i] + k56[i + k * equationCount];
244    }
245    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
246    {
247        k58[i + k * equationCount] = Func(k57_help, i, equationCount, coefficients) * step;
248    }
249    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
250    {
251        k59_help[i] = initialValues[i] + k58[i + k * equationCount];
252    }
253    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
254    {
255        k60[i + k * equationCount] = Func(k59_help, i, equationCount, coefficients) * step;
256    }
257    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
258    {
259        k61_help[i] = initialValues[i] + k60[i + k * equationCount];
260    }
261    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
262    {
263        k62[i + k * equationCount] = Func(k61_help, i, equationCount, coefficients) * step;
264    }
265    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
266    {
267        k63_help[i] = initialValues[i] + k62[i + k * equationCount];
268    }
269    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
270    {
271        k64[i + k * equationCount] = Func(k63_help, i, equationCount, coefficients) * step;
272    }
273    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
274    {
275        k65_help[i] = initialValues[i] + k64[i + k * equationCount];
276    }
277    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
278    {
279        k66[i + k * equationCount] = Func(k65_help, i, equationCount, coefficients) * step;
280    }
281    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
282    {
283        k67_help[i] = initialValues[i] + k66[i + k * equationCount];
284    }
285    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
286    {
287        k68[i + k * equationCount] = Func(k67_help, i, equationCount, coefficients) * step;
288    }
289    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
290    {
291        k69_help[i] = initialValues[i] + k68[i + k * equationCount];
292    }
293    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
294    {
295        k70[i + k * equationCount] = Func(k69_help, i, equationCount, coefficients) * step;
296    }
297    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
298    {
299        k71_help[i] = initialValues[i] + k70[i + k * equationCount];
300    }
301    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
302    {
303        k72[i + k * equationCount] = Func(k71_help, i, equationCount, coefficients) * step;
304    }
305    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
306    {
307        k73_help[i] = initialValues[i] + k72[i + k * equationCount];
308    }
309    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
310    {
311        k74[i + k * equationCount] = Func(k73_help, i, equationCount, coefficients) * step;
312    }
313    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
314    {
315        k75_help[i] = initialValues[i] + k74[i + k * equationCount];
316    }
317    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
318    {
319        k76[i + k * equationCount] = Func(k75_help, i, equationCount, coefficients) * step;
320    }
321    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
322    {
323        k77_help[i] = initialValues[i] + k76[i + k * equationCount];
324    }
325    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
326    {
327        k78[i + k * equationCount] = Func(k77_help, i, equationCount, coefficients) * step;
328    }
329    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
330    {
331        k79_help[i] = initialValues[i] + k78[i + k * equationCount];
332    }
333    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
334    {
335        k80[i + k * equationCount] = Func(k79_help, i, equationCount, coefficients) * step;
336    }
337    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
338    {
339        k81_help[i] = initialValues[i] + k80[i + k * equationCount];
340    }
341    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
342    {
343        k82[i + k * equationCount] = Func(k81_help, i, equationCount, coefficients) * step;
344    }
345    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
346    {
347        k83_help[i] = initialValues[i] + k82[i + k * equationCount];
348    }
349    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
350    {
351        k84[i + k * equationCount] = Func(k83_help, i, equationCount, coefficients) * step;
352    }
353    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
354    {
355        k85_help[i] = initialValues[i] + k84[i + k * equationCount];
356    }
357    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
358    {
359        k86[i + k * equationCount] = Func(k85_help, i, equationCount, coefficients) * step;
360    }
361    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
362    {
363        k87_help[i] = initialValues[i] + k86[i + k * equationCount];
364    }
365    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
366    {
367        k88[i + k * equationCount] = Func(k87_help, i, equationCount, coefficients) * step;
368    }
369    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
370    {
371        k89_help[i] = initialValues[i] + k88[i + k * equationCount];
372    }
373    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
374    {
375        k90[i + k * equationCount] = Func(k89_help, i, equationCount, coefficients) * step;
376    }
377    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
378    {
379        k91_help[i] = initialValues[i] + k90[i + k * equationCount];
380    }
381    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
382    {
383        k92[i + k * equationCount] = Func(k91_help, i, equationCount, coefficients) * step;
384    }
385    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
386    {
387        k93_help[i] = initialValues[i] + k92[i + k * equationCount];
388    }
389    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
390    {
391        k94[i + k * equationCount] = Func(k93_help, i, equationCount, coefficients) * step;
392    }
393    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
394    {
395        k95_help[i] = initialValues[i] + k94[i + k * equationCount];
396    }
397    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
398    {
399        k96[i + k * equationCount] = Func(k95_help, i, equationCount, coefficients) * step;
400    }
401    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
402    {
403        k97_help[i] = initialValues[i] + k96[i + k * equationCount];
404    }
405    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
406    {
407        k98[i + k * equationCount] = Func(k97_help, i, equationCount, coefficients) * step;
408    }
409    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
410    {
411        k99_help[i] = initialValues[i] + k98[i + k * equationCount];
412    }
413    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
414    {
415        k100[i + k * equationCount] = Func(k99_help, i, equationCount, coefficients) * step;
416    }
417    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
418    {
419        k101_help[i] = initialValues[i] + k100[i + k * equationCount];
420    }
421    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
422    {
423        k102[i + k * equationCount] = Func(k101_help, i, equationCount, coefficients) * step;
424    }
425    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
426    {
427        k103_help[i] = initialValues[i] + k102[i + k * equationCount];
428    }
429    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
430    {
431        k104[i + k * equationCount] = Func(k103_help, i, equationCount, coefficients) * step;
432    }
433    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
434    {
435        k105_help[i] = initialValues[i] + k104[i + k * equationCount];
436    }
437    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
438    {
439        k106[i + k * equationCount] = Func(k105_help, i, equationCount, coefficients) * step;
440    }
441    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
442    {
443        k107_help[i] = initialValues[i] + k106[i + k * equationCount];
444    }
445    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
446    {
447        k108[i + k * equationCount] = Func(k107_help, i, equationCount, coefficients) * step;
448    }
449    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
450    {
451        k109_help[i] = initialValues[i] + k108[i + k * equationCount];
452    }
453    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
454    {
455        k110[i + k * equationCount] = Func(k109_help, i, equationCount, coefficients) * step;
456    }
457    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
458    {
459        k111_help[i] = initialValues[i] + k110[i + k * equationCount];
460    }
461    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
462    {
463        k112[i + k * equationCount] = Func(k111_help, i, equationCount, coefficients) * step;
464    }
465    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
466    {
467        k113_help[i] = initialValues[i] + k112[i + k * equationCount];
468    }
469    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
470    {
471        k114[i + k * equationCount] = Func(k113_help, i, equationCount, coefficients) * step;
472    }
473    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
474    {
475        k115_help[i] = initialValues[i] + k114[i + k * equationCount];
476    }
477    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
478    {
479        k116[i + k * equationCount] = Func(k115_help, i, equationCount, coefficients) * step;
480    }
481    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
482    {
483        k117_help[i] = initialValues[i] + k116[i + k * equationCount];
484    }
485    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
486    {
487        k118[i + k * equationCount] = Func(k117_help, i, equationCount, coefficients) * step;
488    }
489    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
490    {
491        k119_help[i] = initialValues[i] + k118[i + k * equationCount];
492    }
493    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
494    {
495        k120[i + k * equationCount] = Func(k119_help, i, equationCount, coefficients) * step;
496    }
497    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
498    {
499        k121_help[i] = initialValues[i] + k120[i + k * equationCount];
500    }
501    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
502    {
503        k122[i + k * equationCount] = Func(k121_help, i, equationCount, coefficients) * step;
504    }
505    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
506    {
507        k123_help[i] = initialValues[i] + k122[i + k * equationCount];
508    }
509    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
510    {
511        k124[i + k * equationCount] = Func(k123_help, i, equationCount, coefficients) * step;
512    }
513    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
514    {
515        k125_help[i] = initialValues[i] + k124[i + k * equationCount];
516    }
517    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
518    {
519        k126[i + k * equationCount] = Func(k125_help, i, equationCount, coefficients) * step;
520    }
521    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
522    {
523        k127_help[i] = initialValues[i] + k126[i + k * equationCount];
524    }
525    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
526    {
527        k128[i + k * equationCount] = Func(k127_help, i, equationCount, coefficients) * step;
528    }
529    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
530    {
531        k129_help[i] = initialValues[i] + k128[i + k * equationCount];
532    }
533    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
534    {
535        k130[i + k * equationCount] = Func(k129_help, i, equationCount, coefficients) * step;
536    }
537    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
538    {
539        k131_help[i] = initialValues[i] + k130[i + k * equationCount];
540    }
541    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
542    {
543        k132[i + k * equationCount] = Func(k131_help, i, equationCount, coefficients) * step;
544    }
545    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
546    {
547        k133_help[i] = initialValues[i] + k132[i + k * equationCount];
548    }
549    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
550    {
551        k134[i + k * equationCount] = Func(k133_help, i, equationCount, coefficients) * step;
552    }
553    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
554    {
555        k135_help[i] = initialValues[i] + k134[i + k * equationCount];
556    }
557    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
558    {
559        k136[i + k * equationCount] = Func(k135_help, i, equationCount, coefficients) * step;
560    }
561    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
562    {
563        k137_help[i] = initialValues[i] + k136[i + k * equationCount];
564    }
565    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
566    {
567        k138[i + k * equationCount] = Func(k137_help, i, equationCount, coefficients) * step;
568    }
569    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
570    {
571        k139_help[i] = initialValues[i] + k138[i + k * equationCount];
572    }
573    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
574    {
575        k140[i + k * equationCount] = Func(k139_help, i, equationCount, coefficients) * step;
576    }
577    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
578    {
579        k141_help[i] = initialValues[i] + k140[i + k * equationCount];
580    }
581    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
582    {
583        k142[i + k * equationCount] = Func(k141_help, i, equationCount, coefficients) * step;
584    }
585    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
586    {
587        k143_help[i] = initialValues[i] + k142[i + k * equationCount];
588    }
589    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
590    {
591        k144[i + k * equationCount] = Func(k143_help, i, equationCount, coefficients) * step;
592    }
593    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
594    {
595        k145_help[i] = initialValues[i] + k144[i + k * equationCount];
596    }
597    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
598    {
599        k146[i + k * equationCount] = Func(k145_help, i, equationCount, coefficients) * step;
600    }
601    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
602    {
603        k147_help[i] = initialValues[i] + k146[i + k * equationCount];
604    }
605    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
606    {
607        k148[i + k * equationCount] = Func(k147_help, i, equationCount, coefficients) * step;
608    }
609    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
610    {
611        k149_help[i] = initialValues[i] + k148[i + k * equationCount];
612    }
613    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
614    {
615        k150[i + k * equationCount] = Func(k149_help, i, equationCount, coefficients) * step;
616    }
617    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
618    {
619        k151_help[i] = initialValues[i] + k150[i + k * equationCount];
620    }
621    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
622    {
623        k152[i + k * equationCount] = Func(k151_help, i, equationCount, coefficients) * step;
624    }
625    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
626    {
627        k153_help[i] = initialValues[i] + k152[i + k * equationCount];
628    }
629    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
630    {
631        k154[i + k * equationCount] = Func(k153_help, i, equationCount, coefficients) * step;
632    }
633    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
634    {
635        k155_help[i] = initialValues[i] + k154[i + k * equationCount];
636    }
637    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
638    {
639        k156[i + k * equationCount] = Func(k155_help, i, equationCount, coefficients) * step;
640    }
641    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
642    {
643        k157_help[i] = initialValues[i] + k156[i + k * equationCount];
644    }
645    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
646    {
647        k158[i + k * equationCount] = Func(k157_help, i, equationCount, coefficients) * step;
648    }
649    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
650    {
651        k159_help[i] = initialValues[i] + k158[i + k * equationCount];
652    }
653    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
654    {
655        k160[i + k * equationCount] = Func(k159_help, i, equationCount, coefficients) * step;
656    }
657    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
658    {
659        k161_help[i] = initialValues[i] + k160[i + k * equationCount];
660    }
661    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
662    {
663        k162[i + k * equationCount] = Func(k161_help, i, equationCount, coefficients) * step;
664    }
665    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
666    {
667        k163_help[i] = initialValues[i] + k162[i + k * equationCount];
668    }
669    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
670    {
671        k164[i + k * equationCount] = Func(k163_help, i, equationCount, coefficients) * step;
672    }
673    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
674    {
675        k165_help[i] = initialValues[i] + k164[i + k * equationCount];
676    }
677    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
678    {
679        k166[i + k * equationCount] = Func(k165_help, i, equationCount, coefficients) * step;
680    }
681    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
682    {
683        k167_help[i] = initialValues[i] + k166[i + k * equationCount];
684    }
685    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
686    {
687        k168[i + k * equationCount] = Func(k167_help, i, equationCount, coefficients) * step;
688    }
689    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
690    {
691        k169_help[i] = initialValues[i] + k168[i + k * equationCount];
692    }
693    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
694    {
695        k170[i + k * equationCount] = Func(k169_help, i, equationCount, coefficients) * step;
696    }
697    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
698    {
699        k171_help[i] = initialValues[i] + k170[i + k * equationCount];
700    }
701    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
702    {
703        k172[i + k * equationCount] = Func(k171_help, i, equationCount, coefficients) * step;
704    }
705    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
706    {
707        k173_help[i] = initialValues[i] + k172[i + k * equationCount];
708    }
709    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
710    {
711        k174[i + k * equationCount] = Func(k173_help, i, equationCount, coefficients) * step;
712    }
713    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
714    {
715        k175_help[i] = initialValues[i] + k174[i + k * equationCount];
716    }
717    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
718    {
719        k176[i + k * equationCount] = Func(k175_help, i, equationCount, coefficients) * step;
720    }
721    for (int i = 0; i < equationCount; i++)
722   
```

Рис. 8. Вкладка відображення графа станів і переходів

Time	S1	S2	S3	S4	Sum of working states	Sum of downtime states	Sum of refusal states
0	1	0	0	0	1	0	0
10	0.970445533496937	0.009372576704291	0.000474112512187	0.01970777843345	0.970919646009124	0.009372576704291	0.019707777286585
20	0.941764533484154	0.01757623409266	0.001798652619074	0.038860582063946	0.943563186103227	0.01757623409266	0.038860579804112
30	0.913931185125523	0.024730396078825	0.003839342656346	0.057499079479215	0.91777052778187	0.024730396078825	0.057499076139305
40	0.886920436528626	0.030942879947023	0.006477054322423	0.07565963589993	0.893397490851049	0.030942879947023	0.075659629201929
50	0.860707976196358	0.036311008018612	0.009606273468664	0.093374747721608	0.870314249665022	0.036311008018612	0.093374742316366
60	0.835270211144944	0.040922613318374	0.013133714442998	0.110673467486041	0.848403925587942	0.040922613318374	0.110673461093684
70	0.810584254668654	0.044856949333993	0.016977069632351	0.1275817427153	0.827561315301005	0.044856949333993	0.127581735365002
80	0.786627860732129	0.048185513001537	0.021063881219505	0.144122753326758	0.807691741951633	0.048185513001537	0.144122745046829
90	0.763379493971744	0.050972789180426	0.025330523409757	0.160317202620157	0.788710017381502	0.050972789180426	0.160317193438072
100	0.740818220288031	0.053276924094867	0.029721284504327	0.176183581170351	0.770539504792358	0.053276924094867	0.176183571112775
110	0.71892373301167	0.055150334507025	0.034187539212203	0.191738404176297	0.75311127223872	0.055150334507025	0.191738393269103
120	0.697676325626119	0.056640258743226	0.038687002510156	0.206996424852202	0.736363328136275	0.056640258743226	0.206996413120499
130	0.677056874030421	0.057789255111825	0.043183057191214	0.221970826198382	0.720239931221636	0.057789255111825	0.221970813666539
140	0.65704681932622	0.05863565272414	0.047644147993264	0.236673393264711	0.704690967319484	0.05863565272414	0.236673379956376
150	0.637628151113499	0.059213959252812	0.052043235879229	0.251114667816338	0.689671386992728	0.059213959252812	0.25111465375444
160	0.618783391280005	0.059555229730301	0.056357306655254	0.265304087127592	0.675140697935259	0.059555229730301	0.26530407233446
170	0.600495578269768	0.059687400099652	0.060566928669648	0.279250108463743	0.661062506939417	0.059687400099652	0.279250092960932
180	0.582748251816557	0.059635588876305	0.064655854838642	0.292960320659995	0.647404106655198	0.059635588876305	0.292960304468497
190	0.565525438128526	0.059422369959916	0.0686106647003	0.30644154407109	0.634136102828826	0.059422369959916	0.306441527211258
200	0.548811635510726	0.059068019345872	0.072420442609821	0.319699920041994	0.621232078120547	0.059068019345872	0.319699902533581
210	0.532591800412533	0.058590738224365	0.076076488562	0.332740990938928	0.608668288974533	0.058590738224365	0.332740972801102

Рис. 9. Результат роботи модуля

Таблиця. Тривалість розв'язання систем диференціальних рівнянь різними програмними засобами

№	Кількість рівнянь	Тривалість роботи					
		модуля, с	Matlab, с	Mathcad, с	Scilab, с	Matlab API, с	Scilab API, с
1	3	0,0827	0,0691	0,0701	0,0801	1,123	1,902
2	15	0,142	0,135	0,129	0,139	1,271	2,235
3	63	0,196	0,184	0,178	0,194	1,491	2,498
4	255	0,221	0,190	0,195	0,230	1,702	2,635
5	1023	0,299	0,250	0,274	0,302	1,995	2,891
6	4095	0,402	0,320	0,307	0,406	2,002	3,000
7	7789	0,559	0,500	0,530	0,551	2,254	3,152
8	12789	0,692	0,586	0,575	0,680	2,392	3,302
9	20548	0,721	0,642	0,652	0,706	2,525	3,502
10	29632	0,803	0,713	0,703	0,789	2,878	3,789
11	51789	1,127	0,981	0,932	1,103	3,541	4,256
12	121481	2,154	1,571	1,612	1,901	5,032	6,120

Виконано тестування швидкодії роботи розробленого модуля і перелічених вище програмних засобів. Також виконані тестові запуски безпосередньо в програм-

них засобах і в розробленому модулі із використанням API функцій Matlab і Scilab Online. Результати наведено в таблиці та на рис. 10.

Рис. 10. Залежність тривалості роботи компонент від кількості рівнянь для різних систем

Дані із таблиці та графіку свідчать про те, що розроблений модуль для розв'язку системи диференціальних рівнянь дещо поступається у швидкодії програмним засобам Matlab і Mathcad, і майже на рівні працює з он-лайн сервісом Scilab. Також, на основі досліджень, випливає, що розроблений модуль працює значно швидше, ніж ПЗ із використанням API функцій. Це відбувається тому, що більшість часу витрачається на відправлення, опрацювання і отримання даних у виконавчі середовища, аніж розв'язок рівнянь у цих середовищах.

Враховуючи отримані результати, можна зробити висновок, що найдоцільніше використовувати власний модуль для розв'язку, хоча він і повільніший, ніж відомі програмні засоби, але використання цих засобів за допомогою API функцій є недоцільним, оскільки багато часу витрачається на зв'язок з середовищем.

Висновки. У роботі представлено програмний модуль розв'язування систем диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для автоматизації надійнісного проектування. Розроблений модуль дає змогу розв'язувати системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена методом Рунге-Кутта без залучення спеціалізованих програмних продуктів (Matlab, Mathcad) для аналізу структурних схем надійності та автоматизованого визначення надійнісних показників складних технічних систем. Представлений модуль, за рахунок інтеграції в програмний комплекс автоматизації надійнісного проектування, дає змогу в 2-3 рази швидше, ніж програмні додатки з використанням API-функцій спеціалізованих програмних продуктів (Matlab, Mathcad), опрацьовувати вхідні дані великих об'ємів та візуалізувати отримані результати обчислень. Використання програмного модуля розв'язування систем диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для надійнісного проектування також знімає проблему купівлі ліцензій спеціалізованих програмних продуктів (Matlab, Mathcad).

Перелік використаних джерел

- Bennetts, R. G. (1982). Analysis of Reliability Block Diagrams by Boolean Techniques. *IEEE transactions on reliability*, R-31(2), 159–166.
- Bobalo, Yu., Yakovyna, V., Seniv, M., & Symets, I. (2018). Technique of automated construction of states and transitions graph for the analysis of technical systems reliability. *Proceedings of the 13th International scientific and technical conference CSIT-2018*, (pp. 314–317). September 11–14. Lviv.
- Catelani, M., Ciani, L., & Venzi, M. (2014). Improved RBD analysis for reliability assessment in industrial application. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, (pp. 670–674). IEEE, Montevideo, Uruguay. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2014.6860827>
- Commander. (2019). RAM Commander. Retrieved from: <http://www.alldsoftware.com>, last accessed 2018/12/20.
- Du, X., Guo, J., & Beeram, H. (2008). Sequential optimization and reliability assessment for multidisciplinary systems design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 35(2), 117–130. <https://doi.org/10.1007/s00158-007-0121-7>
- Gorbatyy, I. V. (2014). Investigation of the technical efficiency of state-of-the-art telecommunication systems and networks with limited bandwidth and signal power. *Automatic Control and Computer Sciences*, 48(1), 47–55. <https://doi.org/10.3103/S0146411614010039>
- Modarres, M., Kaminskiy, M., & Krivtsov, V. (1999). *Reliability Engineering and Risk Analysis*. Marcel Dekker, NYC, NY USA.
- Polovko, A. M., & Gurov, S. V. (2006). *The basics of reliability theory*. St. Petersburg: BHV-Peterburg, 704 p.
- Seniv, M., Yakovyna, V., & Symets, I. (2018). Software for visualization of reliability block diagram and automated formulation of operability conditions of technical systems. *Perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH2018): Proceedings of the 14th International Conference*, (pp. 191–195). April 18–22. Lviv – Polyana.
- Software. (2019). Relx Software. Retrieved from: <http://www.relexsoftware.it>, last accessed 2019/05/17.
- Volochiy, B. Ya. (2004). *Technology of modeling algorithms for behavior of information systems*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 220 p.
- Workbench. (2019). Reliability Workbench. Retrieved from: <http://www.armsreliabilitysoftware.com/software-solutions>, last accessed 2018/06/15.

V. S. Yakovyna, M. M. Seniv, V. V. Lytvyn, I. I. Symets
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

SOFTWARE MODULE OF SOLVING SYSTEMS OF CHAPMAN-KOLMOGOROV DIFFERENTIAL EQUATIONS FOR AUTOMATION OF RELIABLE DESIGN

The extremely important component of the quality of complex technical systems is their reliability, that is, the specific feature of the system to perform specified functions, while maintaining the value of operational characteristics within the specified limits, conforming to the conditions of use and the specified modes of maintenance, storage and transportation. The current state of development of the methods for analysing the reliability of technical systems is characterized by a combination of analytical research methods of reliability with the computing capabilities of modern computer facilities. Technical systems are characterized by a large number of elements (modules) and, consequently, large dimensions of space of the states that can reach tens and hundreds of thousands of states, which make it virtually impossible to analyze them without the use of computation power of computer facilities. Therefore, the relevant problem is the automation of complex technical systems modeling which, when the appropriate level of model formalization is provided, enables model development and reliability analysis using modern computers. This publication describes the software module for the automated solution of the systems of Chapman–Kolmogorov differential equations, which are an integral part of the software complex for automation of reliable design of complex technical systems. The developed module allows solving systems of Chapman–Kolmogorov differential equations without the involvement of specialized software products (Matlab, Mathcad), for the analysis of structural schemes of reliability and automated determination of reliability indexes of complex technical systems. The presented module, by integrating into a software automation complex of reliable design, enables more rapid processing of large volumes of input data and visualizing the obtained results of calculations.

Keywords: software; reliability; reliability block diagram (RBD); states and transitions graph.