

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ДОРОЖИНСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 004.042/519.713.2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ СПЕЦИФІКАЦІЇ ТА  
АНАЛІЗУ КОМПОНЕНТІВ КЕРОВАНИХ ПОДІЯМИ  
СИСТЕМ

01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків — 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Жолткевич Григорій Миколайович,  
Харківський національний університет імені  
В. Н. Каразіна, професор кафедри теоретичної  
та прикладної інформатики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Федорович Олег Євгенович,  
Національний аерокосмічний університет імені  
М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний  
інститут» МОН України, завідувач кафедри  
інформаційних управляючих систем;  
кандидат технічних наук, доцент  
Селівьорстова Тетяна Віталіївна,  
Національна металургійна академія України,  
м. Дніпро, МОН України, доцент кафедри  
інформаційних технологій та систем.

Захист відбудеться «10» березня 2017 р. о 16<sup>30</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.09 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022 м. Харків, майдан Свободи, 4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Толстолузька О. Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Необхідність забезпечення високого рівня адаптації великих інформаційних та програмних систем призводить до все більш широкого використання архітектурних рішень, що базуються на концепції керування за допомогою подій. Керування такого типу забезпечує достатню гнучкість системи, але водночас, такий підхід призводить до необхідної асинхронної взаємодії компонентів системи. У випадку коли кожне вхідне повідомлення, що допускається компонентами системи, має в собі всю необхідну інформацію для генерації відповіді системи, автоматна модель є найкращим способом специфікації поведінки системних компонентів. В протилежність такому підходу, зазвичай, окремі повідомлення не визначають семантичні значення керуючих команд: такі значення керуючих команд визначаються унікальними послідовностями повідомлень. В такому випадку, теорія автоматів не має достатньої виразності, що необхідна для специфікації поведінки компонентів системи. Таким чином, розробка моделей для специфікації та аналізу класів таких систем наразі є актуальною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано згідно плану науково-дослідних робіт Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в рамках теми "Математичне та комп'ютерне моделювання інформаційних процесів у складних природних та технічних системах" (номер державної реєстрації 0112U002098).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка класу математичних моделей, що має на меті забезпечення можливості специфікації, моделювання структури і поведінки компонентів інформаційних подійно-керованих програмних систем, а також розробка обчислювальних методів аналізу таких моделей, яка дає можливість розширити сферу використання методів статичного аналізу підчас розробки та реінжинірингу таких систем, і завдяки цьому, забезпечити удосконалення процесу їхнього проектування.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені та розв'язані наступні завдання:

1. Провести аналіз тенденцій зміни концепцій розробки струк-

турних рішень великих систем обробки інформації, що проявилися у теорії та на практиці застосування методів програмної інженерії. Зробити висновок щодо розширення використання асинхронних архітектурних рішень, які базуються на подійному керуванні, що в свою чергу обґрунтовує актуальність проблеми удосконалення математичних моделей, які використовуються для статичного аналізу, специфікації та проектування систем цього класу.

2. Провести аналіз існуючих подійнокерованих архітектурних стилів з метою виявлення їхніх інваріантних властивостей, які повинні розглядатися у загальній системній моделі подійно-керованої системи обробки інформації, і на базі цього аналізу побудувати загальну системну модель компоненту подійно-керованої системи обробки інформації.
3. Дослідити властивості потоків складних подій з метою виявлення можливості розпізнавання в них заданих множин складних подій.
4. Обґрунтувати можливість використання абстрактних передавтоматів для математичного моделювання компонентів подійно-керованих систем обробки інформації шляхом доведення дуальності абстрактних передавтоматів та СЕР-машин.
5. Розглянути питання можливості алгоритмічної реалізації СЕР-машин. Виявити можливі аномалії обчислюваності таких машин і запропонувати метод їхнього усунення.
6. Розробити спеціальний клас СЕР-машин, що допускає опис за використанням регулярних мов та побудувати метод синтезу машин цього класу на базі технологій машинного навчання.
7. Розробити прототипи програмних утиліт машинного навчання і статичного аналізу, що забезпечують синтез і верифікацію програмних компонентів подійно-керованих систем обробки інформації і реалізують запропоновані та обґрунтовані в роботі обчислювальні методи.
8. Провести перевірку прототипів програмних утиліт статичного аналізу шляхом їхнього використання під час розробки програмного забезпечення.

Об'єктом дослідження є інформаційні процеси у подійно-керованих системах обробки інформації.

Предметом дослідження є математичні моделі та обчислювальні методи статичного аналізу програмних компонентів подійно-керованих систем обробки інформації.

Методи дослідження. В роботі застосовані методи теорії автоматів, загальної алгебри, теорії графів, теорії імовірності, системного аналізу, математичної логіки.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна одержаних результатів є в тому, що в роботі розв'язана важлива науково-прикладна задача – удосконалення моделей і розвиток методів статичного аналізу для подійно-керованих систем обробки інформації. Це дозволило удосконалити процес проектування програмного забезпечення систем цього класу за рахунок розширення підчас розробки сфери застосування формальних методів аналізу проектних рішень, при цьому:

1. Вперше, запропоновано клас математичних моделей компонентів подійно-керованих систем – машин обробки складних подій (СЕР-машин), який на відміну від існуючих класів моделей, базується не на скінченних автоматах, а на їхньому узагальненні – скінченних передавтоматах. Це узагальнення дозволило проводити аналіз системних компонентів, які можуть обробляти не тільки атомарні події, а й потоки складних подій, сформулювати структурні та поведінкові властивості СЕР-машин, довести дуальність машин обробки складних подій та передавтоматів і, як наслідок, вивчати поведінку машин обробки складних подій спираючись на властивості передавтоматів.
2. Вперше, запропоновано спеціальний клас обробників складних подій – клас регулярних акцепторів, та для машин цього класу розроблено метод машинного навчання, який, на відміну від існуючих аналогів, дає можливість суттєво спростити процес аналізу можливих комбінацій подій під час розробки компонентів подійно-керованої системи, що дозволило суттєво спростити процес проектування таких систем.
3. Удосконалено критерій оцінки можливості обробки потоків складних подій, що дозволило зробити висновки щодо можливості розпізнавання та обробки тих чи інших складних

подій.

4. Отримав подальший розвиток важливий для застосувань метод розв'язання задачі синтезу обробників подій із заданою поведінкою, який був узагальнений на випадок передавтоматних моделей, що дозволило, задаючи поведінку за допомогою функції відгуку, синтезувати машину обробки складних подій, яка реалізує цю поведінку.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що всі теоретичні розробки доведені автором до конкретних інженерних методик, алгоритмів та реалізовані у вигляді прототипів програмних засобів, що базуються на дослідженні побудованих в роботі математичних моделей та використанні розроблених обчислювальних методів. Зокрема, реалізовано пакет програмних утиліт аналізу та синтезу машин обробки складних подій, що включає в себе:

1. Утиліту синтезу регулярного обробника складних подій заснованого на множинах прикладів та контрприкладів складних подій. Синтезований обробник допускає всі складні події із множини прикладів і відкидає всі складні події із множини контрприкладів.
2. Утиліту, що реалізує метод машинного навчання, синтезованого на підставі множин прикладів та контрприкладів, регулярного обробника.
3. Генератор регулярних виразів, що необхідний для генерації тестових регулярних обробників.
4. Утиліту аналізу глибини та дисбалансу синтаксичного дерева регулярних виразів.

Практична цінність роботи підтверджується також використанням її результатів підчас виконання проектів розробки програмного забезпечення в компаніях, що розробляють розподілені інформаційні системи. Акти про використання результатів роботи представлені у додатках до дисертації.

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Вони викладені у шістьох роботах, п'ять з яких опубліковані у виданнях, рекомендованих для публікацій результатів дисертаційних робіт, а одна – у матеріалах

міжнародних конференцій та семінарів. В цих роботах автору належать такі результати:

1. Проведено аналіз існуючих моделей обробки складних подій та запропоновано набір інваріантів, узагальнення яких призвело до формулювання математичної моделі компоненту системи обробки складних подій [1, 2].
2. Описано клас регулярних машин обробки складних подій, а також досліджені їхні властивості [3, 4].
3. Запропоновано метод практичного застосування регулярних СЕР-машин підчас розробки засобів управління та оптимізації трафіку у розподілених інформаційних системах [5].
4. Розроблено алгоритм навчання регулярного акцептора [6].
5. Вивчені сфери практичного застосування машинного навчання регулярних акцепторів [7].
6. Розроблені алгоритми генерації тестових регулярних акцепторів, що використовуються підчас верифікації вірності метода навчання [8].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися на:

1. X Міжнародна конференція ICTERI-2014 "Information Communication Technologies in Education, Research and Industry" (Херсон, 2014);
2. XII Міжнародна конференція КУСС "Контроль і Управління у Складних Системах" (Вінниця, 2014);
3. XXI Всеукраїнська наукова конференція "Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики" (Львів, 2015);
4. XII Міжнародна конференція ICTERI-2016 "Information Communication Technologies in Education, Research and Industry" (Київ, 2016).

Публікації. За результатами наукових досліджень опубліковано 5 наукових статей у виданнях, що входять до переліку видань, рекомендованих до публікацій результатів дисертаційних досліджень, та 3 доповіді на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Загальний обсяг роботи становить 131 сторінку, у тому числі: основний текст на 112 сторінках, містить 7 рисунків, перелік використаних джерел із 139 найменувань на 14 сторінках та 2 додатки на 4 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Дамо коротку характеристику роботи.

У першому розділі проводиться детальний огляд сучасних тенденцій розвитку в області інформаційних технологій. Зокрема, проводиться аналіз розвитку архітектур компонентів інформаційних систем, що базуються на подійно-керованому підході. Наводиться неформальне визначення поняття "подія", Розглядаються всі можливі типи подій, а також способи їхньої обробки. Вказується перевага подійно-орієнтованих архітектурних рішень у порівнянні з послідовною пакетною обробкою інформації. Проводиться огляд існуючих підходів до обробки складних подій, можливих сфер їхнього застосування, а також їхніх недоліків. Також проводиться огляд взаємозв'язку концепцій обробки подій та методів машинного навчання. Показується, що ці дві концепції можуть комбінуватися підчас удосконалення методів проектування великих розподілених подійно-керованих систем. Заключна частина розділу включає огляд прикладів використання подійно-керованих систем у сучасних телекомунікаційних мережах, які використовують хмарні технології.

Другий розділ присвячений побудові математичної моделі компоненту системи обробки складних подій. На початку розділу наводяться формальні поняття й означення базовані на аналізі інваріантів існуючих підходів до обробки складних подій. Наводиться формальне означення простої та складної події та проводиться порівняльний аналіз їхньої обробки.

Визначення 1 (Атомарні та складні події). Будемо говорити, що подія є атомарною, якщо її неможливо представити як сукупність інших подій, що мають зміст у відповідній предметній області. В протилежність атомарній події, будемо говорити, що подія є складною, якщо вона може бути представлена як сукупність інших подій,



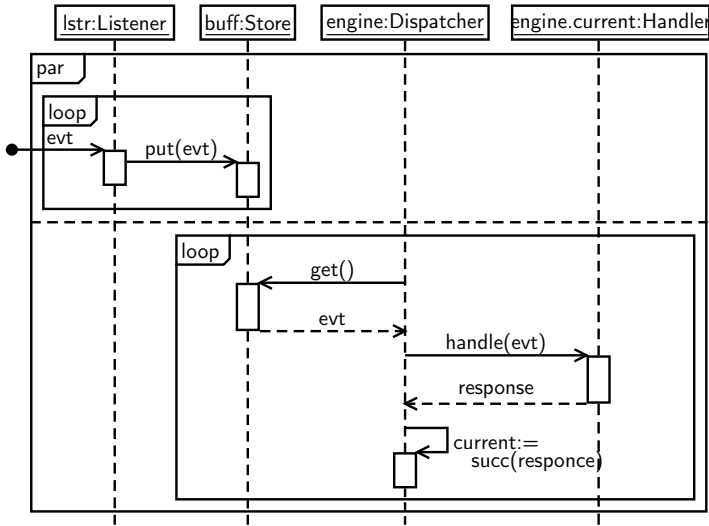


Рис. 1. Обробка простих подій

що мають зміст у відповідній предметній області.

Як показано на рис. 1 функція-обробник обробляє атомарні події як тільки отримані повідомлення щодо їхнього настання. В протилежність обробці простих подій на рис. 2 обробник складних подій аналізує вхідний буфер атомарних подій, щоб розпізнати складну подію. Якщо обробнику вдалося розпізнати складну подію, то вона обробляється і видаляється з буфера.

Далі, в розділі наводиться формальна модель системи обробки складних подій. Описується її структура, поведінка, а також властивості.

Визначення 2 (СЕР-машина). Абстрактна машина обробки складних подій це четвірка  $\mathcal{M} = (\Sigma, A, H, \delta)$  де  $\Sigma$  і  $A$  скінченні алфавіти подій та відповідей,  $H = \{h|h: \Sigma^+ \dashrightarrow A\}$  скінченна множина обробників подій,  $\delta: A \rightarrow H$  всюди визначене відображення, яке називається відображенням переходів.

Наводиться характеристика потоків складних подій, які можуть

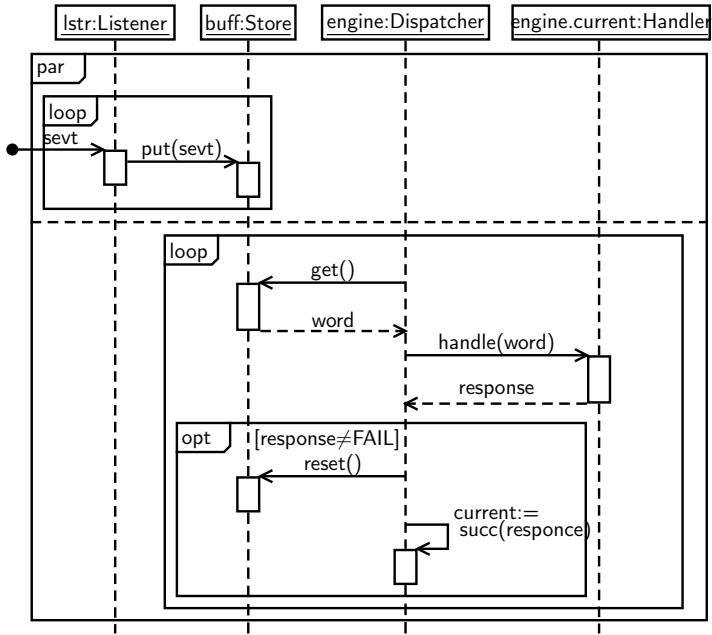


Рис. 2. Обробка складних подій

бути оброблені даною моделлю.

Для визначення поведінки СЕР-машини розглянемо множину  $\Sigma^\omega$ , яка складається зі всіх нескінченних послідовностей елементів, що належать  $\Sigma$ . Такі послідовності будемо називати потоками подій. Зафіксуємо часткове відображення  $T_h : \Sigma^\omega \dashrightarrow \mathbb{N}$  для будь-якого обробника  $h \in H$  задавши такі умови

$$\begin{aligned} T_h(\pi) \downarrow = t & \quad \text{якщо } \pi_{[1..t]} \in Dh; \\ T_h(\pi) \uparrow & \quad \text{якщо } (\forall t \in \mathbb{N}) h(\pi_{[1..t]}) \uparrow. \end{aligned} \quad (1)$$

Визначення 3 (Конфігурація). Пару  $\langle h, \pi \rangle \in H \times \Sigma^\omega$  будемо називати конфігурацією.

Визначення 4 (Еволюційний оператор СЕР-машини). Нехай  $\mathcal{M} = (\Sigma, A, H, \delta)$  СЕР-машина, тоді часткове відображення з множини кон-

фігурацій у себе  $S : H \times \Sigma^\omega \dashrightarrow H \times \Sigma^\omega$ , що визначається умовами

$$\begin{aligned} S\langle h, \pi \rangle \downarrow &= \langle \delta(h(\pi_{[1..t]})), \pi_{(t..)} \rangle && \text{якщо } T_h(\pi) \downarrow = t \\ S\langle h, \pi \rangle \uparrow &&& \text{якщо } T_h(\pi) \uparrow \end{aligned}$$

буде називатися еволюційним оператором (an evolutionary operator) СЕР-машини.

Для специфікації коректної поведінки СЕР-машини визначимо її правильні сценарії роботи, які називаються потоками обробки.

Визначення 5 (поток обробки). Нехай  $\mathcal{M} = (\Sigma, A, H, \delta)$  СЕР-машина і  $\langle \langle h^{(t)}, \pi^{(t)} \rangle \mid t = 0, 1, \dots \rangle$  послідовність конфігурацій із  $H \times \Sigma^\omega$ , тоді вона називається потоком обробки, якщо виконується наступне рівняння

$$\langle h^{(t+1)}, \pi^{(t+1)} \rangle = S\langle h^{(t)}, \pi^{(t)} \rangle \text{ для всіх } t \geq 0.$$

У розділі доводиться дуальність запропонованої формальної моделі обробки складних подій та концепції передавтоматів.

Визначення 6 (Передавтомат). Трійка  $(X, \Sigma, \mu)$ , де  $X$  деяка множина,  $\Sigma$  скінченний алфавіт і  $\mu : X \times \Sigma^* \dashrightarrow X$  часткове відображення, називається передавтоматом, якщо виконуються наступні умови:

1. рівність  $\mu(x, \varepsilon) \downarrow = x$  виконується для всіх  $x \in X$ ;
2. якщо твердження  $\mu(x, u) \downarrow$  та  $\mu(\mu(x, u), v) \downarrow$  істинні для деяких  $x \in X$  и  $u, v \in \Sigma^*$ , тоді твердження  $\mu(x, uv) \downarrow = \mu(\mu(x, u), v)$  також є істинне ;
3. якщо твердження  $\mu(x, u) \downarrow$  і  $\mu(x, uv) \downarrow$  є істинні для деяких  $x \in X$  та  $u, v \in \Sigma^*$ , тоді твердження  $\mu(\mu(x, u), v) \downarrow = \mu(x, uv)$  також є істинне.

Для СЕР-машини  $\mathcal{M} = (\Sigma, A, H, \delta)$  асоційований із нею передавтомат буде мати вигляд трійки  $\widehat{\mathcal{M}} = (H, \Sigma, \mu)$ , такий, що часткове відображення  $\mu : H \times \Sigma^* \dashrightarrow H$  задовольняє таку умову:

$$\begin{aligned} \text{для будь-яких } h \in H, w \in Dh, \text{ і } \pi \in \Sigma^\omega \\ \text{кон'юнкція } \mu(h, w) \downarrow \text{ і } S\langle h, w \cdot \pi \rangle \downarrow = \langle \mu(h, w), \pi \rangle \text{ істинна} \end{aligned} \quad (2)$$

Далі, використовуючи факт дуальності запропонованої у розділі моделі та передавтомата, розглядається важливе для інженерних застосувань питання синтезу компонентів системи обробки складних подій, що базуються на заданій поведінці.

Теорема 1 (Про синтез СЕР-машини). Нехай  $\Sigma$  і  $A$  скінченні алфавіти, а  $\beta : \Sigma^+ \dashrightarrow A$  часткове відображення, що задовольняє (3), тоді існує ініціальна СЕР-машина  $\mathcal{M} = (\Sigma, A, H, h_*, \delta)$ , і при цьому її функція відгуку співпадає з  $\beta$ .

$$uw \in D\beta \text{ забезпечує } vw \in D\beta \text{ і } \beta(uw) = \beta(vw). \quad (3)$$

Заклучна частина розділу присвячена питанню обчислюваності та алгоритмічної реалізуемості запропонованої моделі обробки складних подій. Доводиться критерій, що визначає можливість алгоритмічної реалізуемості у залежності від питання обчислюваності окремих обробників складних подій.

Теорема 2 (Про розв'язність задачі зупинки для обробників подій). Нехай  $\Sigma$  і  $A$  скінченні алфавіти,  $h : \Sigma^+ \dashrightarrow A$  обчислюваний обробник подій, а  $\pi \in \Sigma^\omega$  потік подій тоді, предикат  $M(\pi) \cong \exists n h(\pi_{[1..n]}) \downarrow$  є розв'язним відносно  $g(n) = \pi_{[1..n]}$ .

У третьому розділі розглядається спеціальний клас моделей систем обробки складних подій, що працюють з потоками подій, які описуються регулярними мовами. Детально описується спеціальний клас регулярних обробників складних подій, що формують модель системи обробки регулярних складних подій.

Визначення 7 (регулярний обробник). Обробник  $h : X^+ \dashrightarrow Y$  називається регулярним якщо існують

- деяка скінченна множина  $Z$  із відміченим елементом  $z_0 \in Z$  і
- деяке відображення  $\delta : Z \times X \rightarrow Z \cup Y$

такі, що для будь-якого  $u \in X^+$  та  $y \in Y$  умова  $h(u) \downarrow = y$  виконується тоді і тільки тоді, коли існують  $z_1, \dots, z_{|u|-1} \in Z$  такі, що

$$\begin{aligned} z_{i+1} &= \delta(z_i, u[i]) \text{ для } 0 \leq i < |u| - 1 \text{ і} \\ y &= \delta(z_{|u|-1}, u[|u|]). \end{aligned}$$

Вивчаються властивості таких обробників. Зокрема, доводиться можливість їхньої реалізації скінченими детермінованими автоматами. Наводиться алгоритм роботи моделі обробки складних регулярних подій та її властивості.

Визначення 8 (Регулярна машина обробки складних подій). Будь-яка регулярна СЕР-машина це п'ятірка  $M = (X, Y, H, h_0, \alpha)$ , що складається з таких компонентів:

- $X$  – скінченна множина (алфавіт) атомарних подій;
- $Y$  – скінченна множина (алфавіт) відповідей машини;
- $H$  – скінченна множина регулярних обробників;
- $h_0 \in H$  – початковий обробник;
- $\alpha: Y \rightarrow H$  – функція відгуку.

Алгоритм 1 описує поведінку будь-якої регулярної CEP-машини [7].

---

Algorithm 1. Operational model of a Regular CEP-machine

---

```

1 def run( $M, s$ ):
    Require: the studied Regular CEP-machine  $M = (X, Y, H, h_0, \alpha)$ 
           and some stream of elementary events  $s \in X^\omega$ 
    Ensure : printing of the corresponding response stream
2   handler, buff =  $h_0, []$ 
3   while True:
4       new_event,  $s = s[0], s[1 : ]$ 
5       buff.append(new_event)
6       if handler(buff)  $\uparrow$ : continue
7       else:
8           response = handler(buff)
9           print(response)      # printing of the current
                                response
10          handler, buff =  $\alpha(\text{response}), []$ 

```

---

Доводиться можливість перетворення моделі обробки складних регулярних подій на автоматну, шляхом глобалізації дуальної передавтоматної моделі. Подальша частина розділу присвячена методу машинного навчання регулярних обробників.

Задача 1. Нехай  $E = \{u_1, \dots, u_M\} \subset X^+$  це скінченна префіксна множина подій, а  $C = \{v_1, \dots, v_N\} \subset X^+$  – скінченна множина слів такі, що  $E \cap C = \emptyset$ , тоді будемо інтерпретувати елементи множини  $E$  як приклади, а елементи множини  $C$  як контрприкладі; необхідно знайти регулярний акцентор  $h: X^+ \dashrightarrow \{\text{accepted}\}$  такий, що виконуються такі умови:

1.  $h(u_i) \downarrow = \text{accepted}$  для всіх  $0 \leq i < M$ ;
2.  $h(v_i) \uparrow$  для всіх  $0 \leq i < N$ ;  $i$
3. регулярний акцептор є мінімальним.

Загальний вигляд метода побудови акцептора представлений на рисунку 3 у вигляді UML діаграми активності.

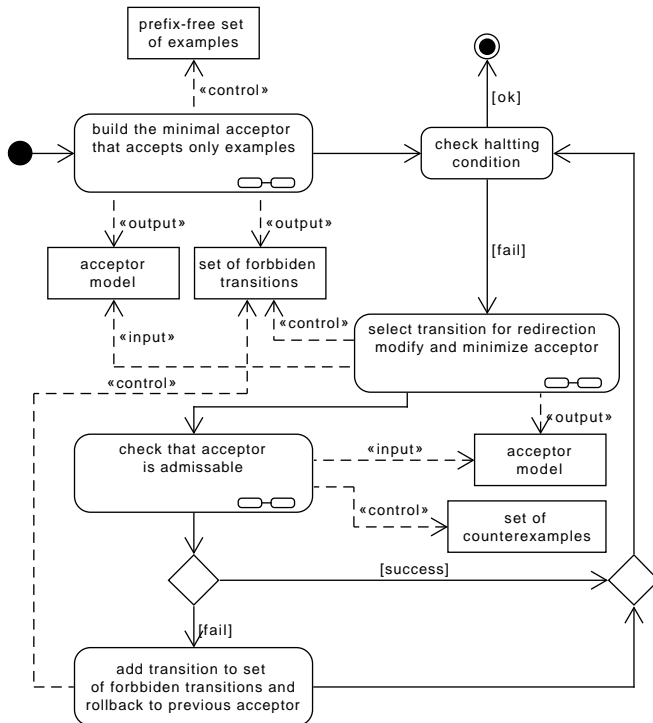


Рис. 3. Загальна схема метода навчання регулярного акцептора

Показується, що такий підхід може значно спростити процес проектування подійно-керованих систем. Далі, у розділі детально описується комп'ютерний експеримент, що верифікує правильність метода навчання.

Схема експерименту представлена у вигляді UML діаграми на рис. 4.

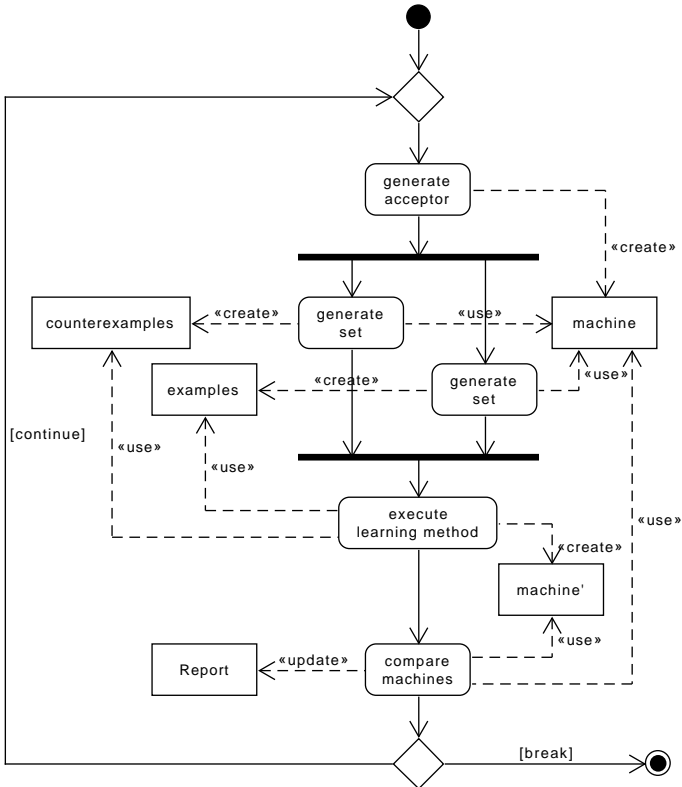


Рис. 4. Загальна схема експерименту верифікації метода навчання

Заключна частина розділу присвячена способам імплементації цього експерименту.

Четвертий розділ присвячений практичному застосуванню моделі обробки складних регулярних подій у засобах управління тра-

фіком у розподілених інформаційних системах. Наводяться існуючі способи управління мережами. Розглядається задача формування трафіку в мережах, розв'язання якої є одним з ключових факторів покращення продуктивності розподілених інформаційних систем. Подальша частина розділу присвячена опису способу застосування моделі обробки складних регулярних подій для розв'язання задачі формування трафіку у вузлі мережі.

Схема взаємодії компонентів системи управління трафіком представлена на рисунку 5. На наведеній схемі  $X^\omega$  позначає вхідний до

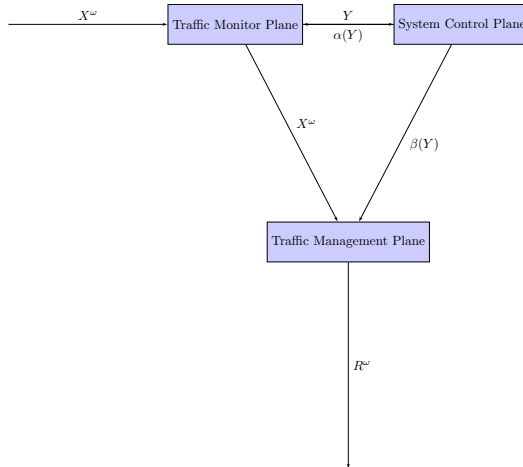


Рис. 5. Схема взаємодії компонентів системи управління трафіком

вузла мережі трафік, тоді як  $R^\omega$  – вихідний відповідно. На початку вхідний трафік  $X^\omega$  аналізується System Traffic Monitor Plane компонентом щодо можливих подій або аномалій. Далі, System Traffic Monitor Plane модуль перенаправляє даний трафік до System Traffic Management Plane де за допомогою заданих System Control Plane модулем правил він оптимізується і формується вихідний трафік  $R^\omega$ . Якщо компонент System Traffic Monitor Plane виявляє деяку подію або аномалію у вхідному трафіку  $X^\omega$ , то повідомлення про це  $y \in Y$  відправляється модулю System Control Plane. Далі, System Control Plane модуль обробляє подію що виникла, і відправляє керуючі по-



відомлення  $\alpha(y)$  та  $\beta(y)$ ,  $y \in Y$  компонентам System Traffic Monitor Plane та System Traffic Management Plane відповідно.

Далі, у розділі наводиться приклад імплементації телекомунікаційної мережі, що використовує описаний вище розв'язок. Зокрема, показується, що застосування хмарних технологій значно розширює можливість використання запропонованого розв'язання задачі формування трафіку. У заключній частині розділу обговорюється ефективність запропонованого метода, а також наводяться результати порівняльного тестування продуктивності мережі, яке базується на критеріях оцінки якості обслуговування у мережах.

Завершують роботу загальні висновки, список використаних джерел та додатки.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі розв'язана важлива науково-прикладна задача – удосконалення моделей і розвиток методів статичного аналізу для подійно-керованих систем обробки інформації. Був проведений детальний огляд задач та застосувань у яких поняття "подія" відіграє ключову роль. Було показано, що на сьогодні існує багато моделей, які описують системи, що базуються на подіях. Аналіз таких моделей призвів до формулювання задач, що розв'язуються в роботі.

Побудована математична модель систем обробки складних подій. Цей процес базувався на відомих прикладах програмних рішень для таких систем та їхніх узагальнень. Узагальнення інваріантів для таких прикладів призвело до формулювання математичної моделі, яка була названа CEP-машиною (Complex Event Processing machine). Модель описана з двох точок зору: структурної та поведінкової. Для опису поведінкової частини моделі, у роботі було введено багато формальних понять.

Основні властивості CEP-машин вивчалися базуючись на цих формальних поняттях. Зокрема, сформульований і доведений критерій можливості розпізнавання потоків складних подій. Його суть в тому, що або обробник подій може розпізнати нескінченну кількість складних подій і в такому випадку, обробка потоків подій неможлива, або обробник може обробити будь-який потік подій, і в такому випадку,

можливе розпізнавання тільки скінченної кількості складних подій.

Також у роботі, вперше, був встановлений дуже важливий результат, що підтверджує дуальність між СЕР-машинами та передавтоматами. Цей результат дає можливість вивчати поведінку СЕР-машин.

У роботі було показано, що важливим завданням для застосувань є задача синтезу СЕР-машини із заданою поведінкою, яка задається функцією відгуку. Доведена теорема, яка описує і дає підґрунтя для розв'язання цієї задачі.

У роботі розв'язане питання алгоритмічної реалізуємості СЕР-машин. Теорема про алгоритмічну реалізуємість СЕР-машини доводить, що умова обчислюваності обробників подій СЕР-машини є достатньою для її алгоритмічної реалізуємості.

Далі, в роботі розглядалися системи обробки складних подій, у яких потоки подій можна описати регулярною мовою. Вперше був запропонований деякий спеціальний клас обробників складних подій. Такі обробники подій були названі регулярними. Було доведено, що регулярний обробник може бути реалізований за допомогою скінченного автомата.

Базуючись на понятті регулярного обробника, у роботі представлений важливий клас СЕР-машин, які були названі регулярними. Наведений алгоритм, що описує поведінку таких машин. Доведено, що регулярна СЕР-машина може бути перетворена на детермінований скінченний автомат, який є глобалізацією дуального передавтомата цієї регулярної СЕР-машини.

Отримані результати є важливими та корисними у моделюванні і розробці систем обробки складних подій, що можуть розпізнавати такі події, які можливо описати регулярною мовою.

Подальше дослідження отриманих результатів призвело до розробки метода машинного навчання для регулярних обробників з одним допускаючим станом (регулярних акцепторів). Також була розроблена та детально описана процедура верифікації правильності метода. Було показано, що цей метод може використовуватися підчас проектування та розробки систем базованих на архітектурі керованій подіями. Перевагою метода є те, що аналіз всіх можливих комбінацій подій може бути замінений навчанням на етапі виконання. Далі, у роботі був описаний комп'ютерний експеримент, що базується на

процедурі верифікації, який показав, що метод навчання відновлює тестовану СЕР-машину.

У роботі представлені приклади використання регулярних СЕР-машин підчас проектування систем управління та оптимізації трафіку у мережах. Також, в роботі є приклад імплементації сучасної телекомунікаційної мережі. Показано, що поєднання використання систем оптимізації трафіку, базованих на регулярних СЕР-машинах, а також "хмарних" технологій може значно покращити ключові показники продуктивності мережі. Оскільки, системи оптимізації трафіку, базовані на регулярних СЕР-машинах, дозволяють ефективно розпізнавати можливі аномалії підчас передачі трафіку через мережу. А "хмарні" технології дозволяють гнучко реагувати на ті або інші аномалії, шляхом збільшення кількості доступних обчислювальних ресурсів на вже діючих вузлах мережі, або активізації додаткових вузлів для розширення передаючих можливостей.

Наведені результати тестування продуктивності мережі за основними показниками якості обслуговування (QOS). Отримані результати показують хороший приріст продуктивності мережі, зокрема, підчас передачі мультимедіа потоків даних. Що дозволяє стверджувати, що запропонований метод є достатньо ефективний у проектуванні систем оптимізації і формування трафіку.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Zholtkevych G., Novikov B., Dorozhinsky V. Pre-automata and complex event processing // CCIS. — Switzerland: Springer International Publishing, 2014. — Vol. 469. — Pp. 100–116. (Indexed by Scopus).
2. Zholtkevych G., Dorozhinsky V. Complex event processing in control problem solving // Measurement and Control in Complex Systems (MCCS-2014): XII International Conference, Vinnytsia, 14–16 October 2014.: Тези допов. — Vinnytsia: 2014. — P. 27.
3. Dorozhinsky V. Regular complex event processing machines // Information processing systems. — 2015. — Vol. 133, no. 8. — Pp. 82–86. (Indexed by Copernicus, Google Scholar, ISSN 1681–7710).
4. Zholtkevych G., Dorozhinsky V. A regular complex event processing // Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики

- APAMCS-2015: XXI Всеукраїнська наукова конференція, Львів, 24–25 вересня 2015 р.: Тези допов. — Львів: 2015. — Рр. 46–48.
5. Дорожинский В., Жолткевич Г. Регулярная обработка событий в управлении телекоммуникационными сетями // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2015. — Т. 35, № 3. — С. 70–76. (Журнал індексується Google Scholar, ISSN 2073–7394).
  6. Dorozhinsky V., Khadikov A., Zholtkevych N. Machine learning methods and “real-time” economics // ICTERI 2016. — Kiev: CEUR-WS.org/Vol-1614 urn:nbn:de:0074-1614-7, 2016. — Vol. 1614. — Рр. 469–476. (Indexed by Scopus).
  7. Zholtkevych G., Dorozhinsky V., Khadikov A. Real-time event processing and machine learning methods // Weapons systems and military equipment. — 2016. — Vol. 46, no. 2. — Рр. 79–83. (Indexed by Scientific Indexed Service (USA), Copernicus (Poland), Universal Impact Factor, Open Academic Journals Index, Academic Resource Index, Google Scholar, ISSN 1997–9568).
  8. Zholtkevych G., Dorozhinsky V., Khadikov A. Regular event processing and machine learning correctness verification // Information processing systems. — 2016. — Vol. 146, no. 9. — Рр. 162–166. (Indexed by Scientific Indexed Service (USA), Copernicus (Poland), Universal Impact Factor, Open Academic Journals Index, Academic Resource Index, Google Scholar, ISSN 1681–7710).

#### АНОТАЦІЯ

Дорожинський В. В. Математичні моделі для специфікації та аналізу компонентів керованих подіями систем. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи. — Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2016.

Дисертація присвячена дослідженню інформаційних систем, що базуються на подійно-керованому підході. Такі системи отримали широке розповсюдження у сфері обробки інформаційних потоків. У роботі була розв'язана важлива науково-прикладна задача розроб-

ки математичних моделей і методів аналізу подійно-керованих систем. Аналіз існуючих підходів до обробки потоків подій призвів до формулювання та розробки загальної математичної моделі системи обробки складних подій. Така модель була названа СЕР-машиною. Структура та поведінка моделі описані за допомогою чітких математичних формулювань. Доведено, що можливість обробки таких систем визначаються деяким компромісом між класом оброблюваного потоку подій та кількістю складних подій. Далі, у роботі розв'язана задача синтезу СЕР-машини із заданою поведінкою. Були викладені умови алгоритмічної реалізованості СЕР-машини. Наведений клас регулярних СЕР-машин. Такі машини базуються на обробниках (регулярних акцепторах), які можуть обробляти регулярні події. Показано, що машина, що обробляє складні події, які описуються регулярними мовами, може бути перетворена на скінчений автомат. Далі, у роботі пропонується метод машинного навчання необхідний для синтезу регулярних акцепторів. Такий підхід значно спрощує процес проектування систем обробки потоків подій. Також наводиться опис комп'ютерного експерименту, що підтверджує правильність метода навчання. На завершення наводиться приклад використання запропонованої у роботі моделі підчас проектування та розробки підсистеми формування і оптимізації трафіку у розподіленій інформаційній системі.

Ключові слова: передавтомат, складна подія, математична модель, обробка подій, функція відгуку, префіксна множина, регулярна множина, автомат, акцептор, машинне навчання, розподілена інформаційна система, формування трафіку.

## АННОТАЦІЯ

Дорожинский В. В. Математические модели для спецификации и анализа компонентов событийно-управляемых систем — На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 — математическое моделирование и вычислительные методы. — Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Министерства науки и образования Украины, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена исследованию информационных систем базирующихся на событийно-управляемом подходе. Такие системы получили широкое распространение в сфере обработки информационных потоков. В работе была решена важная научно-прикладная задача разработки математических моделей и методов анализа событийно-управляемых систем. Анализ существующих подходов к обработке потоков событий привел к формулировке и разработке общей математической модели системы обработки сложных событий. Эта модель была названа СЕР-машиной. Структура и поведение модели описаны строгими математическими формулировками. Доказано, что возможности обработки таких систем определяются некоторым компромиссом между классом обрабатываемого потока событий и количеством сложных событий. Далее, в работе решена задача синтеза СЕР-машины с заданным поведением. Были представлены условия алгоритмической реализуемости СЕР-машины. Представлен класс регулярных СЕР-машин. Такие машины основываются на обработчиках (регулярных акцепторах), которые способны обрабатывать регулярные события. Показано, что машина, обрабатывающая сложные события описываемые регулярным языком, может быть преобразована в конечный автомат. Далее, в работе предлагается метод машинного обучения необходимый для синтеза регулярных акцепторов. Такой подход значительно упрощает процесс проектирования систем обработки потоков событий. Также приводится описание компьютерного эксперимента подтверждающего правильность обучающего метода. В заключении приводится пример использования предложенной в работе модели при проектировании и разработке подсистемы формирования и оптимизации трафика в распределенной информационной системе.

Ключевые слова: предавтомат, сложное событие, математическая модель, обработка событий, функция отклика, префиксное множество, регулярное множество, автомат, акцептор, машинное обучение, распределенная информационная система, формирование трафика.

#### *ABSTRACT*

*Dorozhinsky V. V. Mathematical models for specification and analysis of the event-driven system components. — Manuscript.*

Candidate's thesis on Technical science, speciality 01.05.02 — mathematical modeling and computational methods. — V. N. Karazin Kharkiv National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to the research of the information systems based on the event-driven approach. Such systems became widely used for the information streams processing. This process requires execution “on-the-fly” thereby it should have the ability to respond in a real time mode. As a rule, a continuous information stream is not continuous in the mathematical sense of this word. A continuous information stream can be considered rather as a sequence of elementary (atomic) events such that each of them carries some information fragment. A finite segment of an event stream is a complex event if this segment has semantic meaning in the context of the interest. In the thesis an important for the applications scientific problem of the mathematical models and analysis methods development for the event-driven systems was solved. An analysis of the existent approaches to the event streams processing led the author to the formulation and development of the general mathematical model of the complex event processing system. This model was called Complex Event Processing Machine (CEP-machine). The model structure and behavior was described using rigorous mathematical formulations. It was proved that processing ability of such systems is determined by some compromise between the class of processed event stream and a number of complex events. Further in the work the problem of CEP-machine synthesis basing on the formal specification has been solved. The conditions ensuring possibility of algorithmic realization for CEP-machines were established. Some properties of CEP-machines related to regular languages are considered in the work. The subclass of the Regular CEP-machines was introduced. Such CEP-machines are based on the set of the event handlers (Regular Acceptors) that can process Regular Events. It is shown that for some classes of complex events that can be represented as a regular language a CEP-machine can be transformed to the automaton that is able to recognize these events. Next, in the thesis some machine-learning method for synthesis an on-fly event acceptor is proposed. Such an acceptor appears to be necessary for the technique of the on-fly event processing. This approach is increasingly being used in the design of real-time event processing systems. The method for solution of the problem and the computer experiment to study the method are described. Finally, the thesis includes usage examples of the proposed model in the network traffic shaping and optimization problem solution process during design and development of the software for the cloud

virtual switch component of the distributed information system.

*Key words:* pre-automaton, complex event, mathematical model, event processing, response function, prefix-free set, regular set, automaton, acceptor, machine learning, distributed information system, traffic shaping.