

КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Алгебраїчна школа Віктора Михайловича Глушкова налічує вже кілька поколінь вчених, більшість з яких визначила і розвиває вже власні наукові напрямки. Ця школа, започаткована в Інституті кібернетики, була сформована дослідженнями, які мали значення винаходів на рівні світової науки та комп'ютерної індустрії та багато в чому передбачили їх подальший розвиток.

Ключові слова: символні обчислення, алгебраїчне моделювання, інсерційне моделювання.

© О.О. Летичевський, 2023

УДК 519.67

DOI:10.34229/2707-451X.23.4.2

О.О. ЛЕТИЧЕВСЬКИЙ

АЛГЕБРАЇЧНА ШКОЛА В.М. ГЛУШКОВА ТА ІНСЕРЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Алгебраїчна школа Віктора Михайловича Глушкова налічує вже кілька поколінь вчених, більшість з яких визначила і розвиває вже власні наукові напрямки. Ця школа, започаткована в Інституті кібернетики, була сформована дослідженнями, які мали значення винаходів на рівні світової науки та комп'ютерної індустрії та багато в чому передбачили їх подальший розвиток. Перший у світі персональний комп'ютер, перший проект інтернету, на жаль, не знайшли відповідної підтримки у тогочасному суспільстві. Незважаючи на це, ідеї і теоретичні розробки Глушкова стали основою багатьох напрямів, які успішно розвиваються у сучасній науці. Одним із здобутків стало інсерційне моделювання, що виявилось надзвичайно затребуваним у ряді галузей.

У даній роботі буде показано становлення інсерційного моделювання із досліджень, що сформували алгебраїчну школу Глушкова та були втілені у багатьох проєктах як програмні системи.

Символьні обчислення та система алгебраїчного моделювання

У 1968 році командою Віктора Михайловича було розроблено електронно-обчислювальну машину нового покоління МИР-1, яку пізніше змінили більш досконалі версії, а саме МИР-2 (1969 р.), МИР-3 (1974 р.). Головною особливістю нової ЕОМ було те, що це був комп'ютер індивідуального користування, тобто, одна із перших у світі персональних машин.

Серія МИР мала ряд унікальних особливостей, які дозволяли вирішувати задачі аналітичними методами, що були втілені у мову високорівневого програмування АНАЛІТИК [1, 2], та реалізовані на схемно-апаратному рівні.

Специфіка та можливості символних обчислень, що були реалізовані на рівні машинних інструкцій, значно відрізняли архітектуру МИР від існуючих у світі архітектур. Власне, мова АНАЛІТИК була першою у світі системою комп'ютерної алгебри, реалізованою на персональному комп'ютері, яка працювала із абстрактними типами даних.

Символьні обчислення дозволяли, крім арифметичних дій, працювати із формулами за допомогою підстановок, порівняння формули із математичними шаблонами,

створювати канонічні форми виразів, розкривати дужки. Це давало можливість здійснювати спрощення та перетворення алгебраїчних виразів, вирішувати лінійні рівняння, виконувати інтегрування та диференціювання функцій. На основі цього було реалізовано значну кількість чисельних методів, таких, як методи Гаусса та Якобі для перетворення матриць, інтерполяція формул Ньютона та Лагранжа, знаходження апроксимуючих поліномів, методи Ейлера – Коші та Рунге – Кута для вирішення диференціальних рівнянь. Сьогодні мова АНАЛІТИК існує у вигляді мови АНАЛІТИК-7 та підтримується в Інституті проблем математичних машин та систем НАН України.

Символьні обчислення (Symbolic Computation) отримали серйозний розвиток у світовій комп'ютерній науці вже у 80-х та 90-х роках. Це також зумовило появу та розвиток перших мов символічних обчислень, таких як Lisp, Prolog, Wolfram Language. Основним методом символічних обчислень вважалась техніка переписування термів. Відомі системи переписування активно використовуються для вирішення математичних задач та доведення теорем. Такі системи активно створюються від 80-х років, наприклад, Maude, ARM, Q (мова функціонального програмування, що базується на переписуванні термів).

Команда Віктора Глушкова також не залишилась осторонь від цього тренду. В кінці 80-х років під керівництвом професора О.А. Летичевського у відділі, яким керував В.М. Глушков, було створено систему алгебраїчного програмування (АПС) [3], основою якої була мова АПЛАН.

Головна особливість АПС є те, що системи переписувальних правил можуть застосовуватися з використанням різних стратегій переписування [4]. Мова АПЛАН дозволяє описувати не тільки алгебраїчне середовище (компоненти, операції та тотожності алгебри даних), але також писати процедури і викликати їх з програм алгебри (систем переписувальних правил). Зручні засоби для представлення процедур дозволяють користувачеві маніпулювати як стандартними, так і розробленими ним найефективнішими стратегіями для застосування переписувальних правил. В мову було додано також імперативні оператори, які значно розширили можливості алгебраїчного програмування.

Система АПС була використана для вирішення багатьох задач, таких як виведення тверджень у заданій логічній системі, створення вирішувачів у певних теоріях та машин доведення тверджень.

Система АПС використовувалась у вирішенні задач елементарної математики [5], що включали у собі задачі алгебри многочленів, тригонометрії, теорії множин. Система відкрита для користування і нині проте її подальший розвиток та розширення визначились у 1999 році, коли почались її перші індустріальні застосування.

Теорія агентів та середовищ, дискретні перетворювачі та принцип макроконвєєра

Теорія взаємодій агентів та середовищ була представлена у кінці 90-х років послідовником алгебраїчної школи Глушкова академіком О.А. Летичевським спільно із британським вченим Девідом Гільбертом [6]. Основна мета створення теорії була необхідність формалізації взаємодій у складних, багаторівневих та розподілених системах.

Ідейним прототипом теорії взаємодій слід вважати модель взаємодіючих керуючого та операційного автоматів, запропоновану В.М. Глушковым ще в 60-х роках [7, 8] для опису структур обчислювальних машин, а також її розвиток у теорії дискретних перетворювачів 70-х років. У цих моделях система представляється як композиції двох автоматів – управляючого і інформаційного. Керуючий автомат відіграє роль агента, а інформаційний – роль середовища, у якому занурений цей агент. Моделі макроконвєєрних паралельних обчислень, досліджені у 80-ті роки, ще більше наблизилися до сучасної моделі взаємодії агентів та середовищ. У цих моделях процеси, що відповідають паралельно працюючим процесорам, можна розглядати як агенти, що взаємодіють у розподіленому середовищі.

Неформально основні положення теорії взаємодій агентів та середовищ було викладено у [9] наступним чином.

1. Світ – це ієрархія середовищ та агентів, занурених у ці середовища.

2. Агенти і середовища це сутності, що еволюціонують у часі і мають поведінку, що спостерігається.

3. Занурення агента у середовище змінює поведінку цього середовища і породжує новий стан середовища, що готовий до занурення в нього нових агентів.

4. Середовище, яке розглядається як агент, може бути занурений у середовище верхнього рівня.

Говорячи про агентів та середовища, ми маємо на увазі як технічні, так і природні системи – фізичні, біологічні та соціальні, а взаємодії, які нас цікавлять – це насамперед інформаційні взаємодії, абстраговані від фізичних процесів, якими вони супроводжуються. Переходячи до математичних уточнень, визначимо поняття агента, як абстрактне математичне поняття, що моделює системи, які еволюціонують у часі, а саме як розмічену транзиційну систему, стан якої визначається з точністю до бісимуляційної або трасової еквівалентності. Середовище – це агент, який має так звану функцію занурення, яка визначає поведінку агента. В подальшому теорія агентів та середовищ була використана, як основа інсерційного моделювання.

Алгебра алгоритмів Глушкова та алгебра поведінок

Алгебра алгоритмів Глушкова [10] була створена в 1965 році поспіль із відомими алгоритмічними алгебрами Дейкстри та схем Янова. Вона – це двосортна алгебра над множиною операторів та умов. Основні операції над операторами це суперпозиція операторів, β -диз'юнкція (вибір оператора згідно умови) та β -ітерація. Операції над умовами включали основні функції булевої алгебри, а також функція множення оператора на умову. Спільно із Г.О. Цейтліним було створено теорію структурованих схем алгоритмів і програм в основі якої було покладено алгебру алгоритмів Глушкова. Цю теорію також назвали *алгоритмікою* [11]. В рамках алгоритміки було вивчено властивості програм, зокрема, побудову структурованими програм без операторів безпосереднього переходу (*goto*). При цьому використовувались формальні алгебраїчні перетворення операторних виразів та створення необхідних канонічних форм.

Продовженням алгебри алгоритмів було створення послідовниками школи Глушкова подібної алгебри для формалізації поведінок більш узагальнених сутностей. Нова алгебра називалась алгеброю поведінок [12]. Вона також була двосортною алгеброю над множиною поведінок та множиною дій агентів. Алгебра поведінок використовувалась, як функція занурення в теорії взаємодії агентів та середовищ. Основними операціями над множиною поведінок були операція префіксінгу (виділення першої дії у поведінці), недетермінований вибір поведінок та композиції поведінок – послідовна та паралельна. Множина дій задавалась трійками – передумова, процесна компонента та післяумова, що представлялись формулами у певній теорії, таких як цілочисельна арифметика, теорія множин, списків, бітів та байтів з відповідними операціями та предикатами.

Штучний інтелект

В своїй роботі «Деякі проблеми теорії автоматів і штучного інтелекту» [13] В.М. Глушков сформулював основні принципи штучного інтелекту. Ще в 60-ті роки було започатковано ряд досліджень, що належали до цього напрямку. Вони стосувались, як моделювання розумової діяльності людини, так і взаємодії інтелектуальних систем із зовнішнім світом. До останніх належали розпізнання образів (штучне око), розпізнання мови (штучне вухо) та маніпулятор (штучна рука). Але найбільше уваги було приділено моделюванню розумової діяльності людини. В зв'язку із цим під керівництвом професора Ю.В. Капітонової було ініціалізовано ряд досліджень, що стосувались по-перше проблеми розуміння, а по-друге – моделювання дедукції, яка була представлена системою автоматичного доведення теорем.

Результати досліджень з розуміння природньої мови з використанням семантичних мереж перевершували результати західних колег. Про це сам Глушков заявив після конгресу IFIP в Мюнхені, стверджуючи, що у американців нічого подібного не було.

Дослідження з побудови семантичних мереж доповнював процес навчання, що базувався на екстраполяції прикладів речень, та встановлення зв'язків між сутностями. Навчання полягало в аналізі

правильних та неправильних фраз, що надаються системі навчання та побудовою відповідної семантичної граматики. Відповідно навчена система вже мала розпізнавати та класифікувати фрази, як осмислені та навпаки.

Група автоматизації дедуктивного виведення та автоматичного доведення теорем була створена ще в 1962 році. Тоді ж в основі моделювання логічного мислення полягав алгоритм очевидності Глушкова.

Подальший розвиток цього напрямку привів до створення системи автоматизації доведень (САД) [14]. Система успішно вирішувала задачі лінійної алгебри та фактично стала одною із перших у світі програмою-розв'язувачем.

Інсерційне моделювання та практичні застосування сучасних здобутків алгебраїчної школи Глушкова

Верифікація та тестування програмного та апаратного забезпечення

В 1999 році система алгебраїчного програмування зацікавила компанію Motorola для здійснення верифікації вимог та дизайну програмних та апаратних систем. Поставлена задача була вирішена послідовниками алгебраїчної школи Глушкова створенням нового підходу та системи інсерційного моделювання. Ця технологія була побудована на основі синергії попередніх винаходів, а саме: теорії агентів та середовищ, алгебри поведінок, досвіду автоматизації доведення теорем. Система інсерційного моделювання була створена, як розширення системи алгебраїчного моделювання, та її елементи склали основу системи верифікації вимог VRS (Verification of Requirement Specifications) [15]. Специфікації вимог створювались як для програмного та апаратного забезпечення та записувались як модель у синтаксисі алгебри поведінок. Технологія формалізації вимог була розширена на інші формальні специфікації, такі як мови дизайну апаратного забезпечення VHDL, System Verilog, програмні мови, такі, як Асемблер, Кобол, C++, мову дизайну UML, SDL. Для представлення їх в алгебрі поведінок створювались відповідні транслятори.

На рис. 1 показано приклад автоматичної трансляції машинних інструкцій бінарного коду в специфікації алгебри поведінок.

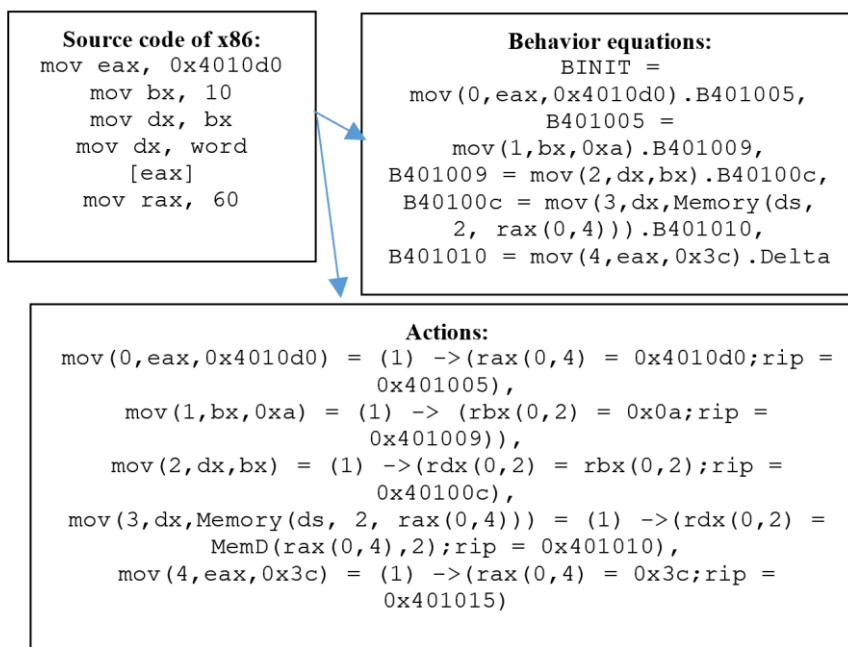


РИС. 1. Трансляція машинних інструкцій мови Intel x86 в специфікації алгебри поведінок

Модель алгебри поведінок використовувалась для аналізу на властивості, які необхідно перевірити, зокрема, такі класичні властивості, як повнота та суперечливість, а також властивості життєздатності та безпеки. Система була успішно використана в більш ніж 50 проєктах компанії Motorola.

Для верифікації використовувалась технологія алгебраїчного моделювання, яка працює із моделями алгебри поведінки, параметрами якої можуть бути довільні атрибути системи. Таким чином станом моделі є формула в деякій теорії, а результатом алгебраїчного моделювання – множина сценаріїв, що покриває всі можливі параметри моделі. На відміну від імітаційного моделювання, алгебраїчне моделювання може бути доказовим підтвердженням досяжності або недосяжності властивості, що верифікується. В рамках алгебраїчного моделювання було створено теорію предикатних перетворювачів [16], яка може працювати із формулами, що містять квантори.

Алгебраїчне моделювання виявилось дієвим інструментом для тестування. Створені алгебраїчні моделі вимог або дизайну використовувались як тестові моделі, які генерували набори тестів із покриттям, яке перевершувало покриття при традиційному тестуванні.

Кібербезпека

Останнім часом інсерційне моделювання показало свою практичність у кібербезпеці. Алгебраїчні моделі програм та пристроїв аналізуються на наявність вразливостей, що можуть привести до можливого вторгнення зловмисника у систему. На основі методів алгебраїчного моделювання створено метод алгебраїчного співставлення поведінки із деяким шаблоном, що є формалізацією кібератаки або вразливості системи.

Даний метод було створено на основі вирішення поведінкових рівнянь. Його ж покладено в основу системи аналізу вразливостей, яка розгортається сьогодні в Інституті кібернетики у середовищі багатопроекторного суперкомп'ютера СКІТ-4.

Технологія алгебраїчного співставлення також може використовуватись у виявленні кібератак. Система виявлення аналізує вхідний трафік на співпадіння із шаблонами атак та можливість вторгнення у систему, використовуючи модель цієї ж системи.

Метод алгебраїчного співставлення використовує сучасні машини доведення та розв'язувачі, тому в режимі реального часу при виявленні кібератак, він є недостатньо швидкий. Тому затримки при перевірці трафіку можуть значно впливати на ефективність роботи мережі. Для вирішення даної проблеми було запропоновано комбінацію нейронної мережі та методу алгебраїчного співставлення для того, щоб алгебраїчним методом верифікувати лише той трафік, який нейронна мережа виявить підозрілим. Така синергія двох підходів значно підвищує точність виявлення, не програючи у швидкості.

Природничі науки

В середовищі інсерційного моделювання було створено модель квантових взаємодій на рівні переходів електронів, синтезу та декомпозиції молекул. Алгебраїчний метод є багаторівневим, тому розгляд сутностей більш високого рівня на основі квантових моделей дав змогу розглядати взаємодії речовин. Використовуючи моделі більш високих рівней абстракції, можемо розглядати взаємодію білків та відповідно елементів клітини та вірусів.

Багаторівнева алгебраїчна модель дає можливість розглядати поведінку біологічних об'єктів у реальному часі, спостерігаючи не окремі сценарії, а множини можливих поведінок. Це дає змогу вивчати властивості речовин, здійснювати пошук нових сполук, що може бути використано в сфері фармакології, створення вакцин та вивчення поведінки вірусу.

В співробітництві із Інститутом вірусології Академії наук України одним із експериментів є вивчення взаємодії ферментів у клітинному середовищі. Результати моделювання дали змогу вивчити вплив такого фермента, як металопротеїназа. Це в свою чергу дало можливість вивести передумови та один із сценаріїв апоптозу (загибелі) пухлинних клітин, що може бути використано в онкології, як новий метод лікування. На рис. 2 показано взаємодію агентів у середовищі клітини, що приводять до апоптозу.

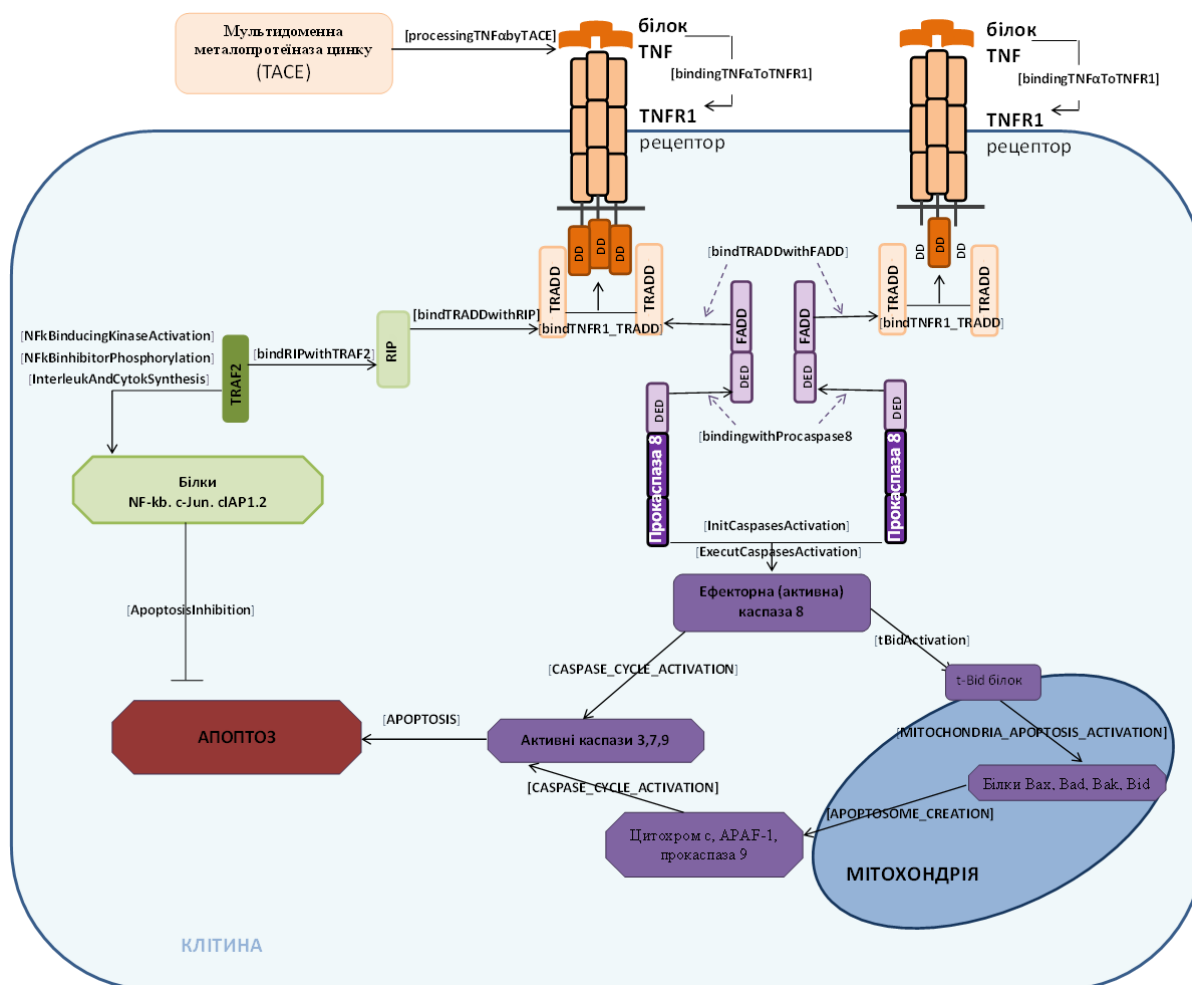


РИС. 2. Модель взаємодії агентів у клітинному середовищі із металопротеїназою, що приводить до апоптозу клітини

Це перший досвід алгебраїчного моделювання біологічних феноменів, який дав змогу започаткувати моделювання в інших сферах, таких як клітинне дихання, старіння, стійкість до втручань.

Блокчейн технологія

В технології блокчейн, незважаючи на його захищеність від зовнішнього впливу, існує низка проблем, що зв'язана із безпекою децентралізованого середовища. Технологія інсерційного моделювання дає змогу вирішити такі проблеми на різних рівнях технології. Так створюються моделі на рівні алгоритму консенсусу, де перевіряються його властивості, зокрема, стійкість до втручань та ймовірних зловмисних дій, що приводять до таких явищ, як централізація чи отримання контролю над блокчейн мережею. Методом алгебраїчного моделювання та вирішенням поведінкових рівнянь визначаються умови при яких такі дії спрацьовують, які беруться до уваги при розгортанні мережі та створенні смарт-контрактів.

Технологія смарт-контрактів також є предмет вивчення стійкості до кібератак. Багато можливих зловмисних дій вже відомі, тому можливо побудувати їх шаблони та транслювати код смарт-контракту в рівняння алгебри поведінок. В даному випадку використовується алгоритм алгебраїчного зіставлення.

Технологія інсерційного моделювання це результат синергії багатьох технологій, що створювались десятиріччями виходячи із здобутків алгебраїчної школи В.М. Глушкова. Вона виявилась надзвичайно практична для використання у різних предметних областях. Вирішення задач безпеки, вивчення властивостей речовин, створення нових ліків та матеріалів – ось неповний список ефективних застосувань. Завдяки багаторічній трансформації технологій, школа Глушкова лишилась актуальною та розвивається у різних напрямках. Інсерційне моделювання – це один із таких напрямів, що продовжує розвиватись та використовуватись у нових галузях та індустріях.

Список літератури

1. Глушков В.М., Клименко В.П., Лосев В.Д. та ін. Характеристика и область применения ЭВМ МИР-2. *Кибернетика*. 1975. № 5. С. 115–120.
2. Глушков В.М., Фишман Ю.С., Молчанов И.Н. та ін. О внешнем математическом обеспечении электронной вычислительной машины МИР-2. *Кибернетика*. 1975. № 5. С. 111–114.
3. Letichevsky A.A., Kapitonova J.V. Algebraic Programming in the APS System. In: proc. of ISSAC'90, Tokyo, Japan. 1990. P. 68–75. <https://apsystems.org.ua/uploads/doc/aps/APINAPS.eng.pdf>
4. Летичевский А.А., Хоменко В.В. Переписывающая машина и оптимизация стратегий переписывания термов. *Кибернетика и системный анализ*. 2002. № 2. С. 3–17.
5. Kapitonova Y.V., Letichevsky A.A., L'vov M.S., Volkov V.A. Tools for solving problems in the scope of algebraic programming. In: Calmet J., Campbell J.A. (eds), Integrating Symbolic Mathematical Computation and Artificial Intelligence. AISMC 1994. *Lecture Notes in Computer Science*. 1995. Vol. 958. P. 30–47. https://doi.org/10.1007/3-540-60156-2_4
6. Letichevsky A., Gilbert D. A Model for Interaction of Agents and Environments. In: Bert D., Choppy C., Mosses P.D. (eds), Recent Trends in Algebraic Development Techniques. WADT 1999. *Lecture Notes in Computer Science*. 2000. Vol. 1827. P. 311–328. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44616-3_18
7. Глушков В.М. Теория автоматов и вопросы проектирования структур цифровых машин. *Кибернетика*. 1965. № 1. С. 3–11.
8. Glushkov V.M., Letichevskii A.A. Theory of Algorithms and Discrete Processors. In: Tou J.T. (eds), Advances in Information Systems Science. Springer, Boston, MA, 1969. P. 1–58. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9050-7_1
9. Летичевский А.А. Инсерционное моделирование. *Управляющие системы и машины*. 2012. № 6. С. 3–14.
10. Глушков В.М., Цейтлин Г.Е., Ющенко Е.Л. Алгебра. Языки. Программирование. Киев: Наук. думка, 1978. 319 с.
11. Цейтлин Г.Е. Введение в алгоритмику. Киев: Сфера, 1998. 310 с.
12. Letichevsky A. Algebra of behavior transformations and its applications. In: Kudryavtsev V.B., Rosenberg I.G., Goldstein M. (eds), Structural Theory of Automata, Semigroups, and Universal Algebra. *NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*. 2005. Vol. 207. P. 241–272. https://doi.org/10.1007/1-4020-3817-8_10
13. Глушков В.М. Некоторые проблемы теории автоматов и искусственного интеллекта. *Кибернетика*. 1970. № 2. С. 3–13.
14. Глушков В.М. Система автоматизации доказательств (САД). Автоматизация обработки математических текстов. Киев: ИК АН УССР, 1980. С. 3–30.
15. Letichevsky A., Kapitonova J., Letichevsky A.Jr., Volkov V., Baranov S., Kotlyarov V., Weigert T. Basic protocols, message sequence charts, and the verification of requirements specifications. *Computer Networks*. 2005. Vol. 47, Iss. 5. P. 661–675. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2005.05.005>
16. Letichevsky A., Letychevskiy O., Peschanenko V., Weigert T. Insertion Modeling and Symbolic Verification of Large Systems. In: Fischer, J., Scheidgen, M., Schieferdecker, I., Reed, R. (eds), SDL 2015: Model-Driven Engineering for Smart Cities. SDL 2015. *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham, 2015. Vol. 9369. P. 3–18. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24912-4_1

Одержано 09.10.2023

Летичевський Олександр Олександрович,

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
завідувач відділом теорії цифрових автоматів Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.
<https://orcid.org/0000-0003-0856-9771>
oleksandr.letychevskiy@litsoft.com.ua

УДК 519.67

О.О. Летичевський

Алгебраїчна школа В.М. Глушкова та інсерційне моделювання*Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ**Листування: oleksandr.letychevskiy@litsoft.com.ua*

Алгебраїчна школа Віктора Михайловича Глушкова налічує вже кілька поколінь вчених, більшість з яких визначила і розвиває вже власні наукові напрямки. Ця школа, започаткована в Інституті кібернетики, була сформована дослідженнями, які мали значення винаходів на рівні світової науки та комп'ютерної індустрії та багато в чому передбачили їх подальший розвиток.

В роботі розглядається становлення парадигми інсерційного моделювання, як узагальнення основних здобутків школи Глушкова, починаючи від теорії автоматів та до сучасних систем комп'ютерних алгебр. Розглянуто основні напрями з яких було сформовано інсерційне моделювання, а саме, символічні обчислення, що були впроваджені ще в першій персональній машині серії МІР. Це також теорія агентів та середовищ, паралельні обчислення та методи штучного інтелекту, що розвивались в Інституті кібернетики, ще з 60-х – 70-х років.

Численні впровадження методів інсерційного моделювання у кібербезпеку, в дослідження у природничих науках, у блокчейн технологію, у верифікацію та тестування програмного та апаратного забезпечення показали практичність та цінність теоретичних досліджень, що проводились послідовниками школи Глушкова.

Ключові слова: символічні обчислення, алгебраїчне моделювання, інсерційне моделювання.

UDC 519.67

Oleksandr Letychevskiy

Algebraic School of V.M. Glushkov and Insertion Modeling*V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv**Correspondence: oleksandr.letychevskiy@litsoft.com.ua*

The Algebraic School of Viktor Mykhailovych Glushkov already has several generations of scientists, most of whom have already identified and are developing their own scientific directions. This school, started at the Institute of Cybernetics, was shaped by research that had the significance of inventions at the level of world science and the computer industry and in many ways predicted their further development.

The work considers the formation of the paradigm of insertion modeling as a generalization of the main achievements of the Glushkov school, starting from the theory of automata and up to modern computer algebra systems. The main concepts from which insertion modeling was formed are considered, namely, symbolic computations, which were implemented even in the first personal machine of the MIR series. It is also the theory of agents and environments, parallel computing, and methods of artificial intelligence, developed at the Institute of Cybernetics, in the 60s and 70s.

Numerous deployments of insertion modeling methods in cyber security, research in natural sciences, blockchain technology, in verification and testing of software and hardware, have shown the practicality and value of theoretical research conducted by followers of the Glushkov school.

Keywords: symbolic computation, algebraic modeling, insertional modeling.