УДК 517.9: 519.6

В.М. БУЛАВАЦЬКИЙ
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *v_bulav@ukr.net.*

ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ДРОБОВО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ДИНАМІКИ КОМП'ЮТЕРНИХ ВІРУСІВ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ З БІПОРЯДКОВОЮ ПОХІДНОЮ ХІЛЬФЕРА–КАПУТО

Анотація. Локальну SIC-модель комп'ютерної вірусології поширено на випадок урахування нелокальних динамічних ефектів у межах дробово-диференціального підходу. Відповідна модельна система дробово-диференціальних рівнянь, застосована для математичного опису динаміки процесу поширення вірусів у мережі базується на введеному понятті біпорядкової дробової похідної Хільфера–Капуто, яке узагальнює відому однопорядкову похідну Хільфера в сенсі Капуто. У межах цієї моделі задача дослідження особливостей некласичної динаміки комп'ютерних вірусів зводиться до розв'язання відповідної системи нелінійних інтегральних рівнянь. Досліджено деякі аспекти якісного аналізу зазначеної задачі з біпорядковою похідної Хільфера–Капуто.

Ключові слова: динаміка комп'ютерних вірусів, математичне моделювання, дробово-диференціальна математична модель, біпорядкова похідна Хільфера–Капуто, нелінійна задача, якісний аналіз.

DOI 10.34229/KCA2522-9664.26.6.5

ВСТУП

Створення ефективних систем антивірусного захисту комп'ютерних мереж є, як відомо, актуальною проблемою сучасних комп'ютерних наук. Відповідні системи захисту нерідко базуються на результатах математичного та комп'ютерного моделювання поширення шкідливого програмного коду, а необхідні методи та підходи інтенсивно досліджуються, розвиваються та впроваджуються [1–14].

Зазначена вперше в роботах [15, 16] важлива аналогія між поведінкою комп'ютерних вірусів та їхніх біологічних аналогів стала основою для використання з метою дослідження закономірностей динаміки комп'ютерних вірусів у мережі, методів та інструментів моделювання динамічних процесів, розвинутих дослідниками в галузі математичного моделювання епідеміології інфекційних захворювань. У результаті багатьма дослідниками з різних країн створено та досліджено велику кількість різноманітних математичних моделей епідеміологічної динаміки комп'ютерних вірусів (набули поширення терміни «комп'ютерна вірусологія», «комп'ютерна екологія» та ін.).

Наразі з метою моделювання особливостей динаміки комп'ютерних вірусів у мережах найчастіше використовують математичні моделі епідеміологічної динаміки типу SIR, SEIR, SIES та ін. [1–16]. У цій роботі як вихідну модель використаємо відому SIC-модель [17], у якій вивчається динаміка комп'ютерних вірусів за наявності протидії (контрзаходів) та припущення, що вузли з протидією мають сталий імунітет. При цьому передбачається, що в будь-який момент часу вузол є внутрішнім або зовнішнім; це залежить від того, чи є він доступним у мережі Інтернет.

У процесі побудови математичної моделі вірусної динаміки використано такі змінні величини:

$S(t)$ — кількість вразливих внутрішніх цифрових вузлів у момент часу t;

$\Im(t)$ — кількість інфікованих внутрішніх цифрових вузлів у момент t;

$C(t)$ — кількість неінфікованих внутрішніх вузлів з протидією у момент t.

© В.М. Булавацький, 2026