Науковий вісник НЛТУ України
Scientific Bulletin of UNFU
https://doi.org/10.36930/40340616
Article received 30.05.2024
Article accepted 05.09.2024
UDC 004.8
Correspondence author: V. M. Teslyuk vasyl.m.teslyuk@lpnu.ua
ISSN 1994-7836 (print)
ISSN 2519-2477 (online)

Х. В. Береговська, В. М. Теслюк
Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

МОДЕЛІ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ РОЗУМНОГО БУДИНКУ НА БАЗІ МЕРЕЖ ПЕТРІ ТА МОДЕЛЕЙ МАРКОВА

Сучасні системи розумного будинку потребують активної взаємодії з її користувачем, що дає змогу забезпечити високий рівень комфорту його мешканців і економії енергоносіїв. Понад це, взаємодія має бути максимально непомітною та не нав'язливою для користувача системи розумного будинку, нагадувати у зручній формі про важливі події, допомагати або, в автоматичному режимі, вирішити побутові проблеми та ін. Для вирішення цієї технічної проблеми та врахування зазначеної вище множини функцій, було запропоновано апаратно-програмну технічну систему, що використовує спеціальні мікроконтролерні засоби з системою давачів і актюаторів, апаратні засоби зв'язку, розроблене програмне забезпечення, що містить моделі управління на підставі мереж Петрі-Маркова, які дають змогу опрацьовувати дані від давачів і визначати активності користувача, опрацьовувати їх за спеціальними алгоритмами та видавати керувальні сигнали на актюатори (виконавчі пристрої), які будуть, залежно від ймовірностей настання тих чи інших подій, вмикати чи вимикати побутові пристрої тощо. Окрім цього, моделі управління на підставі мереж Петрі-Маркова дають змогу враховувати ймовірнісні процеси в системах розумного будинку, що надзвичайно важливо для систем п'ятого рівня інтелектуалізації. Запропонований підхід дає змогу: виконати комплексний аналіз найрізноманітніших сценаріїв розвитку подій в системах розумного будинку; дослідити динаміку та надійність як всієї системи, так і окремих її складників ще на системному рівні проєктування; вилучити неоднозначні ситуації під час спрацювання розгалужених переходів; врахувати ймовірнісні процеси, якими так переповнені системи розумного будинку; здійснити декомпозицію довільного рівня. Розроблено моделі управління на підставі мереж Петрі-Маркова та проведено їх дослідження. У процесі аналізу цих моделей та їх дослідження побудовано графи досяжності станів системи для аналізованих сценаріїв функціонування системи розумного будинку. Отримані результати демонструють скінченність та досяжність усіх станів виконання сценаріїв з використанням розроблених моделей управління, здатність моделювання та опрацювання різних сценаріїв функціонування в адаптивній системі розумного будинку. Найважливішою особливістю запропонованого підходу є долучення функціональних компонент системи (сенсори і актюатори), які представляють апаратний складник системи, в модель управління на базі мереж Петрі-Маркова, внаслідок чого розроблено моделі якісно нового функціонального рівня. Подальші дослідження передбачають апаратну реалізацію адаптивної системи розумного будинку з використанням моделей управління на підставі мереж Петрі-Маркова та реалізацію програмного ядра засобами розроблених моделей.

Ключові слова: розумний будинок; моделі управління на підставі мереж Петрі-Маркова; граф досяжності станів; активності; сценарії функціонування.

Вступ / Introduction

Перші розумні будинки з'явилися ще в 1950-х роках у США, тобто сама ідея розумного (інтелектуального) будинку не нова, проте актуальна й наразі [5]. Зумовлено це тим, що кожна така система є абсолютно унікальною, потребує індивідуального підходу до розроблення, а також постійного навчання, конфігурування та переконфігурування, що призводить до збільшення вартості процесу розроблення та експлуатації таких систем.

Варто зазначити, що існує кілька ступенів інтелектуалізації будівель: від дистанційного управління побутовою технікою та мікрокліматом у будинку до повністю автоматизованого прийняття системою розумного будинку рішень щодо управління всіма підсистемами будинку з урахуванням усіх індивідуальних особливостей, самопочуття, настроїв, звичок та побажань кожного конкретного користувача такої системи. Отже, системи розумного будинку є надзвичайно складними [3, 19], що вносить відповідні вимоги до їх проєктування та реалізації. Відповідно, проблема розроблення математичного забезпечення систем розумного будинку, які враховують активності користувачів, повною мірою не вирішена. Саме тому розроблення моделей визначення активностей користувача розумного будинку на підставі теорії мереж Петрі-Маркова є актуальним завданням сьогодення.

Об'єкт дослідження – розроблення моделі адаптивної системи розумного будинку.

Предмет дослідження – моделі на підставі мереж Петрі-Маркова, доповнені функціональними компонентами, які дадуть змогу врахувати активності користува-

Інформація про авторів:
Береговська Христина Василівна, аспірант, кафедра автоматизовані системи управління. **Email:** Khrystyna.V.Berehovska@lpnu.ua
Теслюк Василь Миколайович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизовані системи управління.
Email: vasyl.m.teslyuk@lpnu.ua; https://orcid.org/0000-0002-5974-9310

Цитування за ДСТУ: Береговська Х. В., Теслюк В. М. Моделі адаптивної системи розумного будинку на базі мереж петрі та моделей Маркова. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 6. С. 115–124.
Citation APA: Beregovska, Kh. V., & Teslyuk, V. M. (2024). Models of adaptive smart home systems based on petri nets and Markov models. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(6), 115–124. https://doi.org/10.36930/40340616

ча системи розумного будинку.

Мета роботи – розробити модель адаптивної системи розумного будинку на базі мереж Петрі та моделей Маркова, яка дасть змогу врахувати активності його користувача.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні *завдання дослідження*:

1. Розробити моделі на підставі мереж Петрі-Маркова, доповнених функціональними компонентами, що дасть змогу врахувати активності користувача системи розумного будинку.
2. Провести аналіз розроблених моделей та побудувати графи досяжності станів сценаріїв функціонування системи розумного будинку, що дасть змогу формалізувати динаміку взаємодії між користувачем та системою розумного будинку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Підвищення ефективності функціонування в багатьох сучасних технічних системах пов'язане з визначенням активності людей. Зокрема, в медицині [16] для завдань реабілітації пацієнтів, для покращення стану осіб похилого віку [14, 27] та відстеження прогресування хвороб [7], у спорті [6, 15] тощо.

Для врахування адаптивності систем розумного будинку можна використати наявні моделі на підставі штучних нейронних мереж (ШНМ) [8]. Зокрема у низці робіт побудовано нейроконтролери, які реалізують функції підсистем розумного будинку, опрацьовують нечіткі та неструктуровані вхідні дані [22, 25], дають змогу забезпечити високу швидкодію в разі їх апаратної реалізації моделі на підставі штучної нейронної мережі [9, 18, 26]. Понад це, такий підхід не дає змоги повною мірою забезпечити реалізацію адаптивних функцій в реальному часі, оскільки реалізувати перенавчання ШНМ в реальному часі надзвичайно складно. У роботах [12, 13, 31] автори запропонували моделі та засоби для врахування активностей в системах розумного будинку. Однак використання таких запропонованих моделей потребує опрацювання великих обсягів реальних даних для процесу їх навчання [1, 29] та потужної обчислювальної бази. Окрім цього, таким моделям притаманні проблеми з масштабуванням системи і функціями адаптивності. Перспективними підходами для визначення активностей в системах розумного будинку є методи, які використовують системи спеціальних давачів і визначення їх місця розміщення тощо [30].

Матеріали та методи дослідження. У процесі розроблення моделей використано теорію математичного моделювання систем, теорію мереж Петрі, теорію мереж Петрі-Маркова та теорію графів. У процесі програмної реалізації – об'єктно-орієнтоване програмування.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Перші системи розумного будинку були надзвичайно простими і їхнє основне завдання полягало в наданні користувачу можливості ввімкнення/вимкнення побутових приладів за допомогою пульта дистанційного управління, тобто основна складність таких систем полягала виключно в апаратній реалізації її виконавчих компонент. Надалі основна функція систем розумного будинку зводилася до раціонального розподілу ресурсів з метою підтримання комфортних умов проживання та перебування користувача всередині розумного будинку (раціональне використання електроенергії, газо- та водопостачання).

Наразі простого голосового управління типу "дім, хочу послухати релаксуючу музику", (що 20 років тому в художніх фільмах нам представляли як вершину інтелектуалізації розумного будинку) вже недостатньо, користувачам нецікаво постійно розповідь і пояснювати системі, що вони хочуть, натомість користувачі хочуть, щоб розумний будинок приємно здивував їх, тому основна вимога до сучасних систем розумного будинку полягає в тому, щоб максимально задовольнити користувача (-ів), реалізувати всі його (їх) побажання, замінити всю його (їх) рутинну повсякденну домашню роботу, залишаючись, при цьому, максимально непомітною для самого користувача. Іншими словами – система розумного будинку повинна навчитися "працювати на випередження", знаючи на кілька кроків наперед, куди переміститься користувач, якими будуть його дії, чого користувач захоче в наступну хвилину і подати йому це ще до того, як він цього захоче, або ж приготувати "майданчик" для наступних дій користувача.

Наприклад, користувач увечері повертається з роботи додому, як тільки він наблизився до будинку ближче ніж на 5 км, система повинна:

1) проаналізувати наявні в холодильнику продукти, сформувати та надіслати користувачу на мобільний телефон перелік продуктів, які потрібно купити в супермаркеті по дорозі додому, з урахуванням гастрономічних побажань користувача та на підставі статистичної інформації про куплені раніше продукти;
2) враховуючи погоду та температурний режим "за вікном", відповідно сконфігурувати та увімкнути підсистему клімат-контролю в будинку, щоб забезпечити оптимальний мікроклімат всередині будинку, а також плавний температурний перехід (щоб не трапилося так, що в спекотний літній день користувач зайде з вулиці, де температура +38 °С, до передпокою, в якому кондиціонер охолодить повітря до +22 °С, внаслідок чого користувач може отримати шкоду для свого здоров'я та самопочуття);
3) враховуючи поточний день тижня та персональний розклад користувача, приготувати йому каву;
4) увімкнути бойлер та здійснити підігрів теплої підлоги у ванній кімнаті, щоб користувач міг прийняти душ одразу по прибуттю додому;
5) підготувати для користувача вечірню вибірку найактуальніших новин та подій, що відбулися в світі та ін.

Приклад, наведений вище, є одним із небагатьох можливих сценаріїв, які потрібно передбачити та реалізувати в системі розумного будинку, адже, як вже було неодноразово сказано раніше, кожна система розумного будинку є абсолютно унікальною, і повинна враховувати особливості свого конкретного (-их) користувача (-ів), а оскільки на Землі проживає понад вісім мільярдів людей, кожен з яких володіє абсолютно унікальними звичками та вподобаннями, побажаннями та характером, то хтозна що ще конкретний користувач захоче реалізувати в своєму персональному розумного будинку.

Саме тому сучасні системи розумному будинку стають дедалі складнішими, і тепер основна їх складність розроблення полягає не так у фізичному (апаратному) виконанні функціональних компонент, елементів і модулів системи, як у її грамотному проєктуванні, декомпозиції, та можливості комплексного дослідження цілої системи та її окремих складових на якомога більш ранніх стадіях проєктування, адже, як відомо, чим раніше

будуть виявлені проблемні ділянки – тим меншою буде вартість їх виправлення (а у випадку систем розумного будинку такі "проблемні ділянки" будуть однозначно, оскільки такі системи тісно пов'язані з замовником – живою людиною, настрій і побажання якої можуть змінюватися кожен день).

Одним із найбільш ефективних та широко використовуваних інструментів під час дослідження складних систем на ранньому етапі проєктування є мережі Петрі (МП) [11, 17], причому в арсеналі МП вже існує низка основних їх видів для моделювання найрізноманітніших систем та процесів, а саме: часові, стохастичні, функціональні, кольорові, інгібіторні, ієрархічні, потокові, та мережі з пріоритетами. Основна ідея МП полягає у формуванні чіткої множини позицій (positions **P**) та переходів (transistion **T**) мережі, при цьому задаються стартові позиції мережі, в які поміщаються маркери, які через відповідні переходи можуть потрапляти в інші позиції мережі, аж доки не досягнуть деяких фінішних позицій, що сигналізуватиме про завершення повного функціонального циклу мережі (моделі).

Побудуємо відповідну модель на базі звичайної МП, яка б дала нам змогу дослідити сценарій функціонування системи розумного будинку, коли користувач ввечері повертається з роботи додому (активності користувача), де позиції моделі представлятимуть відповідні стани системи, а переходи моделі, відповідно, переходи між станами системи. Розроблену модель наведено на рис. 1, а в математичній формі її записано так [21]:

$$Model_розумного\ будинку = <P, T, Fin, Faut, Mo>, \quad (1)$$

де: P – множина позицій; T – множина переходів; Fin – множина вхідних дуг; $Faut$ – множина вихідних дуг; Mo – початкове маркування.

Особливістю розробленої моделі на базі МП є те, що в цій моделі відсутня фінішна так звана "тупикова" позиція, тобто, іншими словами, модель може "крутитися" до безмежності, але це тільки через те, що модель (1) є досить узагальненою. Насправді ж у цій моделі, згідно із відповідним сценарієм, можна ввести додаткові фінальні "тупикові" стани, в які у разі потрапляння маркера відбувалося б завершення повного функціонального циклу моделі.

Розроблена схемна модель на базі МП (див. рис. 1) розпочинає свою роботу із "стартової" позиції p_{01}, в яку поміщається маркер. Після цього одразу ж виникає ситуація, коли можливе або спрацювання переходу t_1 (і маркер потрапляє в позицію p_{02}), або спрацювання переходу t_2 (і маркер потрапляє в позицію p_{03}). З позиції p_{03} маркер може повернутися в позицію p_{01} через перехід t_6, або перейти в позицію p_{02} через перехід t_5, а з позиції p_{02} маркер може повернутися в позицію p_{01} через перехід t_3, перейти в позицію p_{03} через перехід t4, чи перейти в позицію p_{04} через перехід t_7.

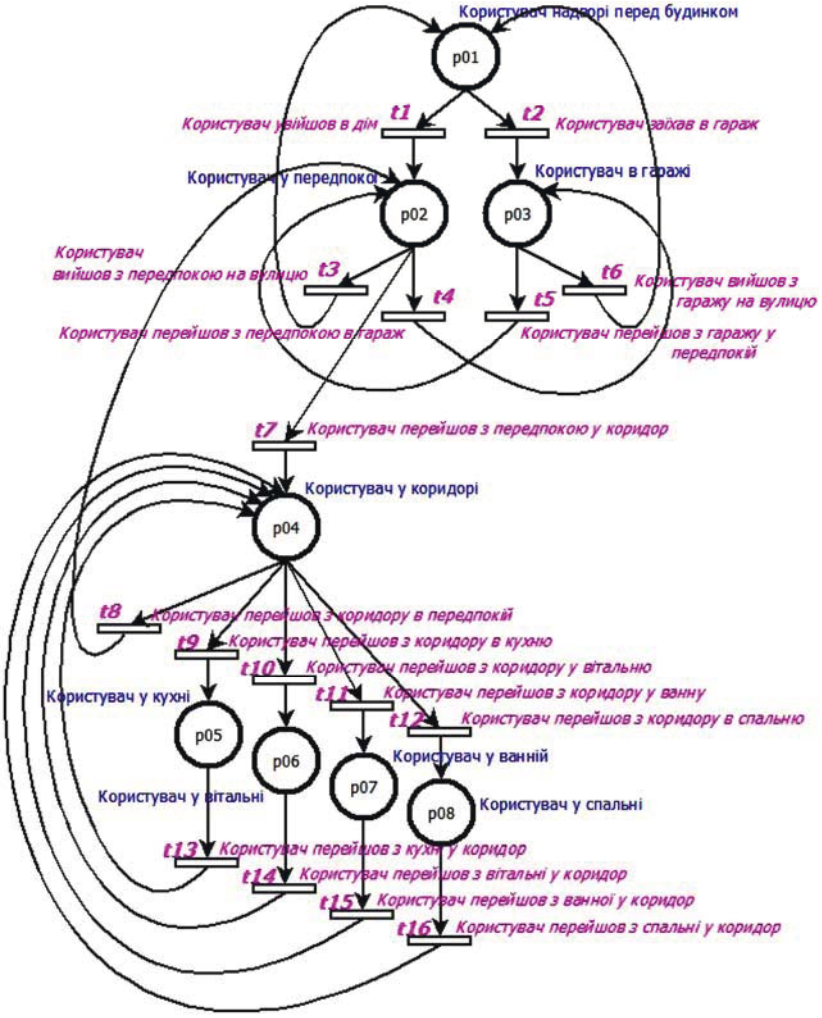

Рис. 1. Схемна модель на базі простої МП для дослідження одного зі сценаріїв функціонування системи розумного будинку / Schematic model based on a simple Petri net for investigating one of the operation scenarios of the smart home system

Після того, як маркер потрапив у позицію p_{04}, виникає ще більш цікава ситуація, адже можливе подальше спрацювання аж 5 різних переходів (t_8–t_{12}). Який саме з переходів спрацює – невідомо, оскільки в простій МП

не передбачена можливість завдання пріоритетності спрацювання переходів. У такому разі можна скористатися МП з пріоритетами, але і в цьому випадку модель не задовольнятиме наші вимоги, оскільки у випадку моделювання сценаріїв розвитку подій в середовищі розумного будинку маємо справу не з жорстко прописаними пріоритетами послідовності подій, а з імовірностями настання тих чи інших подій, які, водночас, приводять до переходу системи з одного стану в інший. Отже, постає необхідність використання певного, відмінного від класичного, підходу, який би дав змогу уникнути поняття пріоритетності спрацювання переходів, ввівши натомість поняття імовірності спрацювання переходів. Одним з таких підходів є застосування моделей Маркова (ММ) [2, 10, 28], які належать до класу стохастичних моделей і дають змогу враховувати випадкові процеси. Окрім цього, поєднання мереж Петрі та моделей Маркова (МПМ) багатьма науковцями вважається надзвичайно гармонійним і не, що найважливіше, потребує жодного штучного приведення МП до ММ чи навпаки [24].

Отже, для того, щоб отримати вдосконалену модель для дослідження сценаріїв функціонування системи розумного будинку на базі МПМ, у вже розроблену модель на базі МП необхідно додатково внести тільки ймовірності спрацювання переходів, та, попри такі незначні зміни, – отримаємо модель у формі схеми (див. рис. 2) якісно нового функціонального рівня, яка дасть змогу: а) вилучити неоднозначні ситуації у разі спрацювання розгалужених переходів; б) врахувати в моделі імовірнісні процеси, якими так переповнені системи розумного будинку.

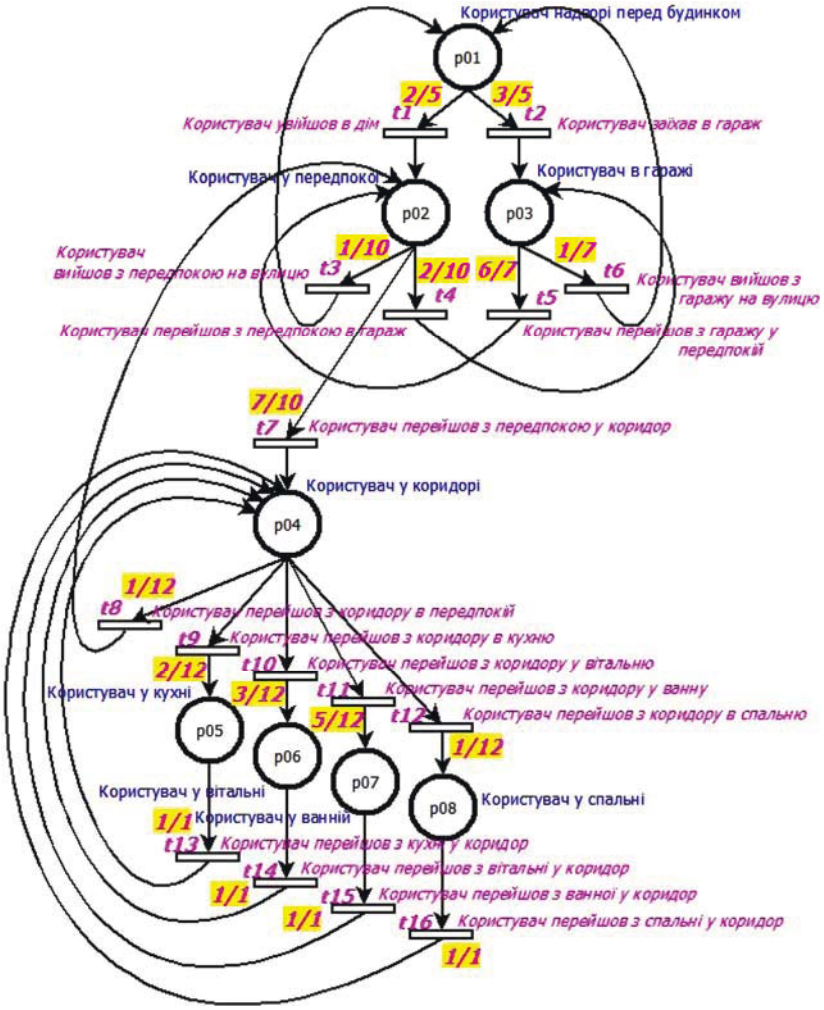

Рис. 2. Схемна модель на базі МПМ для дослідження одного зі сценаріїв функціонування системи розумного будинку / Schematic model based on a Petri-Markov net for investigating one of the operation scenarios of the smart home system

У математичній формі вдосконалену модель можна описати шляхом додавання множини ймовірностей спрацювання до моделі (1), а саме:

$$Model_МПМ = <P, T, S, Fin, Faut, Mo>, \qquad (2)$$

де S – множина ймовірностей спрацювання переходів.

Проте і ця розроблена модель на базі МПМ все ще має істотні недоліки, а саме: імовірності спрацювання переходів моделі між станами є статичними (див. табл. 1), що неприпустимо під час дослідження систем типу розумного будинку. Саме тому необхідно забезпечити можливість корекції значень імовірностей спрацювання переходів моделі, або в класичній термінології ММ – забезпечити можливість корекції значень коефіцієнтів імовірностей матриці переходів моделі. Реалізувати таку можливість корекції коефіцієнтів можна двома способами:

- з застосуванням лічильника ітерацій досягнення станів моделі;
- БЕЗ застосування лічильника ітерацій досягнення станів моделі.

Як у одному, так і в іншому випадках отримаємо таблицю ймовірностей зміни станів моделі, в якій замість статичних даних (конкретних цифр, як зображено на рис. 2), матимемо таких два способи встановлення значення коефіцієнта: для першого способу реалізації

встановлення значення коефіцієнта здійснюють залежно від поточного значення лічильника ітерацій (див. табл. 2); для другого способу реалізації під час кожного переходу моделі із одного стану в інший будуть задаватися нові значення коефіцієнтів для відповідної множини переходів (див. табл. 3).

Табл. 1. Ймовірності зміни станів у системі розумного будинку з використанням моделі на базі МПМ / Probabilities of states change in the smart home system using a model based on the Petri-Markov net

	p_{01}	p_{02}	p_{03}	p_{04}	p_{05}	p_{06}	p_{07}	p_{08}
p_{01}	–	2/5	3/5	–	–	–	–	–
p_{02}	1/10	–	2/10	7/10	–	–	–	–
p_{03}	1/7	6/7	–	–	–	–	–	–
p_{04}	–	1/12	–	–	2/12	3/12	5/12	1/12
p_{05}	–	–	–	1/1	–	–	–	–
p_{06}	–	–	–	1/1	–	–	–	–
p_{07}	–	–	–	1/1	–	–	–	–
p_{08}	–	–	–	1/1	–	–	–	–

Табл. 2. Ймовірності зміни станів моделі на базі МПМ з застосуванням лічильника ітерацій / Probabilities of states change of the model based on the Petri-Markov net with the application of an iteration counter

	p_{01}	p_{02}	p_{03}	p_{04}	p_{05}	p_{06}	p_{07}	p_{08}
p_{01}	–	case iteration of: 1: 2/5 2: 4/5	case iteration of: 1: 3/5 2: 1/5	–	–	–	–	–
p_{02}	case iteration of: 1: 1/10 2: 4/10 3: 1/10	–	case iteration of: 1: 2/10 2: 5/10 3: 1/10	case iteration of: 1: 7/10 2: 1/10 3: 8/10	–	–	–	–
p_{03}	case iteration of: 1: 1/7 2: 1/7 3: 5/7	case iteration of: 1: 6/7 2: 6/7 3: 2/7	–	–	–	–	–	–
p_{04}	–	case iteration of: 1: 1/12 2: 1/12 3: 1/12 4: 1/12 5: 3/12	–	–	case iteration of: 1: 2/12 2: 4/12 3: 4/12 4: 3/12 5: 2/12	case iteration of: 1: 3/12 2: 4/12 3: 4/12 4: 6/12 5: 4/12	case iteration of: 1: 5/12 2: 1/12 3: 2/12 4: 1/12 5: 1/12	case iteration of: 1: 1/12 2: 2/12 3: 1/12 4: 1/12 5: 2/12
p_{05}	–	–	–	1/1	–	–	–	–
p_{06}	–	–	–	1/1	–	–	–	–
p_{07}	–	–	–	1/1	–	–	–	–
p_{08}	–	–	–	1/1	–	–	–	–

Обидва із наведених способів реалізації механізму корекції значень коефіцієнтів імовірностей матриці переходів системи мають як свої переваги, так і недоліки. Так, зокрема, перший спосіб з легкістю дає змогу описати надзвичайно велику кількість імовірних шляхів розвитку певних ділянок сценарію, особливо у випадку, коли модель неодноразово повертається в певні стани і добре підходить саме для багаторазового проходження таких станів, проте такий спосіб потребує неабияких часових затрат на розроблення, реалізацію, подальше впровадження, навчання та перенавчання (корекція в режимі "відлагодження") системи.

Водночас другий спосіб є набагато простішим як у плані розроблення, так і в плані реалізації, і добре надається для одноразового проходження розгалужених ділянок моделі, проте цей спосіб, водночас, не надає розробнику можливості реалізації низки ймовірних шляхів розвитку одного і того ж місця сценарію. Саме тому неможливо однозначно і радикально стверджувати про доцільність використання одного способу та, водночас, недоцільність другого способу, а для отримання оптимального рішення найкращим варіантом буде одночасне поєднання (комбінація) двох описаних вище способів, що сукупно дасть значно кращі результати.

Табл. 3. Ймовірності зміни станів моделі на базі МПМ без застосування лічильника ітерацій / Probabilities of states change of the model based on the Petri-Markov net without the application of an iteration counter

	p_{01}	p_{02}	p_{03}	p_{04}	p_{05}	p_{06}	p_{07}	p_{08}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_{01}	–	t_3:=1/10 t_4:=2/10 t_7:=7/10	t_5:=6/7 t_6:=1/7	–	–	–	–	–
p_{02}	t_1:=4/5 t_2:=1/5	–	t_5:=6/7 t_6:=1/7	t_8:=1/12 t_9:=2/12 t_{10}:=3/12 t_{11}:=5/12 t_{12}:=1/12	–	–	–	–
p_{03}	t_1:=1/10 t_2:=9/10	t_3:=1/10 t_4:=1/10 t_7:=8/10	–	–	–	–	–	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_{04}	–	t_3:=1/10 t_4:=5/10 t_7:=4/10	–	–	t_{13}:=1/1 t_8:=1/12 t_9:=1/12 t_{10}:=6/12 t_{11}:=2/12 t_{12}:=2/12	t_{14}:=1/1 t_8:=1/12 t_9:=5/12 t_{10}:=1/12 t_{11}:=4/12 t_{12}:=1/12	t_{15}:=1/1 t_8:=1/12 t_9:=5/12 t_{10}:=3/12 t_{11}:=1/12 t_{12}:=2/12	t_{16}:=1/1 t_8:=1/12 t_9:=4/12 t_{10}:=2/12 t_{11}:=4/12 t_{12}:=1/12
p_{05}	–	–	–	t_8:=1/12 t_9:=1/12 t_{10}:=6/12 t_{11}:=2/12 t_{12}:=2/12	–	–	–	–
p_{06}	–	–	–	t_8:=1/12 t_9:=5/12 t_{10}:=1/12 t_{11}:=4/12 t_{12}:=1/12	–	–	–	–
p_{07}	–	–	–	t_8:=1/12 t_9:=5/12 t_{10}:=3/12 t_{11}:=1/12 t_{12}:=2/12	–	–	–	–
p_{08}	–	–	–	t_8:=1/12 t_9:=4/12 t_{10}:=2/12 t_{11}:=4/12 t_{12}:=1/12	–	–	–	–

На рис. 3 наведено також побудований граф досяжності станів [23] розробленої моделі, який демонструє скінченність та досяжність кожного із станів моделі (з урахуванням імовірностей переходів, оскільки ця модель побудована на базі МПМ):

$$G_{_стани} = <St, Tg>, \quad (3)$$

де: St – множина станів системи; Tg – множина переходів графа досяжності станів.

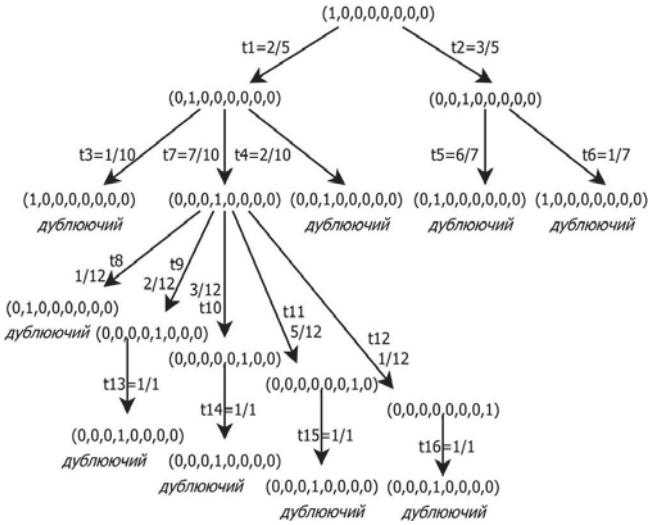

Рис. 3. Граф досяжності станів для розробленої моделі на базі МПМ / Constructed state reachability graph for the developed model based on the Petri-Markov net

Як випливає із наведеного на рис. 3 графа досяжності станів, у моделі відсутні термінальні (фінальні) стани. Зумовлено це, як вже було описано раніше, тим, що сценарій, який моделює розроблена модель, є узагальненим. Для того, щоб отримати термінальні стани, потрібно доповнити сценарій даними про них. Наприклад, припустимо, що для конкретно взятого сценарію (який описує ситуацію, коли користувач ввечері повертається з роботи додому), термінальним (фінальним) буде етап, коли користувач після відвідин ванної кімнати та кухні перейшов у вітальню, де вмостився на дивані перед телевізором. Тепер для опису цього доповненого сценарію потрібно ввести додаткові стани в модель, як то, наприклад, стан p_{09} "Користувач вмостився на дивані перед телевізором", проте існує набагато цікавіше рішення, яке, окрім цього, дає змогу ще більшою мірою розширити функціональні можливості розроблюваної моделі.

Рішення полягає у додатковому введенні в розроблену на базі МПМ модель функціональних компонент системи розумного будинку: сенсорів і актюаторів, забезпечивши цим самим можливість гнучкої декомпозиції моделі, адже декомпозиція є надзвичайно потрібною під час розроблення складних систем, до яких належать системи розумного будинку. Отже, отримаємо модель на базі МПМ, доповнену функціональними компонентами системи, а саме сенсорами та актюаторами, яку зображено на рис. 4.

Запропонований підхід побудови моделей на базі МПМ, доповнених функціональними компонентами системи розумного будинку, дає змогу здійснювати декомпозицію довільного рівня, в чому є беззаперечна перевага такого підходу. Окрім цього, за необхідності в модель завжди можна внести додаткові стани та переходи як для моделювання функціональних компонент системи, так і для більш детального дослідження поведінки системи за певних сценаріїв розвитку подій.

Зображена на рис. 4 модель призначена тільки для зображення основних принципів побудови моделей на базі МПМ, доповнених функціональними компонентами, і дає розробнику практично безмежне поле для діяльності. Отже, модель, наведена на рис. 4, доповнена термінальним станом p21, що демонструє побудований граф досяжності станів нової моделі (див. рис. 5). На цьому рисунку позначено стан "Дублюючий" – це такий стан мережі, до якого вона може повертатися знову (оскільки специфіка цієї мережі в тому, що у ній багато внутрішніх циклів, тож "дублюючі" стани дають змогу описати їх на графі). "Термінальний" – це стан повного завершення роботи мережі, в який мережа може перейти тільки один єдиний раз після повного завершення своєї роботи.

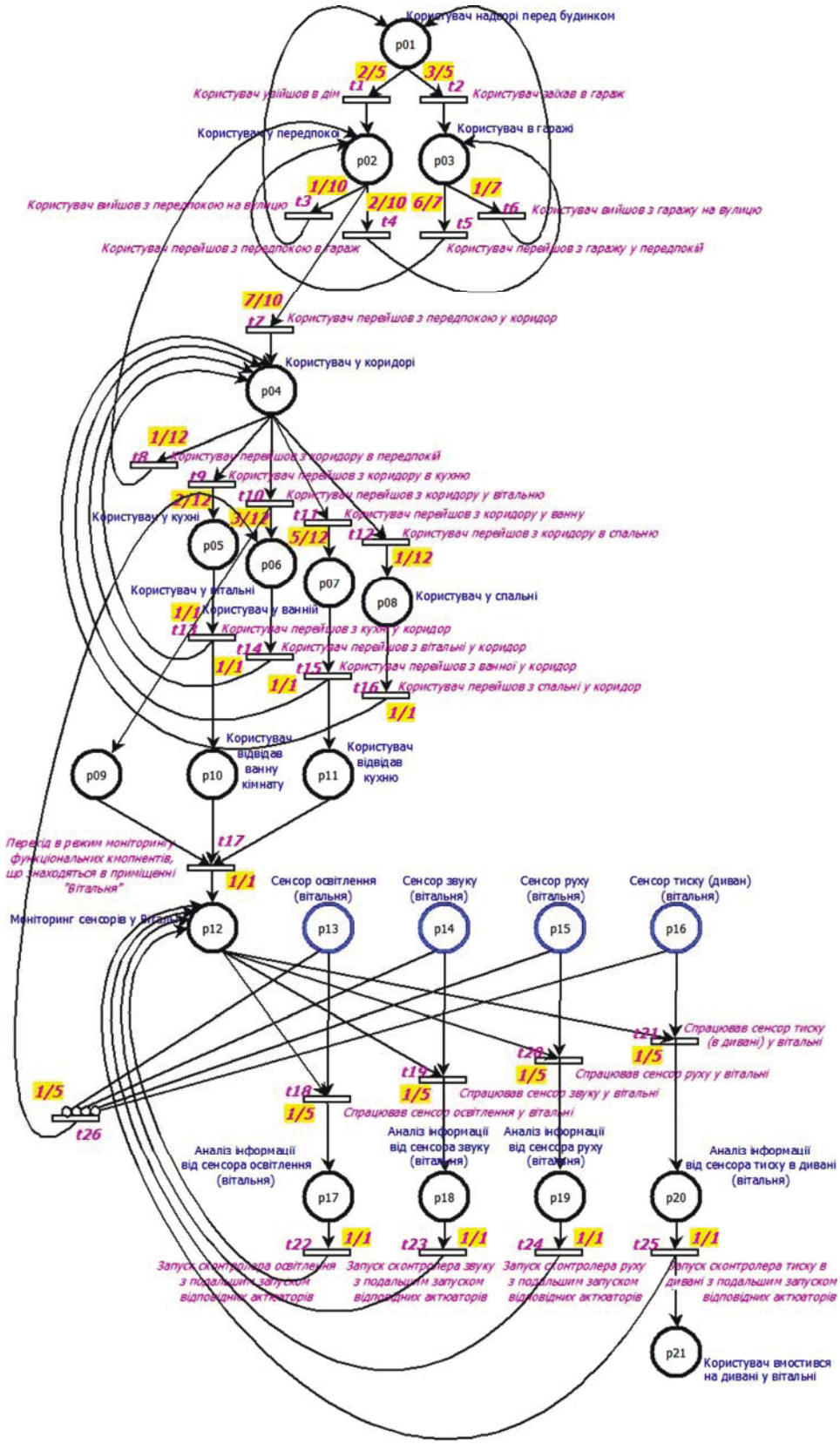

Рис. 4. Схемна модель системи на базі МПМ, доповнена функціональними компонентами системи розумного будинку / Schematic model of the system based on the Petri-Markov net, supplemented with functional components of the smart home system

Обговорення результатів дослідження. З отриманих результатів дослідження випливає, що розроблені моделі визначення активностей в системі розумного будинку на підставі мереж Петрі-Маркова порівняно з моделями, які ґрунтуються на використанні штучних нейронних мереж [7, 13, 20], дають змогу в реальному часі донавчати побудовані моделі сценаріїв функціонування розумного будинку на підставі поведінки його користувача. Реалізувати операцію навчання з використанням моделей на підставі штучних нейронних мереж вкрай складно, оскільки необхідно виконати великий обсяг додаткових обчислень та використовувати потужну комп'ютерну техніку. Окрім цього, застосування моделей визначення активностей в системі розумного будинку на підставі штучних нейронних мереж потребує в процесі навчання значного обсягу історичних досто-

вірних та актуальних даних, які зібрати на практиці в системі реального часу вкрай складно. Порівняно з моделями, поданими у роботах [4, 12], моделі визначення активностей в системі розумного будинку на підставі мереж Петрі-Маркова дають змогу враховувати параметри швидкозмінного людино-машинного середовища в реальному часі, що забезпечує здатність реалізації різних сценаріїв функціонування розумного будинку.

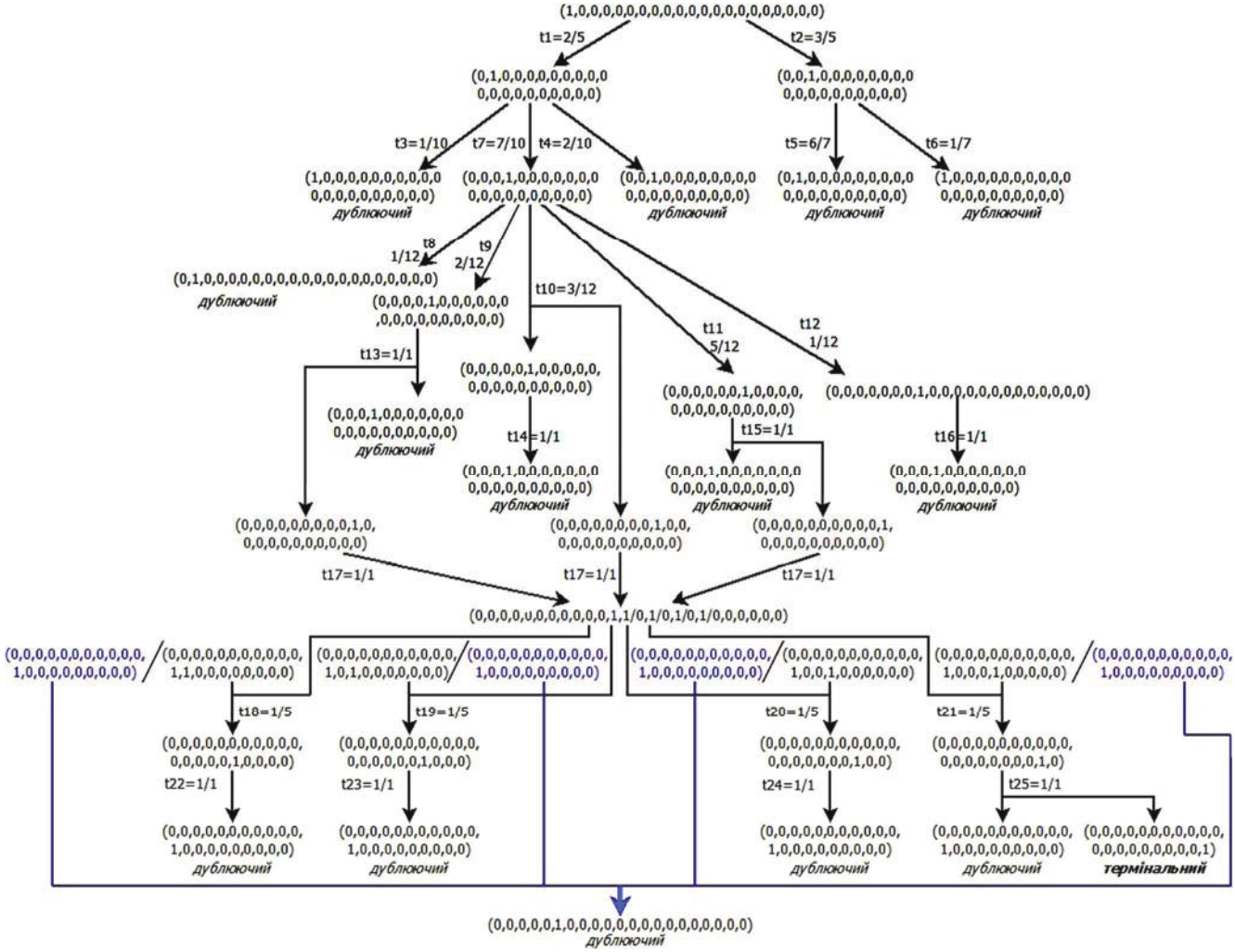

Рис. 5. Граф досяжності станів розробленої моделі на базі МПМ, доповненої функціональними компонентами / Constructed state reachability graph of the developed model based on the Petri-Markov net, supplemented with functional components

Отже, система розумний дім допомагає більш результативно використовувати комерційні пересування, автоматизувати певні побутові процеси, урізноманітнити дозвілля користувача. Попри те, що smart-home – дорога технологія, яка вимагає планування із самого початку зведення будинку та якісного устаткування, існують альтернативні рішення. Найпростіший за проєктом дім можна доповнити певним прогресивним обладнанням, яке розширить функціональні можливості житлової площі та усучаснить пересування користувача.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше розроблено модель визначення активностей користувача розумного будинку, яка ґрунтується на теорії мереж Петрі-Маркова та доповнена функціональними компонентами, що дає змогу враховувати ймовірнісні процеси в сценаріях функціонування розумного будинку.

Практична значущість результатів дослідження – отримані результати, такі як графи досяжності станів сценаріїв функціонування системи розумного будинку, використано в процесі практичної реалізації програмно-апаратного забезпечення адаптивної системи розумного будинку.

Висновки / Conclusions

Розроблено модель адаптивної системи розумного будинку на базі мереж Петрі та моделей Маркова, яка дає змогу врахувати активності його користувача. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Розроблено адаптивну модель системи розумний будинок, яка побудована на підставі моделей Петрі-Маркова та доповнена функціональними компонентами системи (сенсори та актюатори). Підхід, застосований під час розроблення цієї моделі, дає змогу: здійснити комплексний аналіз найрізноманітніших сценаріїв розвитку подій в системах розумного будинку; дослідити динаміку та надійність як всієї системи, так і окремих її складових ще на системному рівні проєктування; вилучити неоднозначні ситуації під час спрацювання розгалужених переходів; врахувати ймовірнісні процеси, якими так переповнені системи розумного будинку; здійснити декомпозицію довільного рівня.
2. Побудовано граф досяжності станів розробленої моделі, який демонструє скінченність та досяжність усіх станів моделі, найважливішою особливістю цього підходу є гармонійне влиття функціональних компонент

системи (сенсори і актюатори), які становлять апаратний складник системи, в модель на базі МПМ, внаслідок чого синтезовано модель якісного нового функціонально-методологічного рівня з практично необмеженими можливостями декомпозиції на будь-якому рівні, що неабияк важливо під час проєктування складних систем (якими є системи розумного будинку).

References

1. Azkune, G., Almeida, A., López-de-Ipiña, D., & Chen, L. (2015). Extending knowledge-driven activity models through data-driven learning techniques. *Expert Systems with Applications*, *42*(6), 3115–3128. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.063
2. Chen, C. N., Liu, T. K., & Chen, Y. J. (2019). Human-machine interaction: Adapted safety assistance in mentality using hidden Markov chain and petri net. *Applied Sciences*, *9*(23). https://doi.org/10.3390/app9235066
3. Firth, S., Fouchal, F., Kane, T., Dimitriou, V., & Hassan, T. (2013). Decision support systems for domestic retrofit provision using smart home data streams. In Proceedings of the CIB W78 2013 30th International Conference Apply IT AEC Ind. Move Towar. *Smart Buildings Infrastructures Cities*, Bejing, China, 10. URL: https://hdl.handle.net/2134/15904
4. Gochoo, M., Tan, T. H., Liu, S. H., Jean, F. R., Alnajjar, F. S., & Huang, S. C. (2019). Unobtrusive Activity Recognition of Elderly People Living Alone Using Anonymous Binary Sensors and DCNN. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 23(2), 693–702. https://doi.org/10.1109/JBHI.2018.2833618
5. Gram-Hanssen, K., & Darby, S. J. (2018). Home is where the smart is? Evaluating smart home research and approaches against the concept of home. *Energy Research & Social Science*, 37, 94–101. https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.037
6. Host, K., & Ivašić-Kos, M. (2022). An overview of Human Action Recognition in sports based on Computer Vision. *Heliyon*, 5, 8(6). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09633
7. Khodabandehloo, E., Riboni, D., & Alimohammadi, A. (2021). HealthXAI: Collaborative and explainable AI for supporting early diagnosis of cognitive decline. *Future Generation Computer Systems*, 116, 168–189. https://doi.org/10.1016/j.future.2020.10.030
8. Kopytko, V., Shevchuk, L., Yankovska, L., Semchuk, Z., & Strilchuk, R. (2018). Smart home and artificial intelligence as environment for the implementation of new technologies. *Traektoriâ Nauki=Path of Science*, *4*(9), 2007–2012. https://doi.org/10.22178/pos.38-2
9. Kravets, P., & Shymkovych, V. (2020). Hardware implementation neural network controller on FPGA for stability ball on the platform. In *Advances in Computer Science for Engineering and Education II*, 247–256. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16621-2_23
10. Kuppuswami, G., Sujatha, R., Nagarajan, D., & Kavikumar, J. (2021). Markov chain based on neutrosophic numbers in decision making. *Kuwait Journal of Science*, *48*(4). https://doi.org/10.48129/kjs.v48i4.9849
11. Lyazidi, A., & Mouline, S. (2019). Formal verification of UML state machine diagrams using Petri nets. In *Networked Systems: 7th International Conference, NETYS 2019, Marrakech, Morocco, June 19-21, 2019, Revised Selected Papers 7*, 67–74. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31277-0_5
12. Madhav, P. V., Reddy, V. S., Jena, B., Rishik, D., Ashfaque, M., Raju, R. C., & Supriya, P. (2023). Design and Implementation of Smart Housing System for Elderly Persons. In *2023 International Conference on Recent Advances in Electrical, Electronics, Ubiquitous Communication, and Computational Intelligence* (*RAEEU CCI*), 1–5. https://doi.org/10.1109/RAEEUCCI57140.2023.10134421
13. Najeh, H., Lohr, C., & Leduc, B. (2023). Convolutional Neural Network Bootstrapped by Dynamic Segmentation and Stigmergy-Based Encoding for Real-Time Human Activity Recognition in Smart Homes. *Sensors*, *23*(4). https://doi.org/10.3390/s23041969
14. Peetoom, K., Lexis, M. A., Joore, M. A., Dirksen, C. D., & de Witte, L. P. (2015). Literature review on monitoring technologies and their outcomes in independently living elderly people. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 10, 271–294. https://doi.org/10.3109/17483107.2014.961179
15. Pobar, M., & Ivasic-Kos, M. (2020). Active Player Detection in Handball Scenes Based on Activity Measures. *Sensors* (*Basel*), 20(5). https://doi.org/10.3390/s20051475
16. Ranasinghe, S., Machot, F. A., & Mayr, H. C. (2016). A review on applications of activity recognition systems with regard to performance and evaluation. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, *12*(*8*). https://doi.org/10.1177/1550147716665520
17. Rybarczyk, A., Formanowicz, D., & Formanowicz, P. (2024). The Role of Macrophage Dynamics in Atherosclerosis Analyzed Using a Petri Net-Based Model. *Applied Sciences*, *14*(8). https://doi.org/10.3390/app14083219
18. Shao, P. (2015). Intelligent control in smart home based on adaptive neuro fuzzy inference system. In *2015 Chinese automation congress* (*CAC*), 1154–1158. https://doi.org/10.1109/CAC.2015.7382672
19. Stojkoska, B. L. R., & Trivodaliev, K. V. (2017). A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions. *Journal of cleaner production*, *140*, 1454–1464. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.006
20. Suthar, B., & Gadhia, B. (2021). Human activity recognition using deep learning: A survey. In Data Science and Intelligent Applications. In *Proceedings of ICDSIA 2020*, Gujarat, India, 24-25 January 2020; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 217–223. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4474-3_25
21. Teslyuk, V. M., Beregovskyi, V. V., & Pukach, A. I. (2013). Development of smart house system model based on colored Petri nets. In *2013 XVIIIth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory* (*DIPED*), 205–208. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6653869
22. Teslyuk, V., Beregovskyi, V., Denysyuk, P., Teslyuk, T., & Lozynskyi, A. (2018). Development and implementation of the technical accident prevention subsystem for the smart home system. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, *10*(1), 1–8. https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.01.01
23. Teslyuk, V., Denysyuk, P., Al Shawabkeh, H. A. Y., & Kernytskyy, A. (2010). Developing the information model of the reachability graph. In *2010 XVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory* (*DIPED*), 210–214. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5623946
24. Teslyuk, V., Denysyuk, P., Beregovska, K., & Mashevska, M. (2017). Method of development Smart-House-Systems Models, based on Petri-Markov Nets, and extended by functional components. In *2017 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies* (*CSIT*), 1, 352–355. https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2017.8098803
25. Teslyuk, V., Denysyuk, P., Kryvinska, N., Beregovska, K., & Teslyuk, T. (2019). Neural controller for smart house security subsystem. *Procedia Computer Science*, *160*, 394–401. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.075
26. Tsmots, I., Teslyuk, V., Teslyuk, T., & Ihnatyev, I. (2018). Basic components of neuronetworks with parallel vertical group data real-time processing. In *Advances in Intelligent Systems and Computing II: Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2017, September 5-8 Lviv, Ukraine*, 558–576. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70581-1_39
27. Xing, M., Wei, G., Liu, J., Zhang, J., Yang, F., & Cao, H. (2020). A review on multi-modal human motion representation recognition and its application in orthopedic rehabilitation training. *Journal of Biomedical Engineering*, 37(1), 174–178. Chinese. https://doi.org/10.7507/1001-5515.201906053
28. Zhang, S., Yang, L. T., Zhang, Y., Lu, Z., Yu, J., & Cui, Z. (2023). Tensor-Based Baum – Welch Algorithms in Coupled Hidden Markov Model for Responsible Activity Prediction.

Transactions on Computational Social Systems, 10, 2924–2937. https://doi.org/10.1109/TCSS.2022.3227458
29. Zolfaghari, S., Keyvanpour, M. R., & Zall, R. (2017). Analytical review on ontological human activity recognition approaches. *International Journal of E-Business Research* (*IJEBR*), *13*(2), 58–78. https://doi.org/10.4018/IJEBR.2017040104
30. Zolfaghari, S., Khodabandehloo, E., & Riboni, D. (2022). TraMiner: Vision-based analysis of locomotion traces for cognitive assessment in smart-homes. *Cognitive Computation*, *14*(5), 1549–1570. https://doi.org/10.1007/s12559-020-09816-3
31. Zolfaghari, S., Massa, S. M., & Riboni, D. (2023). Activity recognition in smart homes via feature-rich visual extraction of locomotion traces. *Electronics*, *12*(9). https://doi.org/10.3390/electronics12091969

Kh. V. Beregovska, V. M. Teslyuk
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

MODELS OF ADAPTIVE SMART HOME SYSTEMS BASED ON PETRI NETS AND MARKOV MODELS

Modern smart home systems require active interaction with the owner to ensure a high level of comfort and energy savings. Moreover, the interaction should be as unobtrusive as possible, providing reminders of important events in a convenient form, assisting with household issues or automatically resolving them. To address this technical problem and accommodate the aforementioned range of functions, the authors proposed using a hardware-software technical system that employs special microcontroller tools with a system of sensors and actuators, hardware communication tools, and developed software that includes models based on Petri-Markov networks. These models allow processing data from sensors to determine user actions, processing them according to certain algorithms, and issue control signals to actuators (executive devices) that will turn on or off household devices depending on the probability of certain events. Furthermore, these models enable consideration of probabilistic processes, crucial for fifth-level intelligent systems. The proposed approach allows for comprehensive analysis of various scenarios in smart home systems, investigation of system dynamics and reliability, and elimination of ambiguous situations during complex transitions. Additionally, it supports decomposition at any level. Therefore, the paper presents models based on the theory of Petri-Markov networks and their research conducted. During the analysis of models and their research, state reachability graphs were built for the studied scenarios of smart home system operation. The obtained results demonstrate the finiteness and reachability of all states of the execution scenarios using the developed models, the ability to model and process various operation scenarios in the adaptive smart home system and the most important feature of the proposed approach is the inclusion of functional components of the system (sensors and actuators) which represent the hardware part of the system, into the Petri-Markov network-based model, resulting in the development of models of a qualitatively new functional level. Further research anticipates the hardware implementation of an adaptive smart home system using Petri-Markov network-based models and the implementation of a software core based on the developed models.

Keywords: smart home; Petri-Markov network-based models; state reachability graph; activities; operation scenarios.