

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПІЛОВОАНОЇ ТА БЕЗПІЛОТНОЇ АВІАЦІЇ

DOI 10.33099/2786-7714-2023-1-4-40-45

УДК 355.358

Ярошенко Ярослав Віталійович

<https://orcid.org/0000-0002-8651-4920>

Герасименко Володимир Вікторович (кандидат військових наук)

<https://orcid.org/0000-0003-2014-7408>

Коротін Сергій Михайлович (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-2123-6103>

Мартинюк Олексій Ростиславович (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-2578-0018>

Блискун Олександр Євгенійович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-7751-8313>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ АНАЛІЗУ АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ СПІЛЬНОЮ АВІАЦІЙНОЮ ГРУПОЮ ЗА ДОПОМОГОЮ АПАРАТУ МЕРЕЖІ ПЕТРІ

Сучасні наукові дослідження в області систем управління військового призначення не в повній мірі дозволяють проводити аналіз та оцінювання ефективності систем управління. Метою статті є представлення існуючого алгоритму управління спільною авіаційною групою пілотованої та безпілотної авіації за допомогою мережі Петрі. Математичний апарат та програмне забезпечення для моделювання мереж Петрі дозволяють у простому вигляді представити систему управління та оцінити її на відповідність її властивостям. У роботі проведено аналіз побудованої мережі Петрі та визначено, що математичний апарат мережі Петрі дозволяє розширити можливості щодо аналізу та оцінювання ефективності систем управління, які існують на даний час. Аналіз систем управління за допомогою мереж Петрі може стати складовою методик оцінювання ефективності систем управління.

Ключові слова: мережі Петрі, спеціальне програмне забезпечення CPN Tools, пілотована та безпілотно авіація; спільний бойовий порядок; спільна авіаційна група пілотованої та безпілотної авіації, винищувальна авіація, штурмова авіація, ударна група, повітряна розвідка, безпілотної літальний апарат, безпілотної авіаційний комплекс, бойове застосування, управління, система управління.

Вступ

Сучасні наукові дослідження відкривати нові підходи до вирішення наукових проблем, які виникають з розвитком новітніх технологій та систем. Існуючі методики оцінювання систем управління не в повній мірі дозволяють здійснювати аналіз та оцінювання систем управління, оскільки не враховують здатність потоку завдань (інформації) досягти кінцевого стану системи. Одним з існуючих методів математичного моделювання дискретних систем є мережі Петрі, які дозволяють здійснювати аналіз та проектування різноманітних систем у багатьох галузях, в тому числі і систем управління. Вони надають можливість графічно зображати моделі систем управління для їх простішого розуміння, а також їх використовують для аналізу та виявлення проблем у системах управління.

Метою статті є удосконалення способу аналізу та оцінювання системи управління спільною авіаційною групою пілотованої та безпілотної авіації з використанням математичного апарату

мереж Петрі.

Матеріали та методи

У [1-7] розглянуто область застосування мереж Петрі. У [8] описано алгоритм управління спільною авіаційною групою пілотованої та безпілотної авіації. У даному дослідженні застосовуються наукові методи системного аналізу та синтезу, метод математичного моделювання з використанням Мереж Петрі.

Результати

В сучасній військових операціях пілотована та безпілотно авіація все частіше застосовується в єдиних бойових порядках. Для виконання спільних завдань створюється спільна авіаційна група пілотованої та безпілотної авіації (САГ). Управління САГ здійснюється в загальній системі управління Повітряних Сил Збройних Сил України, яка складається з органів управління, пунктів управління і системи зв'язку та автоматизованого управління [8].

На рис. 1 представлено існуючий алгоритм управління САГ у ході виконання бойового

завдання за етапами бойового польоту (Алгоритм).
 У відповідності до Алгоритму безпілотної літальний апарат (БпЛА) виявляє ціль та передає координати на наземний пункт управління БпЛА, далі після завершення процесу планування польоту

ударної групи з групою винищувально-авіаційного прикриття виконується бойовий політ ударної групи. Після ураження визначеної цілі БпЛА проводить оцінювання результатів удару.

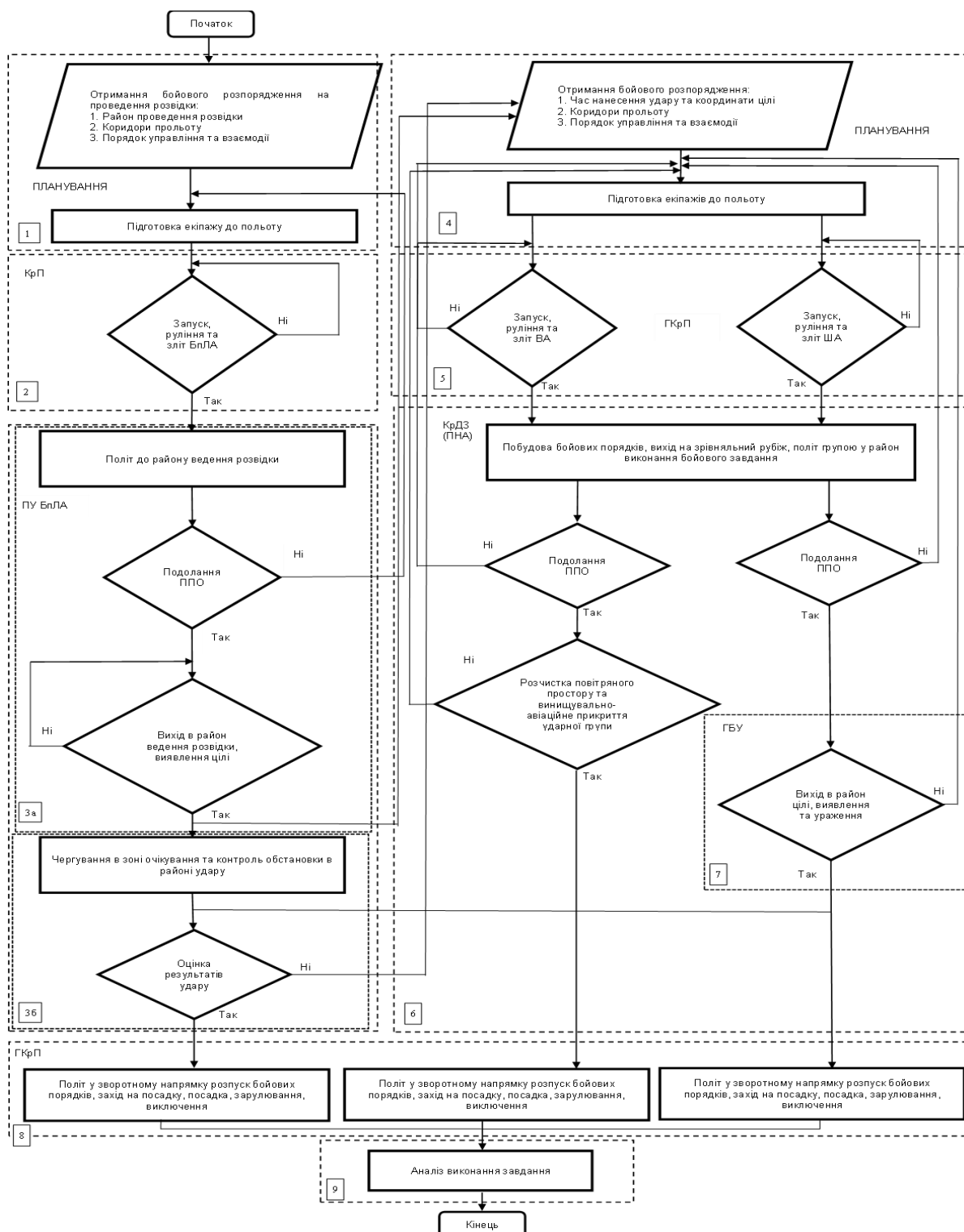


Рисунок 1. Варіант алгоритму управління спільною авіаційною групою у ході виконання бойового завдання за етапами бойового польоту

Розглянемо детально призначення мереж Петрі та які процеси вони дозволяють моделювати. Мережа Петрі – це графічний і математичний засіб моделювання динамічних дискретних і безперервних систем і процесів. Як правило, мережами Петрі моделюють паралельні (синхронні

та асинхронні) системи і процеси. Різноманітність видів мереж Петрі (тимчасові, стохастичні, кольорові, і т. ін) дозволяють моделювати практично всі види процесів: технологічні, виробничі та обчислювальні. Мережа Петрі є орієнтованим дводольним графом, який має чотири

базових елементи: вузли або місця; переходи; дуги і маркери (рис.2)[1-6].

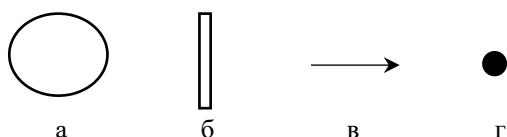


Рисунок 2. Структурні елементи мережі Петрі:
а) вузли або місця; б) переходи; в) дуги;
г) маркери

У дослідженні використовуватимемо кольорові часові мережі Петрі, які є розширенням кольорових мереж Петрі та дозволяють моделювати процеси з урахуванням часових характеристик. Вони дозволяють точніше моделювати системи з конкуруючими процесами, які мають різні часові обмеження та пріоритети. У кольорових часових мережах Петрі мітки мають не тільки кольори, але й значення, що відповідають часовим характеристикам процесів. Крім того, дуги між станами системи можуть мати також часові обмеження, які обмежують час, необхідний для переходу з одного стану в інший [5-6].

Представимо Алгоритм за допомогою мережі

Петрі, для цього вузол Алгоритму замінимо на переходи мережі Петрі, а дуги на позиції (рис. 3).

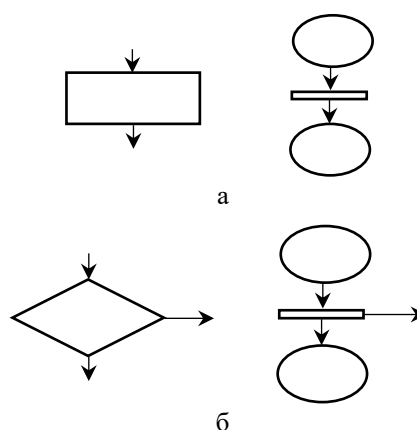


Рисунок 3. Схема заміни елементів Алгоритму на елементи мережі Петрі:
а) блок обробки; б) блок прийняття рішення

Проведемо заміну складових елементів Алгоритму на елементи мережі Петрі та отримаємо існуючий Алгоритм управління САГ у вигляді мережі Петрі за допомогою програми CPN Tools (рис. 4).

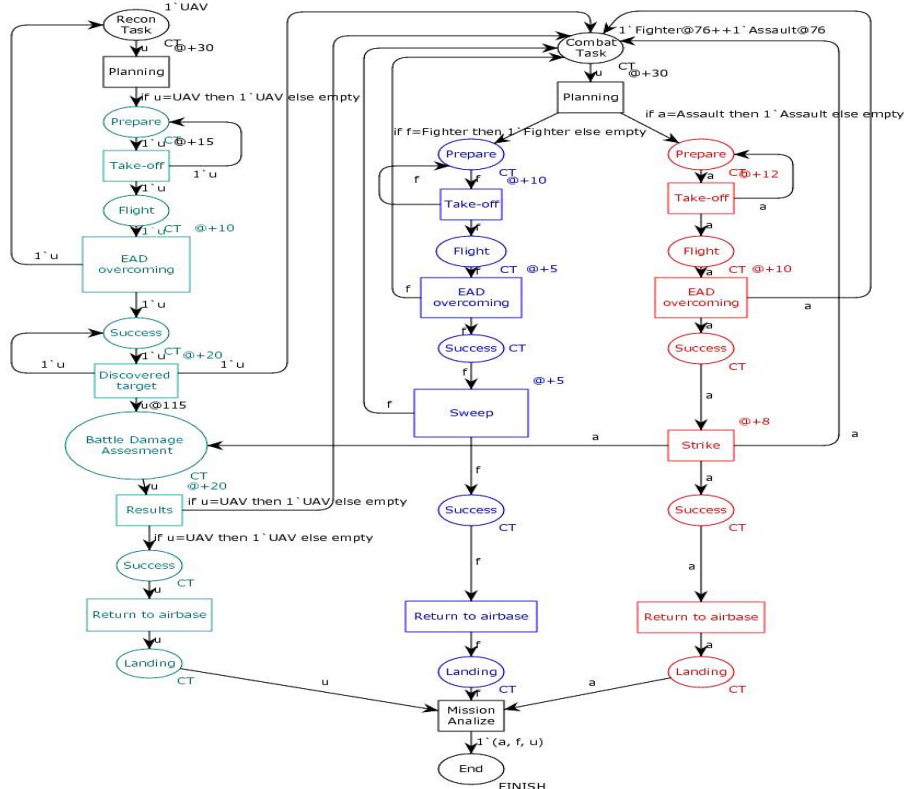


Рисунок 4. Існуюча модель системи управління авіації побудована на основі мереж Петрі

Мережа Петрі представляється чотирма множинами [7], $P=\{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ – множина позицій; $T=\{t_1, t_2, \dots, t_L\}$ – множина переходів таких, що $P \cap T = \emptyset$; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – множина дуг, що визначає взаємне співвідношення між множинами, таких що, $(P \times T) \in \emptyset$ і $(T \times P) \in \emptyset$; $M_0 = \{m_1^0, m_2^0, \dots, m_N^0\}$ – початкове маркування.

На рис. 4 модель Алгоритму представлено за допомогою Мережі Петрі має чотири групи кольорів: чорним (блоки 1, 4) позначені елементи Алгоритму в яких проходить процес планування та підготовки; бірюзовим кольором (блоки 2, 3а, 3б, 8) позначені етапи бойового польоту БпЛА; фіолетовим (блоки 5а, 6а, 8) – етапи бойового

польоту групи винищувально-авіаційного прикриття (ВАП); коричневим (блоки 5б, 6б, 7, 8) – етапи бойового польоту ударної групи. Біля позиції Recon Task (розвідувальне завдання) є позначка 1'UAV, яка в програмі CPN Tools заміняє маркери та виділена салатовим кольором при знаходженні маркера в певній позиції. Позначки типу @+30 біля переходів позначають час затримки маркера на даному переході, числові значення затримок розраховані відповідно дальності польоту БпЛА та літаків від аеродрому до цілі, в даному випадку 150 км, швидкість польоту для БпЛА взята з розрахунку 150 км/год для БпЛА та 900 км/год для літаків. Виліт з готовності №1 для БпЛА 15 хв, для винищувачів 10 хв, для ударної групи 12 хв. Позначки типу 1'u, f, а визначають пропускну спроможність дуг та приналежність до певного типу БпЛА або літака (u – БпЛА; f – винищувач; а – штурмовик). Позначка CT позначає множину кольорів з маркерами під назвами UAV, Fighter, Assault, тобто позначають приналежність до складової САГ.

Програма CPN Tools проводить автоматичну перевірку синтаксису мережі при її створенні та завантаженні.

Проведемо аналіз побудованої в мережі Петрі моделі Алгоритму. Мережа Петрі перевіряється за наступними властивостями: безпечність, обмеженість, збереження, активність, досяжність та покриваємість.

Безпечність. Одна з важливих властивостей мережі Петрі є безпечність. Позиція мережі Петрі безпечна, якщо кількість маркерів в ній ніколи не перевищує 1. Мережа Петрі безпечна якщо безпечні всі її позиції. Наша модель мережі Петрі (рис. 4) не є безпечною, оскільки має зворотні зв'язки, що призводить накопичення маркерів у позиціях. Це може призвести до значного збільшення часу на виконання завдання або взагалі до його не виконання, при умові постійного не виконання етапів бойового польоту або зміни місця дислокації об'єкта удару.

Обмеженість. Безпечність – це частковий випадок більш загальної властивості обмеженості. Позиція є k-безпечна або k-обмежена, якщо кількість маркерів в ній не може перевищувати ціле число k. Іноді нас може цікавити лише обмежена чи ні кількість маркерів у позиції, а не конкретне значення межі. Позиція називається обмеженою, якщо вона k-безпечна для деякого k; мережа Петрі обмежена, якщо всі її позиції обмежені. Модель Алгоритму не є обмеженою оскільки жодна з позицій немає обмежень по кількості маркерів. Це не впливає на функціонування моделі в мережі Петрі, проте в реальному житті кількість літаків та БпЛА, які знаходяться під управлінням певного пункту управління можуть обмежуватись класною кваліфікацією офіцера з бойового управління або зовнішнього пілота, а також технічних можливостей пунктів управління авіацією.

Збереженість. Мережа Петрі $C = (P, T, I, O)$ з початковим маркуванням μ називається суворо

зберігаємою, якщо для всіх $\mu' \in R(C, \mu)$:

$$\sum_{p_i \in P} \mu'(p_i) = \sum_{p_i \in P} \mu(p_i).$$

Суворо зберігаємість це дуже сильне обмеження. З нього слідує, що кількість входів у кожний перехід повинна дорівнювати числу виходів, $|I(t_i)| = |O(t_i)|$. Для нашої моделі ця умова не виконується, оскільки число маркерів постійно зростає за рахунок зворотних зв'язків, тому модель Алгоритму не має властивості збереженості. Дана властивість може впливати, як вже описувалось вище на кількість літаків та вертольотів, що можуть знаходитись під управлінням одного офіцера з бойового управління та технічних можливостей пунктів управління авіацією.

Активність. Перехід в мережі Петрі називається активним, якщо він не заблокований (не тупиковий). Перехід t_j мережі Петрі C називається потенційно запускаємим в маркуванні μ , якщо існує маркування $\mu' \in R(C, \mu)$, в якій дозволений t_j . Перехід активний в маркуванні μ , якщо потенційно запущений у всякому маркуванні з $R(C, \mu)$. Відповідно, якщо перехід активний, то завжди можна перевести мережу Петрі з її поточного маркування в маркування, в якому запуск переходу стане дозволеним. В моделі Алгоритму всі переходи є активними, тому вся модель мережі Петрі відповідає властивості активності. Це показує, що наша модель робоча і потік інформації проходитиме від початкового до кінцевого стану системи управління.

Досяжність і покриваємість. В мережі Петрі для перевірки моделі на відповідність властивостям досяжності та покриваємість зазвичай будується дерево досяжності, проте це громіздкий та об'ємний матеріал, який для нашої моделі займе порядку декількох сторінок. Для перевірки моделі Алгоритму (рис. 4) проведемо моделювання проходження потоку виконання завдання у програмі CPN Tools (рис. 5). Як видно з рис. 5 наша модель відповідає властивості досяжності оскільки маркер від початкової позиції Recon Task (отримання завдання на ведення розвідки) через 202 переходи дійшов до позиції End. Це зайняло 155 умовних одиниць часу (в програмі CPN Tools час затримки відображається в умовних одиницях). В даній моделі задіяні всі позиції та переходи, тому вона відповідає властивості покриваємість. Цю властивість гіпотетично можна вважати показником виконання циклу управління, оскільки проходження маркерів через всі стани та переходи означає завершення циклу управління.

Обговорення

Мережі Петрі є сучасним засобом для моделювання систем управління. Він дозволяє провести аналіз побудованих у мережі Петрі систем управління на відповідність властивостям безпечності, обмеженості, збереження, активності, досяжності та покриваємість. Дані властивості

дозволяють перевірити модель системи управління на проходження потоку виконання завдань від початкового етапу отримання завдання до завершення аналізу виконаного завдання. Мережі Петрі не дозволяють розрахувати час циклу управління, який є одним з показників ефективності систем управління військового призначення, проте вона може продемонструвати

досліднику чи проходить інформація в системі від початку і до кінця. В подальшому моделювання систем управління військового призначення за допомогою математичного апарату мережі Петрі потребує подальших досліджень, і може бути складовою аналізу та оцінювання систем управління.

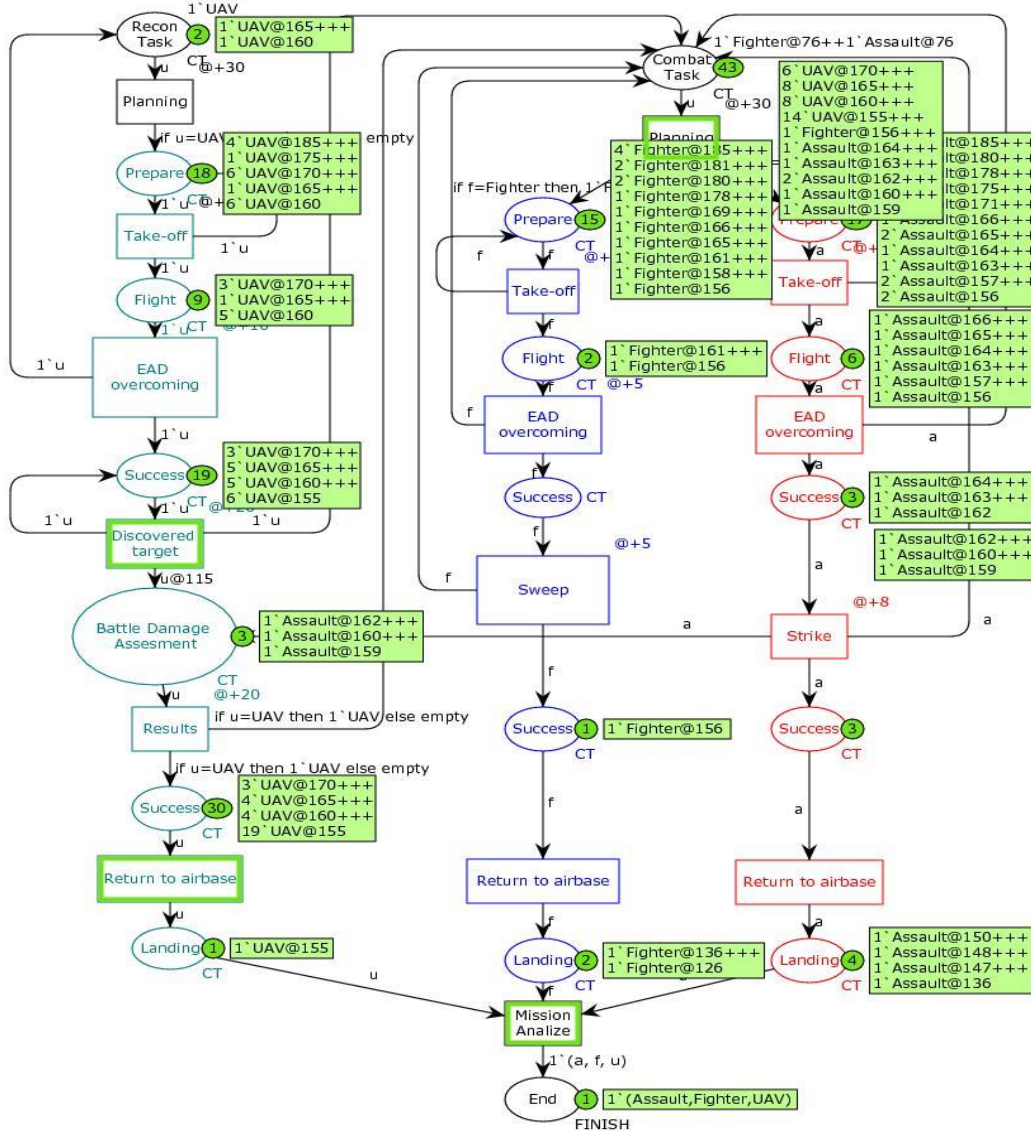


Рисунок 5. Результати моделювання потоку виконання завдання спільною авіаційною пілотованої та безпілотної авіації за допомогою програмного забезпечення CPN Tools

Висновки

У даній статті представлено існуючий алгоритм управління пілотованою та безпілотною авіацією та проведено моделювання за допомогою мережі Петрі. На основі результатів моделювання визначено, що існуюча система управління авіацією не є безпечною, не є обмеженою, не виконується суворя зберігаємість мережі, мережа є активною, досяжною та покриваємою. Даний аналіз дозволяє візуально оцінити вузькі місця системи управління, які можуть впливати на затримки передачі інформації та її накопичення в

певному місці (позиції). Це дозволяє на основі аналізу внести зміни або удосконалити систему управління. Разом з тим, мережі Петрі не дозволяють моделювати час циклу управління оскільки він задається дослідником самостійно. Мережі Петрі можуть застосовуватися у складі методик оцінювання ефективності систем управління. У подальших дослідженнях рекомендовано детально дослідити питання застосування математичного апарату мереж Петрі під час дослідження систем управління військового призначення.

Список використаних джерел

1. П.М. Литвин, “Мережні моделі для аналізу складних систем”, поясн. записка до атест. роб. здоб. вищої освіти на другому (магістер.) рівні, спец. 123 Комп’ютерна інженерія, ХНУРЕ, Харків, 2020. Дата звернення: 1 лют. 2023. [Онлайн]. Доступно: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/14442>.
2. Д.А.Зайцев, Т.Р. Шмелева, Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools. Одесса, Украина: ОНАС им. А.С. Попова, 2009. Дата звернення: 1 лют. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://dut.edu.ua/ru/lib/5/category/731/view/456>.
3. Д.А. Зайцев. Мережі Петрі і моделювання систем. Методичні вказівки до практичних занять і лабораторних робіт для підготовки магістрів з напрямку “Телекомунікації” – Одеса: УНАЗ ім. О.С. Попова, 2006.
4. W. Reisig, The basic concepts. In: Understanding Petri Nets: Modeling Techniques, Analysis Methods, Case Studies. Heidelberg: Springer, 2013. [E-book] Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-33278-4_2.
5. L. Popova-Zeugmann, Time and Petri Nets. Heidelberg: Springer, 2013. [E-book] Available: DOI: 10.1007/978-3-642-41115-1.
6. K. Jensen, LM. Kristensen, Coloured Petri Nets: Modelling and validation of concurrent systems. Berlin: Springer; 2009. [E-book] Available: DOI: 10.1007/b95112.
7. Я. В. Ярошенко та інші, “Алгоритм процесу управління спільною авіаційною групою за етапами бойового польоту”, Повітряна міць України, № 2(3), грудень 2022, с. 29-34.

JUSTIFICATION OF THE JOINT AVIATION GROUP MANAGEMENT ALGORITHM ANALYSIS METHOD USING THE PETRI NET APPARATUS

Yaroslav Yaroshenko

<https://orcid.org/0000-0002-8651-4920>

Volodymyr Herasymenko (Candidate of Military Sciences)

<https://orcid.org/0000-0003-2014-7408>

Serhii Korotin (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-2123-6103>

Oleksii Martyniuk (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-2578-0018>

Oleksandr Blyskun (Ph.D.)

<https://orcid.org/0000-0002-7751-8313>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Modern scientific research in the field of military management systems does not fully allow analysis and evaluation of the effectiveness of management systems. The purpose of the article is to present the existing algorithm for managing a joint aviation group of manned and unmanned aviation using a Petri net. Mathematical apparatus and software for modeling Petri nets allow you to present a control system in a simple form and evaluate it according to its properties. The paper analyzes the built Petri net and it is determined that the mathematical apparatus of the Petri net allows to expand the possibilities for analysis and evaluation of the effectiveness of management systems that exist at the moment. Analysis of control systems using Petri nets can become a component of methods for evaluating the effectiveness of control systems.

Keywords: *Petri nets, special software CPN Tools, manned and unmanned aviation; common order of battle; joint manned and unmanned aviation group, fighter aircraft, attack aircraft, strike group, aerial reconnaissance, unmanned aerial vehicle, unmanned aircraft system, combat application, management, control system.*

References

1. P.M. Lytvyn, “Merezhni modeli dlia analizu skladnykh system”, poiasn. zapyska do atestat. rob. zdob. vyshchoi osvity na druhomu (mahisterskomu) rivni, spets. 123 Kompiuterna inzheneriia, KhNURE, Kharkiv, 2020. Data zvernennia: 1 liut. 2023. [Onlain] Dostupno: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/14442>.
2. D.A. Zaitsev, T.R. Shmeleva, Modelirovaniye telekommunikatsyonnykh system v CPN Tools, Odessa, Ukraina: ONAS ym. A.S. Popova, 2009. Data zvernennia: 1 liut. 2023. [Onlain] Dostupno: <https://dut.edu.ua/ru/lib/5/category/731/view/456>.
3. D.A.Zaitsev. Merezhi Petri i modeliuvannia system. Metodychni vkazivky do praktychnykh zaniat i laboratornykh robit dlia pidhotovky mahistriv z napriamku “Telekomunikatsii”, Odesa: UNAZ im. O.S. Popova, 2006.
4. W. Reisig, The basic concepts. In: Understanding Petri Nets: Modeling Techniques, Analysis Methods, Case Studies. Heidelberg: Springer, 2013. [E-book] Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-33278-4_2.
5. L. Popova-Zeugmann, Time and Petri Nets. Heidelberg: Springer, 2013. [E-book] Available: DOI: 10.1007/978-3-642-41115-1.
6. K. Jensen, LM. Kristensen, Coloured Petri Nets: Modelling and validation of concurrent systems. Berlin: Springer; 2009. [E-book] Available: DOI: 10.1007/b95112.
7. Ya. V. Yaroshenko ta inshi, “Alhorytm protsesu upravlinnia spilnoiui aviatsiinoiu hrupoiui za etapamy boiovoho polotu”, Povitriana mits Ukrainy, № 2(3), hrud. 2022, s. 29-34.