

DOI <https://doi.org/10.15407/csc.2021.05-06.003>  
УДК 004.7; 004.75

**В.Ф.ГРЕЧАНІНОВ**, канд. техн. наук., завідувач науково-дослідного відділу Інтелектуальних інформаційно-аналітичних систем Інституту проблем математичних машин і систем (ІПММС НАН України), 03187, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 42, Київ, Україна, [vgrechaninov@gmail.com](mailto:vgrechaninov@gmail.com)

**А.В. ЛОПУШАНСЬКИЙ**, наук. співробітник науково-дослідного відділу Інтелектуальних інформаційно-аналітичних систем Інституту проблем математичних машин і систем (ІПММС НАН України), 03187, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 42, Київ, Україна, [anatoliy.lorushanskyi@gmail.com](mailto:anatoliy.lorushanskyi@gmail.com)

**Т.К. ЄРЕМЕНКО**, канд. техн. наук, старший наук. співробітник науково-дослідного відділу Інтелектуальних інформаційно-аналітичних систем Інституту проблем математичних машин і систем (ІПММС НАН України), 03187, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 42, Київ, Україна, [ierbegin@gmail.com](mailto:ierbegin@gmail.com)

## ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СИСТЕМ ІЕРАРХІЧНОГО УПРАВЛІННЯ

---

*Стаття присвячена багаторівневим ієрархічним системам управління, їхнім програмно-технічним комплексам, тенденціям розвитку. Описується суть, визначення та характеристики ієрархічного управління, специфічні вимоги до програмно-технічного комплексу, аналізується актуальний стан проблеми ієрархічного управління та вплив сучасних досягнень ІТ-технологій на архітектуру системи. На підставі аналітично-дослідницьких даних щодо прогнозу трендів розвитку ІТ технологій робиться припущення про подальший розвиток програмно-технічного комплексу ієрархічних систем управління.*

**Ключові слова:** ієрархічне управління, складні системи, прогнозування розвитку ІТ-систем.

### Вступ

Багато проблем, які були поставлені та вирішувалися основоположниками кібернетики у 60–70-ті роки минулого століття, в наш час знаходять своє втілення. Як приклад можна навести розпізнавання мови, тексту, зображень, що вже стали буденністю, нейронні мережі, машинне навчання, системи управління й прийняття рішень та багато іншого. Основа цих розробок – неймовірні досягнення у розвитку програмно-технічного комплексу (ПТК), систем зв'язку, систем збирання та зберігання даних та знань, тобто інформаційних технологій.

Розвитку інформаційних технологій приділялася (80-ті – 00-ві) така велика увага у всьому світі, що технологічні досягнення затьмарили у суспільній свідомості інтерес до кібернетики (термін «кібернетика» практично зник із вживання, наприклад, у переліку наукових спеціальностей). Але поставлені проблеми і теоретичні дослідження лишилися. Коли з'явилася можливість втілити їх у повсякденне життя, то з'ясувалося, що ці проблеми потрібно переосмислити в нових реаліях. До таких напрямів досліджень відносяться багаторівневі ієрархічні системи управління.

Ієрархія — суттєве поняття класичної кібернетики. Стверджувалося, що принцип ієрархічної організації — є принципом функціонування біологічних систем [1, 2], в тому числі роботи мозку [3].

Для організаційних систем серед принципів управління принцип ієрархії стояв на першому місці [4]. Система управління має, зазвичай, ієрархічну структуру. Вона повинна відповідати функціональній структурі керованої системи і не повинна суперечити ієрархії суміжних (по горизонталі та вертикалі) систем. Завдання та ресурси, що забезпечують діяльність керованої системи, повинні бути декомпозовані відповідно до структури останньої. Початкове уявлення про ієрархію найточніше виражено словами: «Фактично будь-яка складна система, яка виникла природно, або створена людиною, може вважатися організованою, тільки якщо вона заснована на певній ієрархії або переплетенні кількох ієрархій. Досі ми не знаємо організованих систем, влаштованих інакше» [5].

З тих пір точка зору на ієрархічні системи управління змінювалася як змінювалися і технологічні можливості. В даний час для стратегічного планування необхідно подати прогноз розвитку систем на майбутнє.

*Метою* даної роботи є спроба прогнозу, якими будуть ієрархічні багаторівневі системи управління в майбутньому і як це залежить від новітніх технологій, що визначають їхній програмно-технічний комплекс.

### **Особливості ієрархічних систем управління та додаткові вимоги до ПТК**

Робота [6] — найбільш значна праця, що являє собою суворий, у математичній формалізації виклад теорії управління у великих системах, побудованих за ієрархічним принципом. Можна назвати її підсумковою роботою цього напрямку за період «класичної кібернетики». Містить загально визначену термінологію, класифікацію та основні ідеї та результати важливі для створення таких систем. Визначення багаторівневої ієрархічної системи надається через її суттєві характеристики:

- послідовне вертикальне розташування підсистем, що становлять цю систему (вертикальна декомпозиція);

- пріоритет дій чи право втручання підсистем верхнього рівня;

- залежність дій підсистем верхнього рівня від фактичного виконання нижніми рівнями своїх функцій.

Запроваджується несувора класифікація ієрархічних систем (допускається існування систем, що належать одночасно до кількох класів) відповідно до характеристик, за якими виділяються рівні ієрархії:

- а) рівень опису, або абстрагування (страта);

- б) рівень складності прийнятого рішення (шар);

- в) організаційний рівень (ешелон).

Виділяється центральна проблема теорії управління багаторівневими системами — координація елементів ієрархічної структури. Для багаторівневих складних систем необхідно враховувати ряд факторів [7], що впливають на ефективність координації та управління:

- фактор агрегування, що полягає у агрегуванні (тобто «згортанні», «стисненні» тощо) інформації про елементи системи, підсистеми, навколишнє середовище і т.д. у міру зростання рівня ієрархії;

- економічний фактор, що полягає в зміні фінансових, матеріальних та інших ресурсів системи при зміні складу учасників системи (керованих суб'єктів, проміжних управляючих органів і т.д.), що володіють власними інтересами;

- фактор невизначеності, що полягає у зміні інформованості учасників системи про суттєві внутрішні та зовнішні параметри функціонування;

- організаційний фактор, що полягає в зміні відношення влади, тобто можливості одних учасників системи встановлювати «правила гри» для інших учасників;

- інформаційний фактор, що полягає в зміні інформаційного навантаження на учасників системи.

Таким чином, можна зробити висновок, що ієрархічні системи мають складну структуру,

яка може з часом змінюватися. Ці зміни обумовлені впливом зовнішнього середовища (економічною, політичною ситуацією, появою нових законів, тощо). Постійним залишається факт наявності рівнів ієрархії (вертикалі), які зберігають свою послідовність, і залежність правил взаємодії між елементами системи від рівнів ієрархії, у яких вони перебувають. Змінюватися може кількість рівнів ієрархії, кількість елементів на кожному рівні, правила взаємодії між елементами.

Програмно-технічний комплекс ієрархічної системи додатково до основних функцій складних систем повинен забезпечити:

- інформаційний та технічний зв'язок між структурними елементами ієрархічної схеми у відповідності до правил, що визначають структуру;
- ефективність обчислень, пов'язаних з агрегацією інформації та аналітичними потребами прийняття управлінських рішень;
- збирання та зберігання інформації з регульованим доступом до неї;
- інтеграцію та вилучення структурних елементів та рівнів ієрархії.

### **Актуальний стан систем ієрархічного управління**

За приклади ієрархічних систем управління можна навести державні організації, великі підприємства. Зокрема НАТО, як організація, має три рівні (ешелони) управління: стратегічний, оперативний і тактичний. Кожен рівень може мати складну структуру (комітети, оперативні командування, тощо).

Взаємодію між рівнями ієрархії можна продемонструвати на прикладі процесу планування в комунікаційно-інформаційних системах, що є складовою процесу планування НАТО на всіх його трьох рівнях: стратегічному, оперативному та тактичному. В результаті планування на стратегічному рівні отримують стратегічну оцінку, варіанти військового реагування, стратегічний план операції та директиви стратегічного планування. Завдання планування на оперативному рівні визначаються на стратегічному рівні.

Результати оперативного планування включають проекти декларацій вимог щодо можливостей театру та проект кризового встановлення. Результати оперативного планування інформаційно-комунікаційної системи являють собою внесок у такі допоміжні елементи плану оперативного рівня: оперативна оцінка інформаційно-комунікаційної системи, вимога до обміну інформацією та матриця послуг. Процес планування містить ряд ітерацій і циклів спрямованих на узгодження з загальними планами НАТО [7].

Після встановлення операційного контексту його слід пов'язати з технічною структурою додатків, послуг та обладнання. Ці можливості Інформаційно-комунікаційних системи охоплюють дві значущі категорії: «можливості для користувача» та «технічні послуги». Відносини між цими категоріями та окремими рівнями всередині них можна розглядати як ієрархічну структуру, від рівня прикладних програм до фізичного рівня [7] (рис.1).

Тут «таксономія» визначається як конкретна класифікація, розташована в ієрархічній структурі, що організована відносинами супертип-підтип, тобто являє собою приклад класу ієрархічних систем за стратами опису або абстрагування.

*Архітектурний підхід* до проектування інформаційних та автоматизованих систем, що базується на цілісному багатоаспектному уявленні про створювану систему та її підсистеми.

Архітектура системи за визначенням стандарту ISO «*Systems and software engineering — Architecture description*» [8] являє собою фундаментальні поняття або властивості системи в її середовищі, втілені в її елементах, взаємозв'язках і в принципах її проекту та еволюції.

Архітектурний підхід — це аналіз системи з точки зору розробників, користувачів та власників (або відповідальних осіб) у контексті впливу зовнішніх факторів, зацікавленості внутрішніх та зовнішніх агентів, тощо. Використання архітектурного моделювання дозволяє порівнювати різні пропозиції та ідеї під час створення системи. Для ієрархічної системи управління створення архітектурної моделі під час проектування та модернізації очевидно актуально.

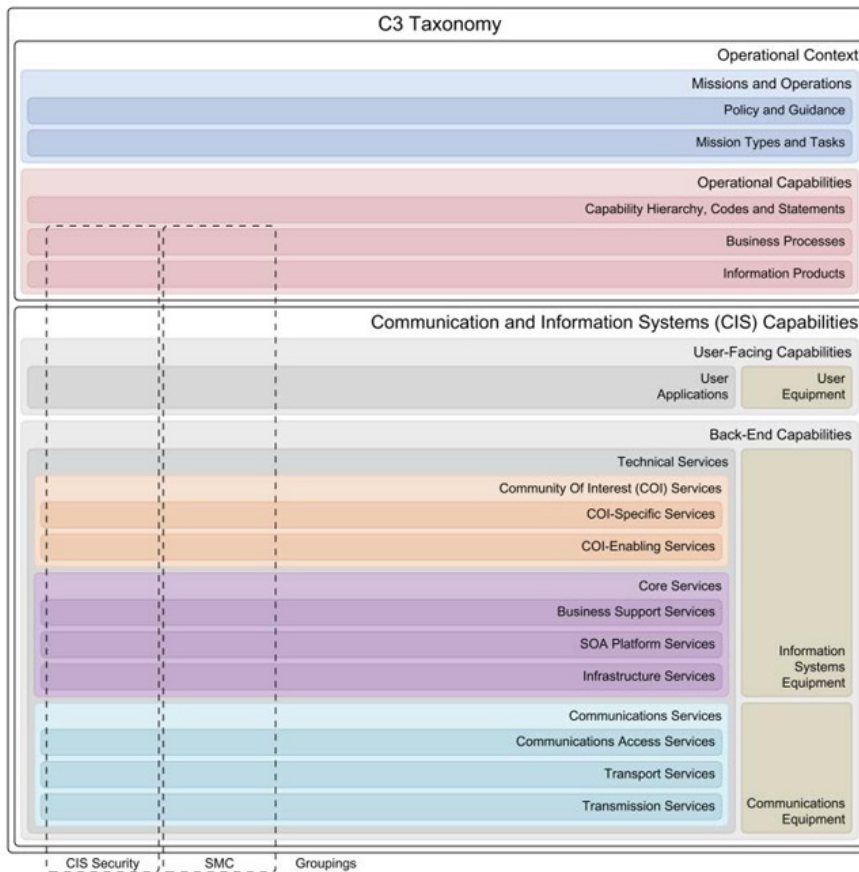


Рис. 1. Верхній ряд таксономії С3 (Consultation, Command and Control) НАТО

Ідея єдиного інформаційного простору пов'язана з необхідністю об'єднання різноманітних постачальників і користувачів інформації в межах єдиної системи аналогічно відображенню різноманітних об'єктів у єдиній системі координат. Включає визначення єдиної понятійної системи — єдиної онтології понять прикладної області, комунікаційної моделі тощо. Методи, алгоритми та підсистеми верифікації інформації, злиття та інтеграції.

*Сховища даних та озера даних.* Сховище даних — це різновид системи управління даними, що забезпечує підтримку бізнес-аналітики. Сховища даних призначені лише для виконання запитів та аналізу й зазвичай містять великі обсяги історичних даних. Озеро даних призначено для зберігання необроблених даних в їхньому оригінальному форматі доти, поки вони не знадобляться. Обидві ідеї відкривають великі можливості

для аналітики у великих багаторівневих системах керування.

*Сервіс-орієнтована архітектура інформаційних систем.* Дозволяє створювати додатки з легко замінюваних модулів — сервісів, які взаємодіють на основі інтерфейсу, незалежного від мови та програмної платформи. Як було видно з прикладу таксономії С3 НАТО, сервіс-орієнтована архітектура не заважає організації ієрархічного управління на рівні бізнес-процесів.

*Децентралізація управління* — делегація функцій управління у напрямку до нижчих рівнів ієрархії. Передбачає використання розподілених систем підтримки прийняття рішень. Як наслідок, важливим інформаційним аспектом управління у децентралізованих ієрархічних системах є створення інтелектуальних аналітичних систем, що реалізують інформаційно-аналітичне забезпечення цілепокладання та всього циклу управління.



*Уцільнення ієрархії* — забезпечення конкурентоспроможності підприємства, яке використовує автоматизовану систему управління, шляхом побудови «пласкої» організаційної структури, що ґрунтується на лідерстві. Очікується, що організація стане гнучкішою, оперативно реагуватиме на зовнішні виклики та ініціативу знизу. Однак не завжди і не для всіх такі трансформації пройшли успішно. Необхідно ретельно аналізувати діяльність системи та зовнішні умови [9].

*Інтелектуалізація* систем ієрархічного управління передбачає використання системних знань, інтелектуального потенціалу працівників, інформаційних технологій, включаючи доступ до мереж баз даних та моделювання складних процесів, у тому числі із застосуванням штучного інтелекту.

Це реалізує здатність систем управління приймати рішення в умовах значної невизначеності, на основі різномірної інформації (інформації з різних проблемних областей), їх спроможність самонавчатися, адаптуватися до «незапрограмованих» ситуацій, які ще й часто змінюються.

*Мережецентризм* передбачає досягнення переваги перед конкурентом для бізнес-організації або противником для військової організації за рахунок переваги системи управління, на підставі більшої поінформованості про поточну ситуацію, швидкого та адекватного її аналізу та прийняття рішення. Система управління базується на технології інформаційно-комунікаційної мережі, яка географічно розподілена і мобільна.

Мережецентризм викликав багато дискусій щодо того, як він узгоджується з ієрархічним управлінням. У керуючій системі НАТО під впливом мережецентризму було введено поняття групи з інтересів, яке відповідає військовому угрупованню союзної держави. Під час виконання певної місії міжнародні сили є кількома такими групами.

## **Перспективи розвитку ПТК ієрархічних систем управління**

Ієрархічні системи в найближчому майбутньому не втратять своєї актуальності для

складних систем. У XXI столітті були спроби заперечити ефективність ієрархічного управління, але вони закінчилися невдачею. Отже ієрархічні системи будуть існувати і прогресувати разом із прогресом ІТ-технологій.

В кінці жовтня аналітико-дослідні і консалтингові компанії опублікували свої прогнози.

Аналітично-дослідна компанія *Gartner* [10] на 2022 рік спрогнозувала появу цікавих ідей та інформаційно-технічних рішень.

На ринок виходить нова модель штучного інтелекту — генеративний штучний інтелект (від англ. *generative* — штучний інтелект, що виробляє, створює). Використовує методи машинного навчання, орієнтовані на вивчення контенту або об'єктів та використання отриманих даних для створення нових, повністю оригінальних, реалістичних відео- та аудіо-артефактів, генерацію різних видів тексту природною мовою. Штучний інтелект може автоматично генерувати програмний код для опису завдання, яке потрібно вирішити.

В ієрархічних системах управління генеративний штучний інтелект може використовуватися для агрегації й візуалізації даних під час обміну ними між рівнями ієрархії та в ситуаційних центрах.

*Тканина даних (Data Fabric)* — це архітектура управління інформацією, яка призначена для максимально ефективного доступу до корпоративних даних. На кожному кроці обробки інформації використовується машинне навчання — від аналізу даних до оптимізації алгоритмів їхньої обробки. Тканина даних гарантує гнучку, стійку інтеграцію даних між платформами та користувачами, тобто всі споживачі даних, всі джерела даних пов'язані наскрізною інтеграцією. Тканина даних може бути використана для вирішення двох завдань ієрархічних систем — зберігання даних та інтеграція джерел даних.

*Мережа кібербезпеки (Cybersecurity Mesh)*. Сенс мережі кібербезпеки полягає в тому, щоб забезпечити безпечний доступ людини до будь-якого цифрового ресурсу незалежно від місцезнаходження як ресурсу, так і людини. Це рішення формує периметр захисту навколо

окремої персоні, а не навколо організації. У *Gartner* стверджують, що до 2024 року компанії, які будуть використовувати такі інструменти, зможуть скоротити фінансові наслідки можливіх кібер-інцидентів у середньому до 90%.

Це рішення може бути вельми корисним, оскільки кіберзахист для складних багаторівневих систем, які використовують інтенсивний обмін інформацією, дуже актуальний.

Дотримуючись напрямів розвитку ІТ-технології можна зробити прогноз власне для ієрархічних систем: ієрархічні системи складатимуться зі стандартних компонентів, керування якими буде покладено на елементи штучного інтелекту.

Розробка допоміжних проблем (таких як відображення та інтеграція даних), скоріш за все, відійде у минуле — можна буде скористатися готовим рішенням. Залишиться моделювання та розробка ієрархічної структури, що підтримує взаємодію між акторами, правила цієї

взаємодії, тобто фактично метамодель системи. Залишиться простір для математичної творчості (агрегація інформації та аналітичні функції), якщо стандартні варіанти не будуть підходити.

## Висновки

В результаті аналізу суті ієрархічних багаторівневих систем управління, актуального стану та прогнозу розвитку ІТ-технологій автори зробили такі висновки:

- ієрархічна структура складної багаторівневої системи буде затребувана у недалекому майбутньому;
- ієрархічні системи складатимуться зі стандартних компонентів з елементами штучного інтелекту, який буде виконувати управління компонентами;
- буде спрощено процес створення ієрархічної системи, отже можна буде скористатися деякими готовими рішеннями.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бернштейн Н. А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М. : Медицина, 1966. 347 с.
2. Уолтер Г. Живой мозг. М. : Мир, 1970. 300 с. / Walter G. The Living Brain. London : Pelican Books, 1963. 255 p.
3. Амосов Н. М. Моделирование сложных систем. Киев : Наукова думка, 1968. 81 с.
4. Турчин В. Ф. Феномен науки: Кибернетический подход к эволюции. М. : Наука, 1993. 296 с.
5. Месарович М., Тахо Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. «Мир», Москва, 1973. 344 с.
6. Новиков Д. А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. М. : ЛЕНАНД, 2016. 160 с
7. NATO Standard AJP-6 Allied joint doctrine for communication and information systems Edition A Version 1 february 2017 Published by the NATO Standardization Office.
8. ISO/IEC/IEEE 42010:2011 «Systems and software engineering – Architecture description».
9. Лисина М. И. Обеспечение конкурентоспособности предприятия путем построения «плоской» организационной структуры, основанной на лидерстве. Проблемы современной экономики. 2009. 1 (29). С. 551–554.
10. Gartner Identifies the Top Strategic Technology Trends for 2022. URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-10-18-gartner-identifies-the-top-strategic-technology-trends-for-2022>.

Надійшла 11.11.2021

## REFERENCES

1. Bernshtein N. A., 1966. Ocherki po fiziologii dvizheniy i fiziologii aktivnosti [Essays on the physiology of movements and the physiology of activity], Meditsina, Moscow. (In Russian).
2. Walter G., 1963. The Living Brain [Zhivoy mozg]. Pelican Books, London. (In Russian).
3. Amosov N. M., 1968. Modelirovaniye slozhnykh sistem. [Complex systems modeling], Naukova dumka, Kyiv. (In Russian)
4. Amosov N. M., 1968. Modelirovaniye slozhnykh sistem [Complex systems modeling], Naukova dumka, Kyiv. (In Russian).

5. Amosov N. M., 1968. Modelirovaniye slozhnykh sistem [Complex systems modeling], Naukova dumka, Kyiv. (In Russian).
6. Novikov D. A., 2016. Kibernetika: Navigator. Istoriya kibernetiki, sovremennoye sostoyaniye, perspektivy razvitiya [Cybernetics: Navigator. History of cybernetics, current state, development prospects], LENAND, Moskva. (In Russian).
7. NATO Standard AJP-6 Allied joint doctrine for communication and information systems Edition A Version 1 february 2017 Published by the NATO Standardization Office.
8. ISO/IEC/IEEE 42010:2011 «Systems and software engineering — Architecture description».
9. Lisina M. I., 2009. «Obespecheniye konkurentnosposobnosti predpriyatiya putem postroyeniya «ploskoy» organizatsionnoy struktury, osnovannoy na liderstve» [“Ensuring the competitiveness of the enterprise by building a “flat” organizational structure based on leadership”], Problems of the modern economy, 1 (29). (In Russian).
10. Gartner Identifies the Top Strategic Technology Trends for 2022. URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-10-18-gartner-identifies-the-top-strategic-technology-trends-for-2022>.

Received 11.11.2021

*V.F. Grechaninov*, PhD (Eng.), Head of Department, The Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the Ukraine National Academy of Science (IMMSP NAS of Ukraine), Glushkovave., 42, Kyiv, 03187, Ukraine, [vgrechaninov@gmail.com](mailto:vgrechaninov@gmail.com)

*A.V. Lopushansky*, Research Associate, The Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the Ukraine National Academy of Science (IMMSP NAS of Ukraine), Glushkovave., 42, Kyiv, 03187, Ukraine, [anatoliy.lopushanskyi@gmail.com](mailto:anatoliy.lopushanskyi@gmail.com)

*T.K. Ieremenko*, PhD (Eng.), Senior Research Associate, The Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the Ukraine National Academy of Science (IMMSP NAS of Ukraine), Glushkovave., 42, Kyiv, 03187, Ukraine, [ierbegin@gmail.com](mailto:ierbegin@gmail.com)

## DEVELOPMENT PROSPECTS OF THE SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX OF HIERARCHICAL CONTROL SYSTEMS

**Introduction.** Hierarchical control in complex multilevel systems have been studied since the period of classical cybernetics. At that time, basic definitions and concepts were introduced. It is necessary to remember those achievements, because those decisions can already be implemented. However, the situation is constantly changing (evolving), so those tasks are perceived differently today. And the question arises as to how these old developments will progress.

**Purpose.** The purpose of this work is an attempt to predict the development of the hierarchical multilevel control systems in the future and how it depends on the latest technologies that determine their software-hardware complex (SHC).

**Result.** The analysis of the essence of the multilevel hierarchical management system, its features and additional requirements for the software-hardware complex, the current state of the hierarchical management systems, the impact of advances in IT technologies and theories on the features of hierarchical management are carried out. The current state is studied on the example of NATO hierarchical systems. Based on the forecasts of the development trend of IT technologies, the forecast of trends in changes of the hierarchical multilevel control systems is proposed.

**Conclusions.** As the result of the analysis of the hierarchical multi-level management systems, the current state and forecast of the development of IT technologies, the authors made the following conclusions:

- the hierarchical structure of a complex multi-level system will be in demand in the near future;
- the hierarchical systems will consist of standard components with the elements of artificial intelligence that controls the components;
- the process of creating a hierarchical system will be simplified, so it will be possible to use ready-made solutions.

**Keywords:** *hierarchical management, complex systems, forecasting the development of IT systems.*