

КОМП'ЮТЕРНІ ТРЕНАЖЕРИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ НАБУТТЯ НАВИЧОК КЕРУВАННЯ АГРЕГАТАМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Наведені комп'ютерні тренажери для оперативного персоналу електростанцій. Показаний метод математичного моделювання розгорнутих теплових схем ТЕС і розроблений за цим методом тренажер для набуття навичок керування блоком 300 МВт.

Ключові слова: ТЕС, математичне моделювання, комп'ютерні тренажери, операції керування.

Abstract

Computer simulators for operative personnel of power stations are provided. The method of mathematical modeling of expanded thermal schemes of the TPP is shown, and the simulator for acquiring the skills of managing a 300 MW unit is developed according to this method.

Keywords: TPP, mathematical modeling, computer simulators, management operations

Вступ

Агрегатами електростанцій керує оперативний персонал. Задачами операторів теплової електростанції є забезпечення заданих параметрів електричної та теплової енергії на виході з станції та виконання заданих режимів роботи її агрегатів. Складність експлуатації обладнання електростанції призводить до помилок персоналу. Причинами більшості помилок (55,5%) є експлуатаційний фактор [1]. Наприклад, причини помилок операторів блочного щита керування (БЩК) Змієвської ТЕС з блоками 200 та 300 МВт за показником «суб'єктивний фактор» наступні: низький рівень професійних знань; недоліки в розвитку і реалізації професійних умінь і навичок; відсутність готовності до ухвалення рішень; відсутність або недостатність професійного досвіду. Тому є необхідність регулярного навчання операторів. Таке навчання операторів відбувається на тренажерах учбових центрів Міністерства енергетики та безпосередньо на самих електричних станціях. Доцільним є навчання операторської діяльності і в енергетичних навчальних закладах Міністерства освіти. Тому метою даної роботи є створення та впровадження в навчальний процес ВНТУ тренажера операторів блока 300 МВт Ладижинської ТЕС, на якій працюють та працюватимуть і випускники ВНТУ.

Огляд деяких зарубіжних та українських комп'ютерних тренажерів

Історія експлуатації електричних станцій, нажаль, не позбавлена трагічних епізодів, причиною яких був людський фактор. Найбільш важкі наслідки аварій виникають, звичайно ж, при експлуатації атомних електричних станцій (АЕС). Починаючи з 50-х років минулого століття склався солідний список аварій на ядерних установках. Першими серйозними аваріями (5-й рівень за шкалою INES) були пожежа на реакторі військового призначення в Уіндскелі (Великобританія) у 1957 р. та розплав активної зони на АЕС в Три-Майл-Айленді США у 1979 р. Аварія на Три-Майл-Айленді показала, до чого можуть призвести неправильні дії персоналу при сукупності малозначущих та малоймовірних відмов технологічного обладнання. До чого можуть призвести порушення ядерної безпеки під час випробувань на конструктивно недосконалому реакторі, продемонструвала аварія на Чернобильській АЕС у 1986 році, що сталася, насамперед, внаслідок відсутності культури безпеки, як такої [2]. Однією з основних причин всіх вищезгаданих аварій та багатьох інших аварій, які виникали на електростанціях, був людський фактор.

Враховуючи це, на міжнародному рівні були зроблені серйозні зміни щодо зменшення потенціалу людських помилок, завдяки вдосконаленим процедурам, представленню інформації та навчання операторів. В результаті цього, різко зросла потреба в розробці спеціальних тренажерів

для тренування та навчання операторів електричних станцій, що дозволить виявити та мінімізувати найбільш характерні помилки операторів під час аварій.

У 1993 році МАГАТЕ (Міжнародне агентство з атомної енергетики) розробило та опублікувало IAEA-TECDOC-685 «Тренажери для підготовки персоналу ядерних електростанцій» [3], а в 2004 IAEA-TECDOC-1411 «Використання тренажерних пунктів для навчання персоналу атомної електростанції» [4]. Ці публікації, надають деяку інформацію про тренування на тренажері, зосереджену насамперед на характеристиках імітаційних пристроїв, що використовуються для навчання персоналу АЕС. Також є тренажери, які імітують роботу і інших видів електростанцій [5-7]. Програмне забезпечення для моделювання електростанцій містить бібліотеку програмних модулів, імітуючих роботу енергетичних установок різних типів. З модулів складається імітаційна модель електростанції, яка використовується для досліджень та як тренажер [8].

В роботах [9,10] розглянуті методичні та практичні питання розробки тренажерів оперативно-диспетчерського персоналу електроенергетичних систем (ЕЕС).

Структура (топологія) схеми довільної ЕЕС моделюється за допомогою направлених графів, вузлами яких є вузли заступних схем джерел генерації та підстанцій, а гілками є лінії електропередачі, трансформатори та об'єкти підстанцій.

Для розрахунків усталених електричних режимів в комп'ютерних диспетчерських тренажерах зазвичай використовуються системи нелінійних алгебраїчних рівнянь у формі балансу потужностей $[\dot{S}_S]$ вузлів. Транспонований вектор повних вузлових потужностей $[\dot{S}_S]^T$ вузлів електричної мережі (ЕМ), виражений через вузлові струми $[\dot{I}_S]$ і напруги \dot{U}_S , можна записати так:

$$[\dot{S}_S]^T = [\dot{I}_S]^T [\hat{U}_S]_d, \quad (1)$$

де $[\hat{U}_S]_d$ – діагональна матриця спряжених векторів напруги вузлів; $[\dot{I}_S]^T$ – транспонований вектор-стовпець струмів вузлів.

Струми вузлів ЕМ розраховуються за допомогою лінійного алгебраїчного рівняння:

$$[\dot{I}_S] = [\dot{Y}_{SS}] [\dot{U}_S], \quad (2)$$

де $[\dot{Y}_{SS}]$ – комплексна матриця відомих вузлових провідностей електричної мережі; $[\dot{U}_S]$ – вектор-стовпець невідомих комплексних напруг вузлів; $[\dot{I}_S]$ – вектор-стовпець комплексних відомих/заданих струмів вузлів.

Система рівнянь математичної моделі розв'язується ітераційними методами.

При великій кількості вузлів (15000) час розрахунку встановлення нового режиму перевищує реальний час через високу, в порівнянні з тепловими, швидкістю електричних процесів. Це спонукало авторів до розробки методики компромісу між точністю ітеративного розрахунку та його часом. Створені математичні моделі режимів роботи ЕЕС використані в тренажерах для персоналу підстанцій та ЕЕС України.

Як видно з розглянутих робіт, загальними є модульний принцип побудови тренажерів, задавання топологій моделюємих систем графами, опис процесів в об'єктах моделювання системою алгебраїчно-диференціальних рівнянь.

Використання повномасштабних тренажерів у підготовці операторів є важливим елементом зусиль щодо зменшення людської помилки. Сьогодні оператори електростанцій у всьому світі витрачають значну частину свого робочого часу на навчання та перепідготовку на тренажерах. У нормальному режимі роботи оператори не піддаються впливу аварійної ситуації, тому в такому режимі важко змоделювати та спрогнозувати дії оператора. В свою чергу тренажер дає можливість точно відтворити реальні умови та середовище, в які потрапляє оператор під час аварії, що має надзвичайно великий ефект та цінність такого навчання. У випадках, коли повномасштабні симулятори недоступні, оператори можуть пройти навчання за допомогою комп'ютерного моделювання. Як показує досвід - навчання на тренажерах є найефективнішим способом навчання оперативного персоналу. Таке навчання покращує співпрацю та спілкування в команді, що

призводить до досконалості виконуємої роботи кожним оператором окремо та до індивідуальної відповідальності та пильності.

Основна частина

Тренажер блока 300 МВт ТЕС створений за методом ПМаш-ВНТУ. В ньому метод Інституту проблем машинобудування НАНУ математичного моделювання статичних режимів роботи принципів теплових схем ТЕС розвинений в напрямку моделювання динаміки процесів в розгорнутих теплових схемах теплових електростанцій (РТС ТЕС).

Основними елементами методу є наступні методики: передання конструктивно-технологічних структур РТС ТЕС; логіко-числового моделювання фізичних процесів у устаткуванні РТС ТЕС; управління програмною реалізацією математичної моделі РТС ТЕС.

Для передачі структури РТС ТЕС використані графові уявлення. Елементи тепломеханічного устаткування відображуються вузлами графа, а зв'язки між ними – дугами графа. Орієнтація дуг графа співпадає з напрямком руху енергоносіїв. Конструктивно-технологічна відповідність устаткування установки графу досягається присвоєнням кодів його дугам і вузлам. Закодований (технологічний) граф має вигляд:

$$G^T = (K_B^i, I_i) \Leftrightarrow U_{j=1}^P (\text{sign} U_j, K_D^j | \tilde{U}_j |), \quad (3)$$

де K_B^i , K_D^j – конструктивно-технологічні коди вузла i та дуги j ; \tilde{U}_j – терм (номер і знак) дуги j ; $U_{j=1}^P$ – множина термів дуг, інцидентних вузлу I_i , $i=1,2,\dots,k$.

Граф інтерпретується, як інформаційна мережа (I -мережа), потоками якої є параметри енергоносіїв $Y_j=(y_1, y_2, \dots, y_n)$, в технологічних зв'язках (дугами графа), а параметрами джерел – характеристики $X_j=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ елементів устаткування (вузлів графа). При цьому коди дуг та вузлів визначають внутрішні структури інформаційних груп y_1, y_2, \dots, y_n та x_1, x_2, \dots, x_m , а їх номери – положення цих груп в ряду інших. На T -графі визначена система DF логічних (декодуєчих) функцій, які отримують ті чи інші предметні характеристики (кодів, термів) елементів графа. За допомогою логічних функцій будуються висловлювальні функції (предикати) $I_i(G^T, DF)$, які приймають значення 0 або 1 в залежності від виконання певних умов. Наприклад, належить або не належить код даного вузла підмножин кодів вузлів котлоагрегату, належить чи не належить дана дуга підмножин дуг, інцидентних деякому вузлу та інше. Граф блока 300 МВт складається з 3000 вузлів та 4000 дуг.

Фізичні процеси в РТС ТЕС описуються системою алгебраїчно-диференціальних рівнянь збереження, а саме: маси, кількості руху, енергії; рівнянь приросту ентропії та стану робочих тіл та теплоносіїв. Основною особливістю цієї системи є те, що кількість та вид рівнянь кожного типу залежить від технологічної установки (число апаратів, їх призначення, конструктивне виконання), тобто логічної інформації. Ця особливість зумовлена доцільним представлення математичної моделі РТС ТЕС у вигляді сукупності логіко-числових операторів, відображаючих трансформацію форм рівнянь названих типів (числових функцій) в залежності від технологічних кодів вузлів та дуг графа (логічних змінних) і автоматично формуючих на графі необхідну систему рівнянь. Математична модель РТС ТЕС має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta PS(G^T, I, DF) / \Delta_r LT(G^T, I, DF) = 0, r = 1, 2, \dots, s \\ I = \{I_i, I_j\}, C_i^{\min} \leq C_i \leq C_i^{\max}, i=1, 2, \dots, n, \\ j=1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (4)$$

де Δ – знак логіко-числового оператора; PS – оператор обробки результатів обчислень для подальшого їх виведення на зображення приладів і табло сигналізації; LT – ідентифікатор логіко-числового оператора; C_i^{\min} , C_i^{\max} – графічні значення параметрів інформаційної мережі I ; G^T – технологічний граф схеми установки.

Кожний з логіко-числових операторів є сукупністю ієрархічно підлеглих логіко-числових модулів:

$$\Delta_r LT(G^T I, DF) = U_{r=1}^s \Delta t_i(G^T I, DF), \quad (5)$$

де lt_i – логіко-числовий модуль i -го рівня. Модуль записується, як добуток висловлювальної та числової функцій:

$$\Delta t_i(G^T I, DF) = l_i(K_B, K_D, DF) \cdot t_i(x, y); \quad x, y \in I, \quad (6)$$

де I – висловлювальна функція; t – числова функція (рівняння процесу); x, y – залежні та незалежні змінні.

Незалежними змінними математичної моделі є чисельні значення положень органів регулювання – засувки, клапанів, шиберів, направляючих апаратів. Залежними змінними є значення тисків, витрат, температур, рівнів, складу димових газів та інших параметрів устаткування.

Система рівнянь опису процесів в РГС ТЕС розв'язується методом ітерацій. Ця система містить описи елементів РГС 150 типів – підігрівник живильної води контактний, підігрівник живильної води гладкотрубний, підігрівник живильної води колекторний, регулюючий східець турбіни, проміжний східець турбіни, останній східець турбіни та інші.

Управління програмною реалізацією моделі (4) складається із внутрішнього і зовнішнього. Внутрішнє управління полягає в забезпеченні функціонування операторної системи, як цілого по технологічному графу і його інформаційної мережі. В залежності від логічної інформації, яку містить технологічний граф, висловлювальні функції логіко-числових модулів приймають конкретні значення, наслідком чого є формування і розв'язок системи рівнянь і нерівностей.

Зовнішнє управління виконується за допомогою мнемосхем. На мнемосхеми виводяться зображення із зазначенням положень органів регулювання, а також зображення ключів та кнопок, якими органи регулювання керуються. Виклик органа керування відбувається імітаторами блочків вибіркового керування БІУ. Виклик вимірювального приладу відбувається імітаторами блочків вибіркового контролю БК. Інформація про стан агрегатів ТЕС виводиться на табло технологічної та аварійної сигналізації.

Даний метод програмно реалізований комп'ютерним тренажером блоку 300 МВт, який містить 50 мнемосхем та 1200 імітаторів органів керування.

На тренажері виконуються заняття з етапів пуску блока з холодного стану. Це опробування дистанційного керування блоком. Збирання схеми пароводяного тракту котла для пуску блока з холодного стану. Пуск конденсаційної установки та набирання вакууму. Пуск системи охолодження механізмів котельного, турбінного відділень та електрогенератора. Пуск масляної системи турбоустановки та електрогенератора. Ввімкнення системи мащення механізмів котельного відділення. Ввімкнення підігрівників живильної води низького тиску. Збирання схеми газоповітряного тракту котла. Розпал котла та прогрівання паропроводів. Пуск системи прогрівання фланців і шпильок циліндрів високого та середнього тисків турбіни. Пуск установки рециркуляції димових газів. Навантаження блока до потужності 180 МВт. Включення підігрівників живильної води високого тиску в роботу на працюючому блоці. Пуск пилосистеми. Пуск системи гідропепеловидалення. Як приклад розглянемо заняття «Навантаження блока до потужності 180 МВт», головною задачею якого є переведення котла з сепараторного режиму на прямотоковий.

Вихідний стан блока наступний. Всі регулюючі клапани турбіни закриті. Пара з тиском 30-35 кгс/см² і температурою 270-280 °С через швидкодіючу редуційну охолоджувальну установку 23БРОУ скидається в конденсатор. В кінцевому стані потужність блока повинна дорівнювати 160-180 МВт, тиск і температура «гострої» пари повинна бути 240 кгс/см² і 500 °С. Температура пари після проміжного перегрівника повинна дорівнювати 500 °С.

Переведення блока з вихідного до кінцевого стану проводиться в наступні етапи:

1. поштовх ротора турбіни;
2. підвищення числа обертів турбіни до номінального;
3. підвищення потужності блока відповідно графіка завантаження;
4. переведення котла на прямотоковий режим;
5. перехід з живильного електричного насоса ПЕН на паровий турбонасос ПТН;
6. ввімкнення регулятора «до себе».

Органи керування наведені на пусковій схемі блоку 300 МВт, представлений на рис. 1.

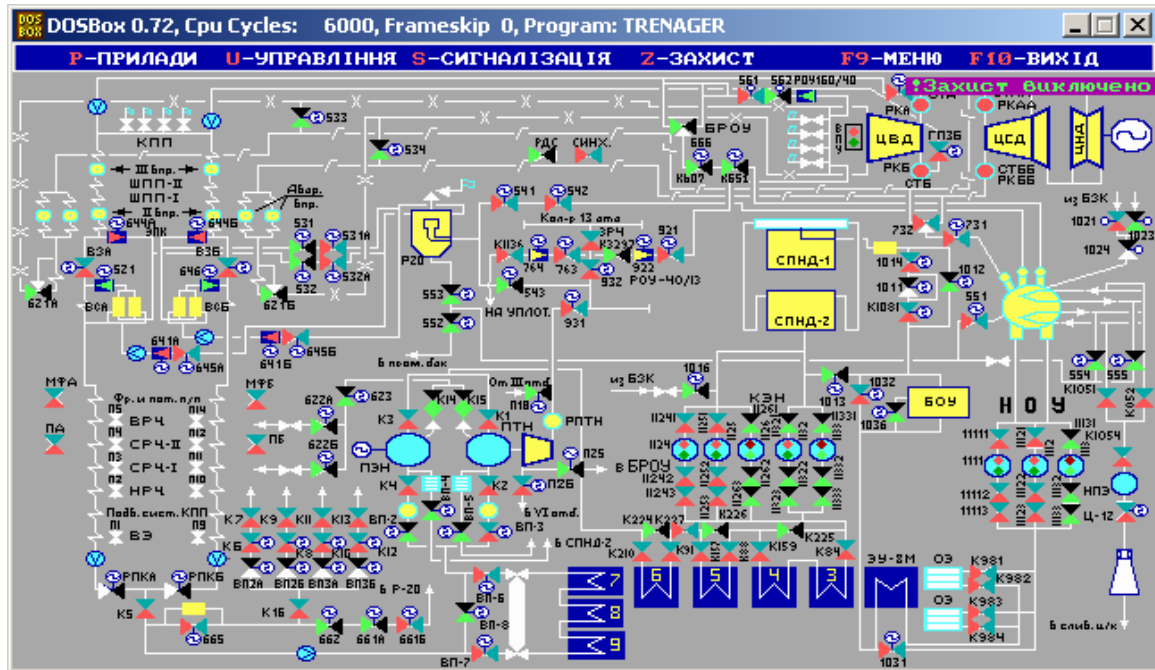


Рис. 1. Пускова схема енергоблоку

Порядок виконання роботи наступний.

1. Головні парові засувки ГПЗА, ГПЗБ - відкрити; стопорні клапани СтА, Ст Б, СтАА, СтББ - відкрити; регулюючі клапани РКАА, РКББ - відкрити; РКА, РКБ - повільно відкрити і «шттовхнути» турбіну; на три хвилини зафіксувати оберти на рівні 800-900 об/хв; блокоч вибіркового контролю БК [ВЗА, Т2] - вивести; мазутні форсунки МФА, МФБ - відкрити до підвищення температури Т2 (до 360-370 °С).

2. Засувку 666 - прикрити. Підняти оберти до 3000 об/хв; синхронізувати електрогенератор і підключити до мережі. Ця операція виконується на окремому тренажері.

3. Засувку 666 - закрити. Регулятор вприскування води швидкодіючої редукційної установки ВПР БРОУ зняти з автомата і закрити його клапан.

Навантаження (N) ввести збільшенням паровидатності котла, підвищеннями температури «гострої» пари (Тгп), тиску «гострої» пари (Ргп), температури пари проміжного перегріву (Тпп). Реальний час навантаження блока при пуску з холодного стану наведений в таблиці 1.

Таблиця 1. Реальний час навантаження блока при пуску з холодного стану.

Час, год.	Тгп, °С	Ргп, кгс/см ²	Тпп, °С	N, МВт
2	300	25	270	20
3	370	80	340	90
4,2	460	120	450	160
4,5	500	240	500	180

Вбудованими паровими засувками ВПЗА, ВПЗБ регулювати температуру «гострої» пари; БК [СтАА, Т] - вивести; засувку 533 - прикривати, тримаючи температуру промперегріву Т; засувки 14, 15, 623 - відкрити; клапани регуляторів 622А, 622Б - відкрити на 5%; регулятори 622А, 622Б - поставити на автомат; засувки 641А, 641Б - прикривати; БК [ВЗА, Т] - вивести; засувки МФА, МФБ - відкрити до температури Т = 410 °С перед засувкою ВЗ.

4. Засувки 641А, 641Б - закрити; засувки 645А, 645Б - закрити; засувки 541, 542 - закрити; засувки 553 - закрити; засувки ВЗА, ВЗБ - відкрити; засувки 644А, 644Б - закрити. Підвантажити блок. Регулюючі клапани живильної води РПКА, РПКБ, МФА, МФБ, гідромуфту відкривати до потужності 160-180 МВт, тиску «гострої» пари 120-140 кгс/см² і температури «гострої» пари 460 - 500 °С.

5. Засувку К1 - відкрити; засувка К2 - перевірити відкриття; засувки П18, П26 - відкрити; парову засувку приводу живильного насосу ПТН - відкрити; регулюючий клапан РПТН - відкрити на 50%. зафіксувати на одну хвилину число обертів ПТН рівне 3000 об/хв. РПТН відкрити так, щоб різниця тисків води за ПТН і за живильним електронасосом ПЕН складала 15-25 кгс/см².

Засувку ВПЗ - відкрити. Після стабілізації тиску «гострої» пари, засувку ВП2 - закрити; гідромуфту - закрити; ПЕН - відключити.

6. Клапани РКА, РКБ - прикривати до підвищення тиску «гострої» пари до 240 кгс/см². Засувки та клапан 662, 661А, 665 - закрити; регулятор 661Б - зняти з автомата і закрити його клапан; регулятор «до себе» РДС - відкрити на 90%; синхронізатор - зняти з автомата; РДС - поставити на автомат.

Висновки

1. Створений метод ПМаш-ВНТУ математичного моделювання динаміки процесів в розгорнутих теплових схемах ТЕС.

2. Розроблений комп'ютерний тренажер для набуття навичок керування агрегатами енергоблоку 300 МВт ТЕС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Білоцерківська Ю. О. Особливості професійної діяльності й аналіз помилкових дій операторів БЦК ТЕС / Ю. О. Білоцерківська // Проблеми екстремальної та кризової психології. Збірник наукових праць. Вип. 7. – Харків: УЦЗУ, 2010 – С. 46-55.

2. Кузмяк І. Я., Кравцов В. І. З досвіду імплементації основоположних принципів фізичного захисту ядерних установок, ядерних та інших радіоактивних матеріалів / І. Я. Кузмяк, В. І. Кравцов // Ядерна та радіаційна безпека. – 4 (56). 2012 – С. 67-73.

3. Simulators for training nuclear power plant personnel - IAEA, Vienna (1993), IAEA-TECDOC-685.

4. Use of control room simulators for training of nuclear power plant personnel - IAEA, Vienna (2004), IAEA-TECDOC-1411.

5. Instrument Society of America (1993) Fossil-fuel power plant simulators – functional requirements, ISA-S77.20-1993, p. 23.

6. Roldán E, Mendoza Y, Zorrilla J, Cardoso M, Cruz R (2008) Development of a gas turbine full scope simulator for operator's training. In: Proceedings of the european modeling symposium, EMS 2008, 8 – 10 Sept. 2008, Liverpool.

7. Tavira-Mondragón J, Cruz-Cruz R (2010) Development of modern power plant simulators for a operators training center. In: Proceedings of the World congress on engineering and computer science, WCECS 2010, 20 – 22 Oct. 2010, San Francisco.

8. Power Plants Simulation Software . PSV-PPSS. Engineering and Technical Teaching Equipment.

9. Аветісян О. В. Розробка та застосування віртуальних ієрархічних структур для моделювання режимів, навчання і тренажу персоналу ОЕС України / О. В. Аветісян, В. О. Гурєєв, О. В. Сангінова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – №1. – С. 101-107.

10. Гурєєв В. О. Методи і комп'ютерні технології побудови веб-орієнтованих тренажерних систем оперативного-диспетчерського персоналу магістральних електромереж. – На правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України – Київ, 2020.

Олена Миколаївна Нанака – к. т. н., доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: e_nanaka@ukr.net.

Олексій Михайлович Головченко – к. т. н., доцент.

Olena M. Nanaka – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: e_nanaka@ukr.net.

Oleksiy M. Golovchenko – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor.