

*Ламанов С.Л.,
к.т.н. Комісаренко О.І., к.т.н. Михайлова Л.Ф.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)*

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ОДНОКОМІРКОВОГО РЕЗОНАНСНОГО ІНВЕРТОРА НА ГАЛЬВАНІЧНО РОЗВ'ЯЗАНИЙ ІНДУКЦІЙНИЙ НАГРІВАЧ

Розглядаються особливості роботи однокоміркового резонансного інвертора на гальванічно розв'язаний індукційний нагрівач.

***Ключові слова:** однокомірковий інвертор, зворотний діод, індуктор, резонанс, індукційний нагрівач.*

Рассматриваются особенности работы однофазного резонансного инвертора на гальванически развязанный индукционный нагреватель.

***Ключевые слова:** однофазный инвертор, обратный диод, индуктор, резонанс, индукционный нагреватель.*

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними задачами. Більшість схем сучасних споживачів електричної енергії містять найрізноманітніші перетворювачі енергії змінного струму промислової частоти в постійну або змінну енергію іншої частоти, що її потребує навантаження. При цьому навантаження перетворювачів частоти для індукційного нагріву зазвичай має гальванічний зв'язок з мережею живлення. Причина цього полягає в тому, що розробники перетворювальної техніки не застосовують пристрої гальванічної розв'язки (трансформатори низької частоти або традиційні гартівні трансформатори середньої частоти з Ш-подібним замкнутим броньовим магнітопроводом [1]) через їх значну вартість, завелику масу та габарити. Наявність гальванічного зв'язку приводить до необхідності вживати ряд заходів для електробезпеки персоналу, що не виключає можливості випадкового дотику до елементів навантаження, які перебувають під потенціалом мережі живлення.

Аналіз досліджень і публікацій. Тривалий час ця проблема взагалі не розглядалась, в деяких літературних джерелах при описі схем інверторів навіть підкреслюється, в якості переваги, така їх властивість: "Дозволяється безтрансформаторне включення навантаження" [2].

Лише останнім часом починають з'являтися публікації, автори яких визнають і розуміють першорядну актуальність наявності гальва-

нічної розв'язки індуктора індукційного нагрівача від мережі живлення [3, 4]. При цьому описується використання таких самих традиційних гартівних трансформаторів з Ш-подібним замкнутим броньовим магнітопроводом, боротьбі з суттєвими вадами яких і присвячено наведені публікації. До того ж у згаданих літературних джерелах розглядається робота пристроїв досить невеликої потужності (10...20 кВт), а стосовно індукційних нагрівачів більшої потужності проблема наразі залишається невирішеною.

Постановка задачі. Таким чином сучасний стан розвитку перетворювальної техніки для індукційного нагріву потребує появи дешевого та простого у виготовленні пристрою гальванічної розв'язки навантаження від мережі живлення. Пристрій також повинен мати можливість бути використаним в індукційних нагрівачах будь якої потужності. Отже, задача розробки принципового рішення, схеми і конструкції пристрою гальванічної розв'язки навантаження від мережі живлення, яке б найпростішими засобами реалізувало необхідні властивості (гальванічна розв'язка навантаження) і при цьому могло би бути практично використаним в найбільш розповсюджених схемах перетворювачів частоти для індукційного нагріву без їх суттєвої переробки, є актуальною і потребує реалізації.

Виклад матеріалу та його результати. Пристрій підключення індукційного навантаження, в якому контур навантаження має гальванічну розв'язку від джерела живлення, наведено в [5]. Запропонований принцип гальванічної розв'язки навантаження перетворювача частоти від джерела живлення може бути реалізовано, зокрема в класичній схемі однокоміркового резонансного інвертора із зворотним діодом, яку наведено на рисунку 1.

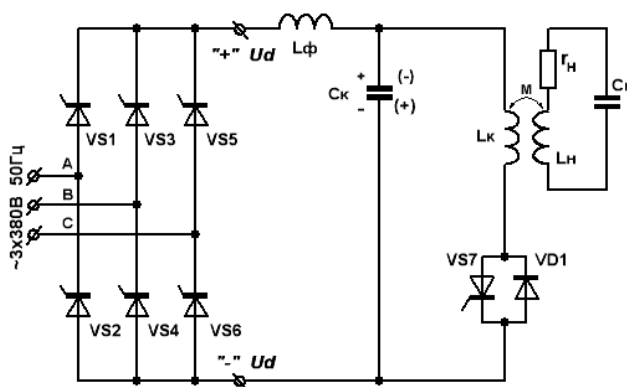


Рисунок 1 – Перетворювач частоти на базі однокоміркового інвертора з гальванічно розв'язаним індукційним нагрівачем

Схема живиться від мережі $\sim 3 \times 380 \text{ В}$, 50 Гц із фазами *A*, *B*, *C*, і мі-

стить трьохфазний випрямляч по схемі Ларіонова на тиристорах $VS1...VS6$ з вихідними клемми «+» U_d , «-» U_d та комірку інвертора, що об'єднує дросель фільтра L_Φ , комутуючий конденсатор C_K , комутуючий дросель L_K , тиристор інвертора $VS7$ та зворотний діод $VD1$. Схема містить також гальванічно розв'язаний від мережі живлення контур навантаження в який включені індуктивність індуктора L_H , активне навантаження R_H та компенсаційний конденсатор C_H .

Часові діаграми струму та напруги на деяких елементах схеми наведено на рисунку 2. Позначення на діаграмах відповідають позначенням на схемі.

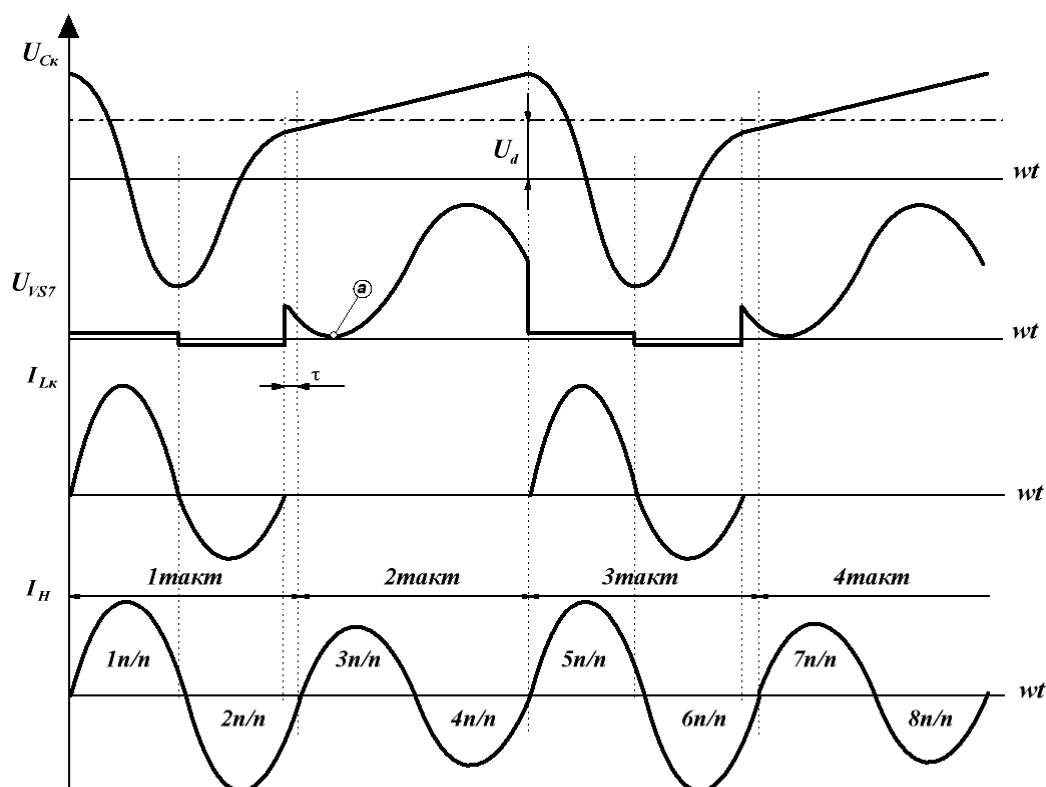


Рисунок 2 – Часові діаграми струму та напруги на елементах схеми перетворювача частоти за рисунком 1

Пристрій по схемі рисунок 1 працює таким чином. Після подачі живлення $\sim 3 \times 380V, 50Гц$ та вмикання тиристорів випрямляча $VS1...VS6$ на вихідних клемми «+» U_d , «-» U_d з'являється напруга $500V$, під дією якої комутуючий конденсатор C_K заряджається до її рівня через дросель фільтра L_Φ з полярністю, вказаною на рисунку 1 без дужок. Після вмикання тиристора інвертора $VS7$ (крива U_{VS7}) комутуючий конденсатор C_K (крива U_{Ck}) почне коливально перезаряджатися через нього та комутуючий дросель L_K по контуру $C_K - L_K - VS7 - C_K$, формуючи першу пі-

вхвилю коливання струму інвертора (крива I_{LK}). При цьому завдяки взаємоіндукції M між комутуючим дроселем L_K та індуктивністю індуктора L_H в контурі навантаження $L_H - R_H - C_H - L_H$ буде наведено першу півхвилю коливання струму навантаження (крива I_H). За час протікання першої півхвилі коливання струму інвертора комутуючий конденсатор C_K (крива U_{CK}) перезаряджається до полярності, яку вказано на рисунку 1 в дужках.

Далі комутуючий конденсатор C_K почне коливально перезаряджатися до полярності, вказаної на рисунку 1 без дужок (крива U_{CK}) на комутуючий дросель L_K через зворотний діод $VD1$ по контуру $C_K - VD1 - L_K - C_K$, формуючи тим самим другу півхвилю коливання струму інвертора (крива I_{LK}). При цьому завдяки взаємоіндукції M між комутуючим дроселем L_K та індуктивністю індуктора L_H в контурі навантаження $L_H - C_H - R_H - L_H$ буде наведено другу півхвилю коливання струму навантаження (крива I_H).

В другому такті комутуючий конденсатор C_K (крива U_{CK}) дозаряджається від мережі живлення через дросель фільтра L_Φ по контуру $U_d - L_\Phi - C_K - U_d$. Третя та четверта півхвилі коливання струму навантаження (крива I_H) при цьому формується за рахунок властивостей коливання контуру навантаження, добротність Q якого для розповсюджених індукційних навантажень досить велика і досягає значень 5...7. Завдяки взаємоіндукції M між індуктивністю індуктора L_H та комутуючим дроселем L_K частина напруги навантаження, як видно з діаграми рисунок 2, прикладається до тиристора $VS7$ (крива U_{VS7}) послідовно з напругою на комутуючому конденсаторі C_K .

Починаючи з третього такту процеси в схемі повторюються.

Таким чином, за рахунок такого конструктивного розташування комутуючого дроселя L_K та індуктора L_H контуру навантаження, яке забезпечує наявність між ними взаємоіндукції M потрібної величини, в контурі навантаження $L_H - C_H - R_H - L_H$ наводяться коливання струму навантаження при повній гальванічній розв'язці контуру навантаження від мережі живлення.

Слід зазначити, що усі елементи такого включення тим, або іншим чином вже застосовуються в техніці.

Ефект взаємоіндукції магнітозв'язаних контурів розглянуто в [6]. Традиційні вихідні трансформатори використовують цей ефект, при цьому в [4] зазначено, що маса такого трансформатора на частоті 2,4 кГц становить 18 кг при потужності 10 кВт. На більших потужностях маса таких трансформаторів сягає ще більших значень. До того ж К.К.Д. таких пристроїв за рахунок втрат на гістерезис не перевищує 0,8.

Необхідність компенсації індуктивності навантаження спеціальним компенсуючим конденсатором описана в [1, с.69].

В запропонованій пристрої в якості первинної обмотки трансформатора гальванічної розв'язки використано комутуючу індуктивність інвертора, яка вже є складовою частиною інвертора. В якості вторинної обмотки трансформатора гальванічної розв'язки використано індуктивність навантаження, яка також є частиною індукційного обладнання. Через невелике потрібне значення коефіцієнту магнітного зв'язку, зв'язок між цими індуктивностями є повітряним, що не потребує застосування спеціального магнітопроводу, який до того ж знижує К.К.Д. обладнання за рахунок втрат на гістерезис.

Суть новизни такого пристрою полягає саме в тому, що усі необхідні для гальванічної розв'язки елементи вже є природними складовими частинами обладнання, треба лише конструктивно створити між ними магнітний зв'язок, і саме тому ніяких додаткових приладів для створення гальванічної розв'язки навантаження не потрібно.

Слід також зауважити, що ніяких додаткових магнітних полів при застосуванні такої розв'язки не створюється. Магнітне поле комутуючої індуктивності та магнітне поле індуктивності навантаження (індуктора) вже існують в усіх індукційних нагрівачах, які містять такі елементи.

Для з'ясування впливу величини магнітного зв'язку M на енергетичні характеристики навантаження інвертора було застосовано моделюючий комплекс ПАКЛС [7].

Для аналізу використано систему відносних одиниць:

$$U_d^* = 1; L_K^* = 1; C_K^* = 1; \quad (1)$$

хвильовий опір комутуючого контуру

$$Z_B^* = \sqrt{L_K^* / C_K^*} = 1; \quad (2)$$

коливальний струм комутуючого контуру

$$I_0^* = U_d^* / Z_B^* = 1; \quad (3)$$

період власних коливань комутуючого контуру

$$T_o^* = 2\pi * \sqrt{L_K^* / C_K^*} = 2\pi; \quad (4)$$

коефіцієнт навантаження (відносно хвильового опору)

$$K_H^* = R_H / Z_B^* = R_H^* ; \quad (5)$$

коефіцієнт зв'язку

$$K_{3B} = M / \sqrt{L_K^* L_H} . \quad (6)$$

При розрахунках було використано значення індуктивності L_Φ

$$L_\Phi^* = L_\Phi / L_K = 100 . \quad (7)$$

В результаті цифрового моделювання було отримано, зокрема, графік $I_d^* = f(K_H, K_{3B})$, що характеризує залежність току споживання (і потужності) інвертора від величини коефіцієнтів навантаження та магнітного зв'язку, наведений на рисунку 3.

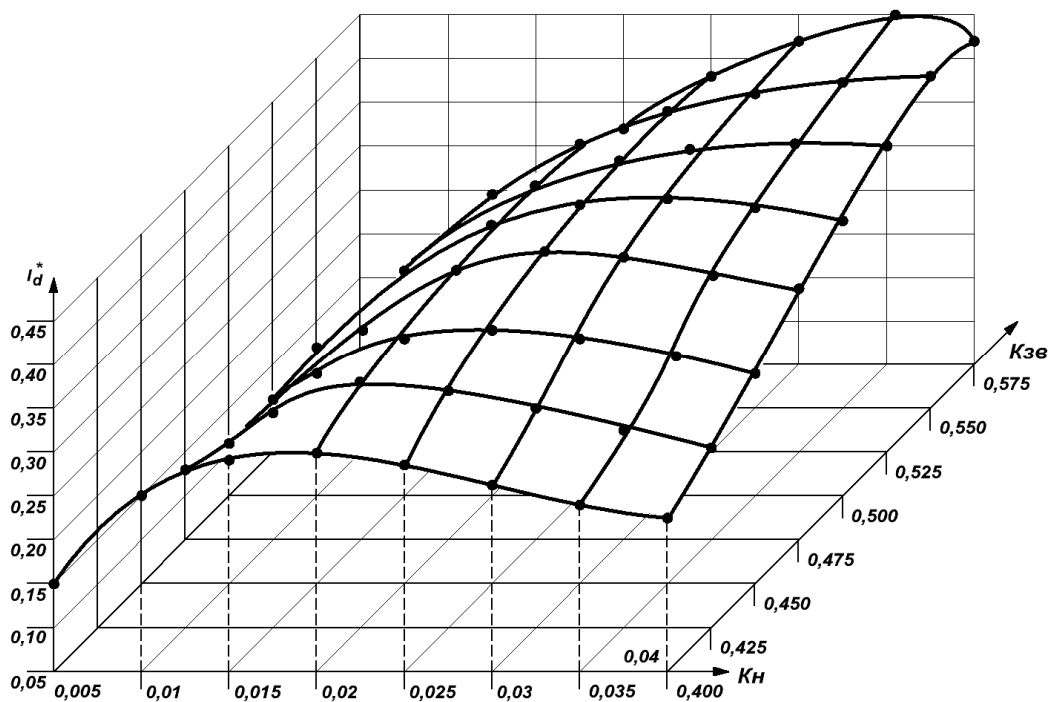


Рисунок 3 – Графік залежності $I_d^* = f(K_H, K_{3B})$

З отриманих графіків слідує, що регулювати струм споживання I_d^* в інверторі можна не лише за рахунок регулювання K_H , як це зазвичай робиться, а і за рахунок зміни K_{3B} . Можливість такого регулювання (простим переміщенням взаємного розташування елементів) надає більше можливостей для реалізації технологічних потреб обладнання і

спрощує узгодження навантаження з інвертором.

Як видно із графіка $I_d^* = f(K_H, K_{3B})$, струм випрямляча I_d^* (значення якого пропорційне потужності інвертора), має обмеження як при зменшенні K_H (або K_{3B}), так і при збільшенні цих параметрів. Таке обмеження пояснюється тим, що зменшення K_{3B} або збільшення K_H (в послідовній схемі заміщення навантаження) знижує коливальні властивості контуру навантаження, зменшуючи тим самим потужність споживання.

При збільшенні K_{3B} (або при зменшенні K_H в послідовній схемі заміщення навантаження) коливальні властивості контуру навантаження зростають, що призводить до режиму, при якому обмежується ступінь заряду конденсатора C_K за рахунок повторного включення **VD1**.

Сутність такого режиму показано на часових діаграмах рисунку 4.

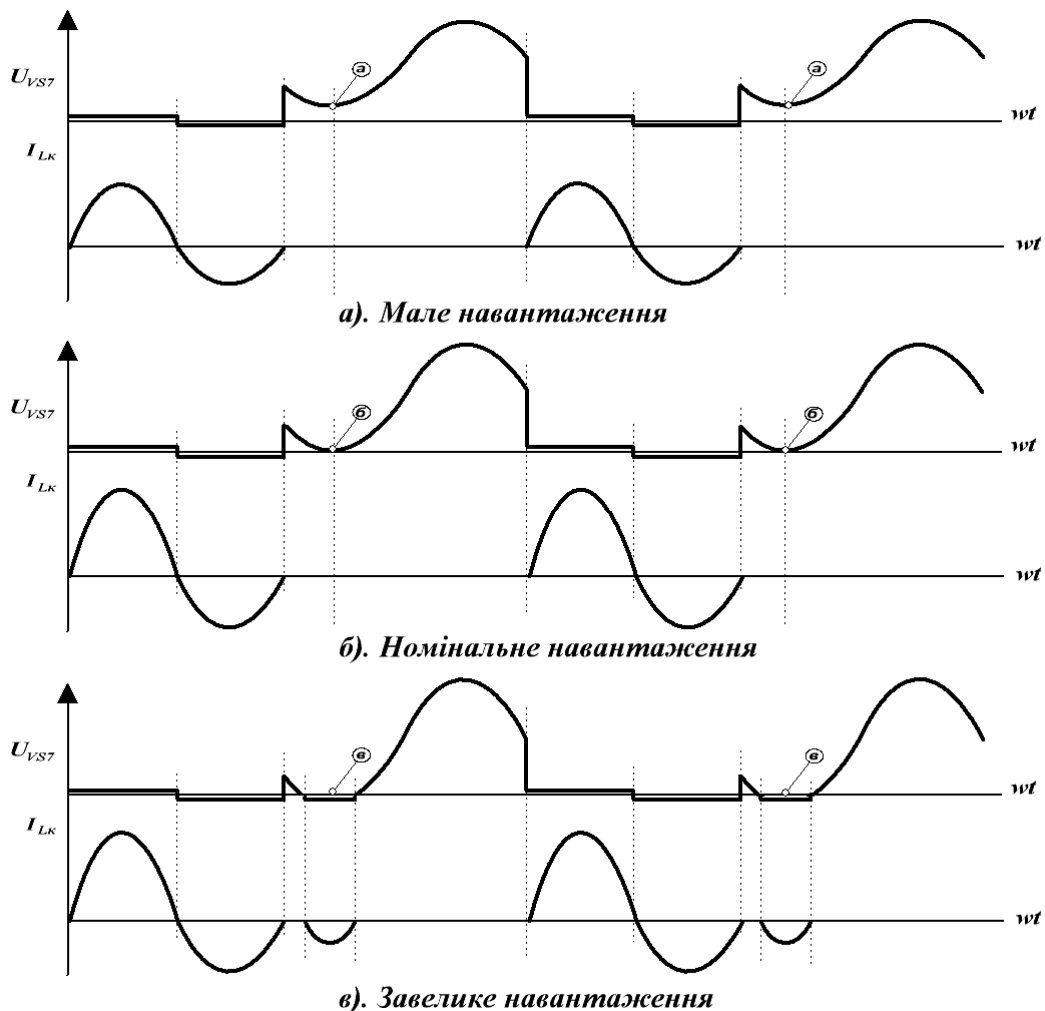


Рисунок 4 – Часові діаграми струму та напруги на деяких елементах схеми при трьох можливих варіантах навантаження.

Наявність режиму повторного включення зворотного діода *VDI* дозволяє експлуатувати інвертори даного типу при зміні навантаження в самих широких межах – від режиму холостого ходу (повна відсутність заготовки в індукторі індукційного нагрівача) до режиму короткого замикання навантаження (холодна заготовка), а за рахунок використання запропонованого способу узгодження навіть при повному обриві навантаження (наприклад, обрив з'єднання з компенсуючим конденсатором), при якому інвертор також переходить в режим, еквівалентний короткому замиканню навантаження для розповсюджених типів схем послідовних резонансних інверторів із зворотними діодами. До того ж, за рахунок зменшення магнітного зв'язку між комутуючим дроселем L_K та індуктивністю індуктора L_H можна запобігти появі режиму повторного включення зворотного діода *VDI*, зменшуючи тим самим навантаження інвертора до номінальних значень. Якщо ввести автоматичне регулювання відстані між магнітозв'язаними індуктивностями в залежності від ступені завантаження інвертора, можна розширити технологічні можливості обладнання.

Висновки й напрямок подальших досліджень. Наведені вище дані про дослідження перетворювача частоти на базі однокоміркового резонансного інвертора із зворотним діодом доводять можливість створення гальванічної розв'язки індуктора індукційного нагрівача від промислової мережі живлення навіть без застосування спеціальних додаткових трансформаторів узгодження за рахунок використання в якості такого трансформатора вже існуючих елементів схеми. Це надає широкі можливості застосування наведеного принципу розв'язки та узгодження навантаження в самих різноманітних індукційних нагрівачах, забезпечуючи при цьому потрібну електричну безпеку обслуговуючому персоналу. Розглянутий принцип розв'язки та узгодження індукційного навантаження може бути використано незалежно від потужності обладнання там, де схемою нагрівача вже передбачено використання комутуючої індуктивності та індуктивності навантаження, і де існує можливість створення магнітного зв'язку між ними. Застосування таких пристроїв створює нові можливості для розробників перетворювальної техніки, зокрема для індукційного нагріву, і при використанні інакших, від розглянутих, схем інверторів потребує дослідження їх енергетичних характеристик навантаження .

Попередні випробування перетворювачів з використанням розглянутого принципу розв'язки та узгодження індукційного навантаження на частотах 22,0...2,4 кГц показали можливість його успішного використання.

Бібліографічний список

1. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов/ А.Е. Слухоцкий и др.; Под ред. А.Е. Слухоцкого.– Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1981.– С.170.
2. Справочник по преобразовательной технике./ Под ред. И.М. Чиженко. К., «Техніка», 1978г., с.95.
3. С. Земан, А. Осипов, О. Сандырев. Особенности работы высокочастотного трансформатора в схеме последовательного резонансного инвертора. / Силовая электроника, №1, 2007г., с.67...71.
4. В. Яров, И. Кудров. Преобразователь частоты для индукционной пайки. / Силовая электроника, №2, 2004г., с.86...87.
5. С. Ламанов. Пристрій підключення індукційного навантаження. Заявка на винахід № а200904460 від 05.05.2009р.
6. Бессонов Л.А, Теоретические основы электротехники. 1964г., /М., «В. школа», 1964г., с.24, 96, с.116.
7. Васильев А.С., Дзлиев С.В., Федосин С.А., Блинов Ю.И. /Система автоматизированного исследования схем силовой электроники. // Технічна електродинаміка, 1985 - №1. С.3-6.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Зеленовим А.Б.