

УДК 621.3.05

І.В. Пентегов, д-р техн. наук

А.Л. Приступа, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕСЛІВСЬКИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ БЕЗКОНТАКТНІЙ ЗАРЯДЦІ АКУМУЛЯТОРІВ

Представлено опис експериментальної установки для дослідження теслівських процесів при безконтактній зарядці акумуляторів різних пристроїв. Розраховано параметри елементів установки. Показано, як параметри установки адаптуються до методики розрахунку теслівських процесів при бездротовій передачі енергії.

Опис експериментальної установки

Для проведення експериментальних досліджень бездротової передачі енергії за допомогою теслівських процесів був розроблений макет, електрична принципова схема якого наведена на рис. 1.

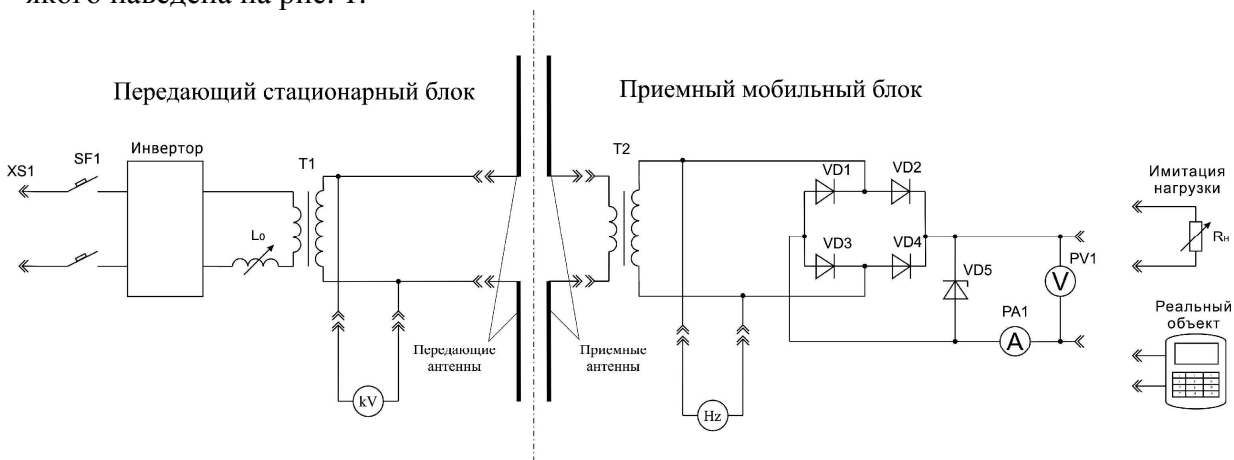


Рис. 1. Схема електричної принципової експериментальної установки

Як джерело високочастотного струму передбачається використовувати транзисторний резонансний інвертор, що живиться від мережі змінної напруги 220 В промислової частоти 50 Гц. Внутрішня схема інвертора на характер досліджуваних теслівських процесів докорінно не впливає, тому на принциповій схемі (рис. 1) він зображений у вигляді чотириполюсника, і його схемні особливості не враховуються при аналізі процесів передачі енергії.

За допомогою поздовжнього резонансного дроселя L_0 можна вибирати положення робочої точки на резонансній кривій.

Високовольтний високочастотний трансформатор T1 призначений для підвищення напруги джерела, тим самим збільшуючи інтенсивність теслівських процесів.

До складу приймального блоку установки входять: понижувальний трансформатор T2; випрямляч (VD1 – VD4); стабілітрон VD5 і навантаження.

Трансформатор T2 необхідний для формування рівнів струму й напруги, необхідних для підзарядки акумуляторів різних пристроїв.

Стабілітрон служить для захисту акумулятора від можливих перенапруг.

Еквівалентна схема заміщення цієї установки представлена на рис. 2.

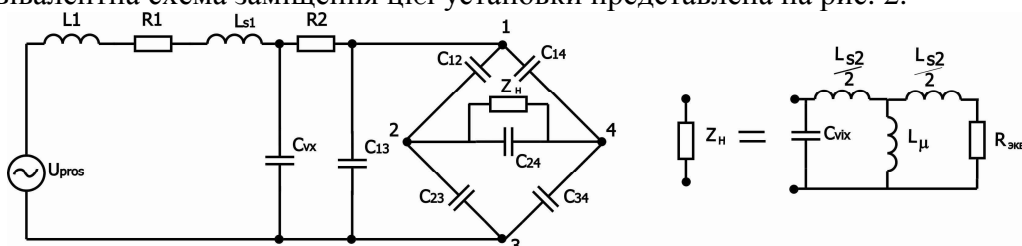


Рис. 2. Еквівалентна схема заміщення експериментальної установки

Розрахунок параметрів схеми заміщення**Розрахунок індуктивності розсіювання обмоток**

Індуктивність розсіювання є одним з параметрів, що визначають якість роботи трансформатора [1]. Вона дуже сильно впливає й на характер процесу бездротової передачі енергії за допомогою теслівських процесів. Індуктивність розсіювання трансформатора визначається згідно з методом Роговського за формулою:

$$L_S = k_R \cdot \frac{\mu_0}{h} \cdot w_1^2 \cdot l_{об} \cdot \left(b_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3} \right), \quad (1)$$

де b_1 , b_2 – товщина первинної й вторинної обмотки; b_{12} – відстань між первинною й вторинною обмотками; h – висота обмотки; w_1 – число витків первинної обмотки; w_2 – число витків вторинної обмотки; $l_{об}$ – середня довжина витка обмотки; μ_0 – магнітна постійна, рівна $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; k_R – коефіцієнт Роговського, що визначається за формулою:

$$k_R = 1 - \frac{b_1 + b_2 + b_{12}}{\pi \cdot h}. \quad (2)$$

Індуктивність розсіювання підвищувального трансформатора приведена до вторинної обмотки:

$$L_{s1} = L_S \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2. \quad (3)$$

Конструктивні параметри трансформаторів і результати розрахунку представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри трансформаторів

Трансформатор	w_1	w_2	b_1 , мм	b_2 , мм	b_{12} , мм	$l_{об}$, мм	h , мм	L_S , мГн
підвищувальний	16	750	1,2	0,355	20	150	150	166
понижувальний	480	20	2	0,7	0,5	50	7	2,235

Розрахунок власних ємностей обмоток

Крім індуктивності розсіювання, іншим важливим параметром для трансформаторів є власна ємність обмоток. У загальному випадку власна ємність обмоток складається з ємностей між внутрішнім шаром обмотки та магнітопроводом C_1 , між шарами обмоток C_2 , між обмотками C_3 [2].

При аналізі різних схем з'єднань обмоток трансформатора користуються інтегральним значенням ємності, що визначається з умови рівності електричної енергії, зосередженої в зазначеній ємності та її складових [2].

Формули для визначення ємностей трансформатора мають вигляд [2]:

$$C_1 = \frac{8\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot r \cdot l_{об} \cdot n}{4a - \pi \cdot r}, \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{4\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot r \cdot l_{об} \cdot n}{(4a_1 - \pi \cdot r) \cdot (m-1)}, \quad (5)$$

$$C_3 = \frac{4\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot r_{cp} \cdot l_{об} \cdot n_{cp}}{4a_2 - \pi \cdot r_{cp}}, \quad (6)$$

де ϵ_r – відносна діелектрична проникність ізоляції; ϵ_0 – електрична постійна; r – радіус неізольованого проводу; $l_{об}$ – середня довжина витка обмотки; a – відстань між магнітопроводом і віссю проводу; n – число витків у першому шарі; m – число шарів; $2a_1$ – відстань між осями витків проводу в сусідніх шарах; r_{cp} – середній радіус голого проводу суміжних обмоток; n_{cp} – середнє число витків у суміжних шарах обмоток; $2a_2$ – відстань між осями проводів суміжних шарів сусідніх обмоток.

Для розрахунку сумарної ємності підвищувального трансформатора приведемо параметри його ємностей до вторинної обмотки за формулами [2]:

$$C'_1 = C_1 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2, \quad C'_3 = C_3 \cdot \left(1 - \frac{w_1}{w_2}\right)^2. \quad (7)$$

Сумарна ємність підвищувального трансформатора для цього випадку розраховується за формулою [3]:

$$C_{vx} = C'_1 + C'_3 \quad (8)$$

Конструктивні параметри підвищувального трансформатора і результати розрахунку ємностей представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Конструктивні параметри підвищувального трансформатора

w_1	w_2	ε_r	r , мм	a , мм	n	m	$l_{об}$, мм	r_{cp} , мм	n_{cp}	$2a_2$, мм	$2a_1$, мм	C_1 , пФ	C_2 , пФ	C_3 , пФ	C_{vx} , пФ
16	750	4	0,6	18	48	1	150	0,4	400	24	24	17,55	0	70,86	67,85

Для розрахунку сумарної ємності понижувального трансформатора приведемо параметри його ємностей до первинної обмотки відповідно до формул:

$$C'_1 = C_1 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2, \quad C'_3 = C_3 \cdot \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right)^2. \quad (9)$$

Сумарна ємність понижувального трансформатора для цього випадку розраховується за формулою:

$$C_{vix} = C'_1 + C_2 + C'_3. \quad (10)$$

Конструктивні параметри понижувального трансформатора і результати розрахунку ємностей представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Конструктивні параметри понижувального трансформатора

w_1	w_2	ε_r	r , мм	a , мм	n	m	$l_{об}$, мм	r_{cp} , мм	n_{cp}	$2a_2$, мм	$2a_1$, мм	C_1 , пФ	C_2 , пФ	C_3 , пФ	C_{vix} , пФ
480	20	4	0,18	1,5	10	8	50,3	0,115	35	1	0,2	13,94	37,69	109,22	138

Розрахунок індуктивності намагнічування трансформатора

Оскільки магнітна проникність осердя трансформатора набагато більша магнітної проникності повітря, лише незначна частина силових магнітних ліній у вигляді потоку розсіювання замикається поза осердям. Тому при визначенні індуктивності намагнічування трансформатора будемо вважати, що весь магнітний потік зосереджений в осерді з поперечним перерізом S . У цьому випадку індуктивність намагнічування визначається за формулою [4]:

$$L_{нам} = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot w_1^2 \cdot S \cdot k_c \cdot \ln \frac{l_2}{l_1}}{l_1 \left(\frac{l_2}{l_1} - 1\right)}, \quad (11)$$

де μ – магнітна проникність матеріалу осердя; k_c – коефіцієнт заповнення; l_1 – мінімальна довжина силової магнітної лінії; l_2 – максимальна довжина силової магнітної лінії.

Конструктивні параметри трансформаторів і результати розрахунку представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Параметри трансформаторів

Трансформатор	w_1	μ	l_1 , мм	l_2 , мм	S , мм ²	$L_{нам1}$, мГн
підвищувальний	16	5000	524	628	325	7,84
понижувальний	480	2000	30	44	176	710

Індуктивність намагнічування підвищувального трансформатора приводиться до вторинної обмотки за формулою:

$$L_{\mu 1} = L_{\text{нам}1} \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2. \quad (12)$$

Оскільки індуктивність намагнічування підвищувального трансформатора набагато перевищує індуктивність намагнічування понижувального трансформатора, то її вплив на процеси, що відбуваються в схемі передачі енергії, незначний і при складанні схеми заміщення її можна не враховувати.

Розрахунок активних опорів трансформатора

При розрахунку опорів трансформатора враховується тільки омичний опір обмоток, нехтуючи скін-ефектом через малий перетин провідників.

Омічні опори обмоток трансформатора визначаються за формулою:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (13)$$

де ρ – питомий опір матеріалу провідника обмотки; l – загальна довжина обмотки; S – площа поперечного перерізу провідника обмотки.

Приведемо опір первинної обмотки підвищувального трансформатора до вторинної, а опір вторинної обмотки понижувального трансформатора до первинної за формулами:

$$R_{11} = R_1 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2, \quad R_{22} = R_2 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2. \quad (14)$$

Конструктивні параметри обмоток трансформаторів і результати розрахунку представлені в табл. 5.

Таблиця 5

Параметри обмоток і результати розрахунку активних опорів трансформаторів

Трансформатор	ρ , Ом·м	l_1 , мм	l_2 , мм	r_1 , мм	r_2 , мм	S_1 , мм ²	S_2 , мм ²	R_{11} , Ом	R_{22} , Ом
підвищувальний	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^4$	$2,83 \cdot 10^5$	0,6	0,18	4,5	0,4	90	12,14
понижувальний	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$7,54 \cdot 10^3$	188,5	0,05	0,18	0,03	0,4	4	4,6

Розрахунок часткових ємностей між антенами

Розрахунок часткових ємностей C_{12} , C_{13} , C_{14} , C_{23} , C_{24} , C_{34} між антенами виконується для кожного конкретного випадку окремо [5-7].

Розрахунок параметрів схеми заміщення

Змінна індуктивність L_1 являє собою сумарну індуктивність інвертора, з'єднувальних проводів і резонансного дроселя. За формулою (3) ця індуктивність приводиться до вторинної обмотки підвищувального трансформатора (табл. 6).

Опір R_1 являє собою суму омичних опорів інвертора, резонансного дроселя, з'єднувальних проводів і первинної обмотки підвищувального трансформатора, розрахованих за формулою (13) і приведених за формулою (14) до вторинної обмотки підвищувального трансформатора.

Коефіцієнт трансформації трансформаторів визначається за формулою:

$$k_{TP} = \left(\frac{w_1}{w_2} \right). \quad (15)$$

У табл. 6 представлені чисельні значення параметрів схеми заміщення, зображеної на рис. 2, які приведені до вторинної обмотки підвищувального трансформатора й первинної обмотки понижувального трансформатора.

Таблиця 6

Параметри схеми заміщення

L_1 , мГн	R_1 , Ом	L_{s1} , мГн	R_2 , Ом	C_{vs} , пФ	C_{vix} , пФ	L_{s2} , мГн	L_{μ} , мГн	U_{pros} , кВ	k_{TP1}	k_{TP2}
40.650	160	166	13	67,85	138	2,5	710	11,72	0,021	24

Розрахунок енергетичних параметрів схеми

Розрахунок енергетичних параметрів схеми проводиться аналогічно методикам, описаним у працях [5-7].

Для того, щоб привести розглянуту схему до виду невірвноваженого моста, для якого відомі методи розрахунку, необхідно виконати перетворення: приведемо опір середовища передачі разом з навантаженням до вихідних затискачів передавального блоку (рис. 4).

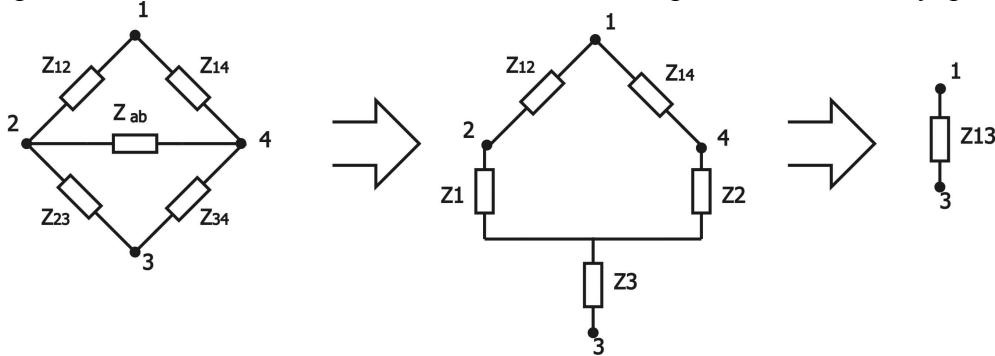


Рис. 4. Приведення опору середовища передачі й прийомного блоку до вихідних затискачів передавального блоку

Для цього перетворимо трикутник опорів $Z_{ab} - Z_{23} - Z_{34}$ у зірку $Z_1 - Z_2 - Z_3$, а потім знайдемо еквівалентний опір Z_{13} [8].

$$Z_1 = \frac{Z_{23} \cdot Z_{ab}}{Z_{23} + Z_{ab} + Z_{34}}, Z_2 = \frac{Z_{34} \cdot Z_{ab}}{Z_{23} + Z_{ab} + Z_{34}}, Z_3 = \frac{Z_{23} \cdot Z_{34}}{Z_{23} + Z_{ab} + Z_{34}}, Z_{13} = Z_3 + \frac{(Z_{12} + Z_1) \cdot (Z_{14} + Z_2)}{Z_{12} + Z_1 + Z_{14} + Z_2}, \quad (16)$$

де $Z_{12}, Z_{14}, Z_{23}, Z_{34}$ – комплексні опори середовища передачі, Z_{ab} – опір вітки 2-4, визначаються за формулами:

$$Z_{14} = \frac{1}{j\omega \cdot C_{14}}, \quad Z_{34} = \frac{1}{j\omega \cdot C_{34}}, \quad Z_{23} = \frac{1}{j\omega \cdot C_{23}}, \quad Z_{12} = \frac{1}{j\omega \cdot C_{12}}, \quad (17)$$

$$Z_{ab} = \left(\frac{1}{Z_H} + j\omega \cdot C_{24} \right)^{-1}, \quad Z_H = \left[\left(\frac{j\omega \cdot L_{S2}}{2} + \frac{j\omega \cdot L_{\mu} \cdot \left(\frac{j\omega \cdot L_{S2}}{2} + R_{\text{екв}} \cdot k_{TP2}^2 \right)}{j\omega \cdot L_{\mu} + \frac{j\omega \cdot L_{S2}}{2} + R_{\text{екв}} \cdot k_{TP2}^2} \right)^{-1} + j\omega \cdot C_{vix} \right]^{-1} \quad (18)$$

Таким чином, у результаті перетворень одержуємо схему, представлену на рис. 5.

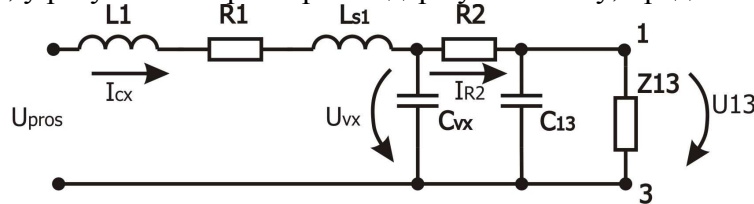


Рис. 5. Розрахункова схема для визначення енергетичних параметрів передавального блоку
 Для знаходження напруги між передавальними антенами виконаємо перетворення:

$$Z_{cx} = R1 + j \cdot \omega(L1 + L_{s1}) + \left[j \cdot \omega \cdot C_{vx} + \left(R2 + \frac{Z13}{1 + j \cdot \omega \cdot C_{13} \cdot Z13} \right)^{-1} \right]^{-1},$$

$$I_{cx} = \frac{U_{pros}}{Z_{cx}}, \quad U_{pros} = \frac{U_{invertora}}{k_{TP1}}, \quad U_{vx} = U_{pros} - I_{cx} \cdot (R1 + j \cdot \omega(L1 + L_{s1})), \quad (19)$$

$$I_{R2} = \frac{U_{vx}}{R2 + \frac{Z13}{1 + j \cdot \omega \cdot C_{13} \cdot Z13}}, \quad U13 = U_{vx} - I_{R2} \cdot R2$$

Після цих перетворень одержимо схему, представлену на рис. 6.

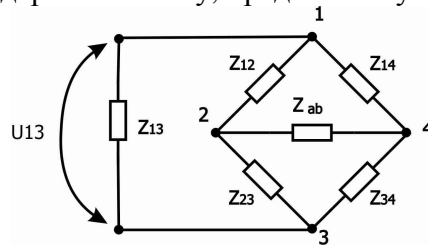


Рис. 6. Розрахункова схема процесу передачі енергії за допомогою теслівських процесів Використовуючи метод еквівалентного генератора, знайдемо струм у вітці 2-4:

$$U_{24} = U_{13} \left(\frac{Z_{12}}{Z_{23} + Z_{12}} - \frac{Z_{14}}{Z_{14} + Z_{34}} \right), \quad I_{24} = \frac{U_{24}}{\left(Z_{ab} + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + \frac{Z_3 \cdot Z_4}{Z_3 + Z_4} \right)} \quad (20)$$

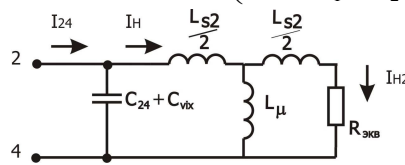


Рис. 7. Розрахункова схема приймального блоку

У навантаження відгалужується частина струму I_{24} , яка дорівнює:

$$I_{H1} = I_{24} \cdot \frac{1}{1 + j\omega \cdot (C_{24} + C_{вих}) \cdot \left(\frac{j\omega \cdot L_{S2}}{2} + \frac{j\omega \cdot L_{\mu} \cdot \left(\frac{j\omega \cdot L_{S2}}{2} + R_{экр} \cdot k_{TP2}^2 \right)}{j\omega \cdot L_{\mu} + \frac{j\omega \cdot L_{S2}}{2} + R_{экр} \cdot k_{TP2}^2} \right)} \quad (21)$$

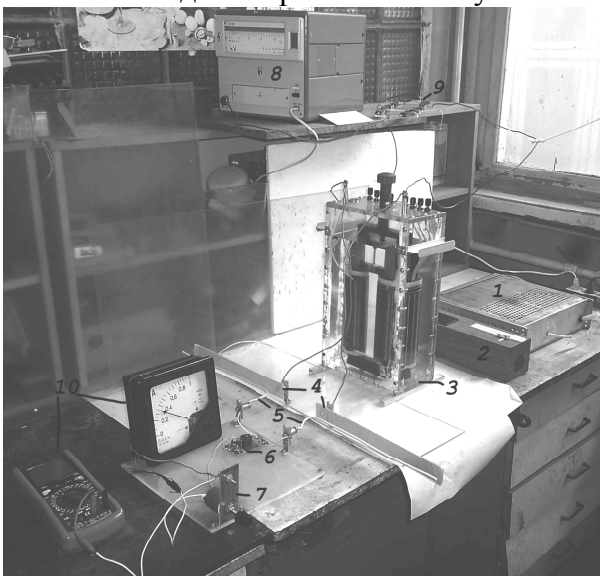
Таким чином, струм навантаження, приведений до вторинної обмотки трансформатора T2:

$$I_H = I_{H1} \cdot \frac{j\omega \cdot L_{\mu}}{j\omega \cdot L_{\mu} + \frac{j\omega \cdot L_{S2}}{2} + R_{экр} \cdot k_{TP2}^2} \cdot k_{TP2} \quad (22)$$

Напруга на навантаженні відповідно:

$$U_H = R_{экр} \cdot I_H \quad (23)$$

Зовнішній вигляд експериментальної установки представлено на рис. 8.



1. Высокочастотный инвертор;
2. Резонансный дроссель;
3. Повышающий высокочастотный трансформатор;
4. Передающие антенны;
5. Приемные антенны;
6. Согласующий высокочастотный микротрансформатор;
7. Переменная нагрузка;
8. Киловольтметр;
9. Выпрямительный мост;
10. Измерительные приборы для снятия энергетических характеристик тесловских процессов.

Рис. 8. Експериментальна установка дослідження теслівських процесів при безконтактній зарядці акумуляторів

Висновки

1. Розроблено експериментальну установку для дослідження теслівських процесів при безконтактній підзарядці акумуляторів.
2. Розраховано параметри елементів, що входять в експериментальну установку.
3. Показано, як параметри установки адаптуються до методики розрахунку теслівських процесів при бездротовій передачі енергії.

Список використаних джерел

1. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
2. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А. Н. Горский, Ю. С. Русин, Н. Р. Иванов, Л. А. Сергеева. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
3. Сергеевков Б. Н. Электрические машины: трансформаторы: учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б. Н. Сергеевков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова. – М.: Высш. шк., 1989. – 352 с.
4. Пентегов И. В. Особенности расчета индуктивностей рассеяния трансформаторов с развитыми магнитными потоками рассеяния / И. В. Пентегов, С. В. Рымар // Електротехніка і електро-механіка. – 2004. – № 2. – С. 38-45.
5. Пентегов И. В. О возможности беспроводной передачи энергии с помощью тесловских процессов / И. В. Пентегов, А. Л. Приступа // Техническая электродинамика. – 2005. – № 3. – С. 11-15.
6. Пентегов І. В. Аналіз теслівських процесів при передачі енергії без проводів / І. В. Пентегов, А. Л. Приступа // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2005. – № 25. – С. 116-122.
7. Пентегов И. В. Применение тесловских процессов для бесконтактного заряда аккумуляторов бытовых электрических устройств / И. В. Пентегов, И. В. Волков, А. Л. Приступа // Технічна електродинаміка. (Тем. вип. „Проблеми сучасної електротехніки”). – 2006. – Ч. 2. – С. 16-21.
8. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – М.: Энергия, 1966.

УДК 621.316.722.076.12

Ю.О. Денисов, д-р техн. наук

О.М. Городній, м.н.с.

О.А. Купко, магістрант

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТА СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРП-ПНС ПАРАЛЕЛЬНОГО ТИПУ

Експериментально досліджені особливості вихідної та регулювальної характеристик паралельного імпульсного квазірезонансного перетворювача та вплив комутаційних мікропроцесів на режим перемикання при нульовому струмі.

Вступ

Паралельні імпульсні перетворювачі (ПП) постійної напруги знайшли ефективне застосування у коректорах коефіцієнта потужності (ККП) для наближення форми струму, що споживається від мережі живлення, до синусоїдальної форми [1]. Але такі перетворювачі мають низку серйозних недоліків:

- 1) силовий транзистор перемикається при значних показниках струму та напруги, що призводить до значної динамічної потужності розсіювання енергії на ньому. Це знижує ККД та обмежує частоту комутації, яка впливає на якість корекції коефіцієнта потужності;
- 2) при наявності різких фронтів у процесі комутації транзистора та наявності в нього і в інших елементах схеми паразитних параметрів (ємностей ключа та міжвиткової ємності дроселя, індуктивностей, нелінійних процесів розсмоктування та накопичення носіїв на переходах транзисторів та ін.) в ПП виникають паразитні коливання на висо-