

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 629.423.31:629.423.32

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.22

ІНДУКТИВНЕ ЗБУДЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОГО RLC -КОНТУРУ ПРЯМОКУТНИМИ ІМПУЛЬСАМИ НАПРУГИ. АНАЛІЗ, ЧИСЕЛЬНІ ОЦІНКИБатигін Ю. В., Єршоміна О. Ф., Шиндерук С. О., Сєріков Г. С.,
Сєрікова І. О., Ходак С. С.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У роботі визначено амплітудно-часова форма струму у вторинному «вихідному» контурі системи з двох індуктивно зв'язаних послідовних резонансних контурів. Для експериментальної моделі дослідженої системи виконані чисельні оцінки динамічних характеристик електромагнітних процесів, що протікають.

Ключові слова: трансформатор Тесла, індуктивно зв'язані контури, добротність, коефіцієнт трансформації, підсилювач напруги.

Вступ

Нікола Тесла отримав свій патент на винахід резонансного перетворювача напруги, названого «трансформатор Тесла», з безпрецедентним коефіцієнтом посилення (більше 1 000 разів), ще на початку минулого століття. Основними складовими запатентованого пристрою є два блоки: первинний – це блок живлення, і вторинний – вихідний блок. Фізично обидва блоки є послідовні резонансні активно-реактивні контури [1, 2].

Особливість трансформатора Тесла полягає в тому, що вихід його вторинної котушки не замкнений електрично. Цей факт зумовив причинність відповідного недоліку, за яким генерується струм, на відміну від напруги, вкрай малий (фактично, це струм зміщення). У зв'язку з цим трансформатор Тесла – безпрецедентний підсилювач напруги – не знайшов гідного практичного застосування. У той же час ідея, закладена винахідником, становить практичний інтерес. Йдеться про резонансні ефекти в принципі дії трансформатора Тесла. Практичне використання останніх у світлі вимог сучасності стає велими перспективним напрямом розвитку електроенергетики [3, 4].

Аналіз публікацій

Варто зазначити, що винахід Ніколи Тесла було задумано насамперед для бездротової передачі електричної енергії на великі відстані, що в «модельному варіанті» було ним реалізовано практично [5, 7].

Якщо вихідний контур трансформатора Тесла навантажити зосередженою ємністю та

подати живлення в режимі «резонансу напруги», то перетворювач такого типу вже представляє особливий інтерес у практичній електротехніці. Наприклад, для живлення навантаження з високими показниками опору, підвищеною напругою, в пристроях індукційного нагріву та ін. [8–10]. Принципово, такий перетворювач на базі трансформатора Тесла є системою з двох індуктивно зв'язаних електрично замкнутих резонансних контурів [11].

Говорячи про резонанс, варто враховувати певну строгість умов, за умови виконання яких можливе це явище. З цієї причини, такі умови широко сформульовані, як правило, тільки для збудження резонансної системи синусоїдальною напругою або струмом на певній частоті і в режимі, який установився [12]. Так розглянуто ангармонійне збудження системи з двох індуктивно зв'язаних послідовних активно-реактивних контурів і для основних характеристик процесів, що протікають, отримано аналітичні вирази, за допомогою яких можна проаналізувати дієвість системи й розрахувати її динамічні показники.

Мета і постановка завдання

Метою цього розгляду є визначення часової форми струму за умови резонансу напруг у вторинному активно-реактивному контурі. Останній збуджується за допомогою індуктивного зв'язку з первинним активно-реактивним контуром, де вхідний сигнал представлений часовою періодичною послідовністю з прямокутних уніполярних імпульсів напруги.

Наукова новизна полягає у визначенні часової форми струму за умови резонансу напруг у вторинному активно-реактивному контурі системи з двох індуктивно зв'язаних контурів, збуджуваною часовою періодичною послідовністю з прямокутних уніполярних імпульсів напруги.

Відповідно до поставленої мети можемо сформулювати задачу.

– Контури пов'язані повітряним трансформатором, індуктивність первинної обмотки якого – L_{1T} , вторинної – L_{2T} .

– Первинний контур – 1 містить послідовно з'єднані індуктивність – L_{1T} (індуктивність первинної обмотки трансформатора зв'язку), ємність – C_1 , активний опір усіх дротів – R_1 , внутрішній активний опір джерела напруги – R_0 , зокрема останні є достатньо малими, так що їх сума набагато менша від реактивних опорів контуру $(R_0+R_1) \ll \omega_1 \cdot L_{1T}$ та $(R_0 + R_1) \ll \frac{1}{\omega_1 \cdot C_1}$, де

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{1T} \cdot C_1}} - \text{власна частота контуру.}$$

– Вторинний контур – 2 містить індуктивність – L_{2T} (індуктивність вторинної обмотки трансформатора зв'язку), окрема «вихідна» індуктивність – L_2 , ємність – C_2 , активний опір дротів, що з'єднують, – R_2 , величина якого настільки мала, що $R_2 \ll \omega_2 \cdot (L_{2T} + L_{1T})$,

де $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{(L_{2T} + L_2) \cdot C_2}}$ – власна частота контуру.

Вибір достатньо малих активних опорів в індуктивно зв'язаних контурах системи обумовлений прагненням до мінімуму дисипативних втрат електричної енергії.

– Частоти первинного та вторинного контурів є рівними, так що $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ – резонансна частота системи.

– Джерело живлення генерує послідовність ангармонічних імпульсів напруги з амплітудою – E_m , часовою функцією – $E(t)$ та частотою проходження $\omega_0 = 2\pi/T$ (T – період), що є рівною резонансній частоті системи – ω , так що $\omega_0 = \omega$.

Аналіз процесів, основні результати

Вираз для струму, що збуджується в другому контурі можна отримати інтегруванням системи диференціальних рівнянь, що описують перехідний процес у двоконтурній резонансній схемі. Опускаючи громіздкі математичні перетворення, запишемо вираз для

струму, що збуджується у вторинному контурі довільною напругою джерела – $E(t)$ [12].

$$I_2(\varphi) = k \cdot \sqrt{\frac{L_{2T}}{L_{1T}}} \cdot \frac{1}{\omega \cdot (L_{2T} + L_2)} \times \int_0^{\varphi} e^{-\delta_0(\varphi-x)} \cos(\varphi-x) \cdot E(x) dx, \quad (1)$$

де $\varphi = \omega \cdot t$ – фаза; $\delta_0 = \delta/\omega$ – відносний декремент затухання.

Проаналізуємо збудження системи періодичною послідовністю уніполярних прямокутних імпульсів напруги тривалістю, що дорівнює половині періоду повторення.

Відповідну фазову залежність можна представити таким розкладанням Фур'є [13]:

$$E(\varphi) = \frac{\pi}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \cos\left(\omega_n \cdot \left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right), \quad (2)$$

де $E_n = \frac{2}{\pi} \cdot E_m \cdot \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{n}$ – амплітуди гармонік спектрального розкладання;

$$\omega_n = \frac{\left(\frac{2\pi}{T} \cdot n\right)}{\omega} - \text{відносні частоти гармонік}$$

спектрального розкладання.

Обчислимо інтеграл у виразі (1) з підстановкою розкладання (2). Нехтуючи нескінченно малими складовими порядку $\sim \delta_0$ та $\{e^{-\delta_0 \cdot \varphi}\}$, після введення резонансних умов для першої гармоніки вхідної напруги одержуємо вираз для струму, що збуджується в стаціонарному режимі з урахуванням усіх гармонійних складових спектра.

$$I_2(\varphi) = \frac{U_m}{R_2} \cdot G(\varphi), \quad (3)$$

де $U_m = \left(\frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{L_{2T}}{L_{1T}}}\right) \cdot E_m$ – амплітуда «вхідної»

напруги у вторинному контурі;

$G(\varphi) = G_1(\varphi) + G_2(\varphi)$ – фазова залежність струму, що збуджується;

$G_1(\varphi) = \sin(\varphi)$ – резонансна гармоніка (перша гармоніка напруги, що збуджує);

$$G_2(\varphi) = \frac{1}{Q} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{n} \cdot \cos\left(n \cdot \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

– вищі гармоніки;

Q – добротність контурів.

З наведених обчислень випливає, що у вторинному контурі:

– перша гармоніка напруги, що збуджує, визначає гармонійну складову струму з частотою, що дорівнює резонансній частоті;

– амплітуда резонансної гармоніки струму дорівнює відношенню «вхідної напруги контуру» до його активного опору, що узгоджується відомими висновками відповідно до процесів за умови «резонансу напруг» (реактивний опір дорівнює нулю);

– амплітуда «вхідної напруги» дорівнює амплітуді сигналу, що збуджує, помноженій на коефіцієнт першої гармоніки розкладання Фур'є і на корінь квадратний з відношення індуктивностей обмоток трансформатора зв'язку (це відношення числа витків або коефіцієнт трансформації);

– величина вкладу вищих гармонік обернено пропорційна добротності контурів – Q ;

– за умови досить високого значення добротності – $Q \gg 1$ вхідна напруга з серії уніполярних імпульсів збуджує у вторинному контурі струм, відхилення тимчасової форми якого від гармонійної залежності є нескінченно малим, близько $\sim 1/Q$.

Розрахункові залежності за формулою (3) для експериментальної моделі [14] представлені на графіках (рис. 1).

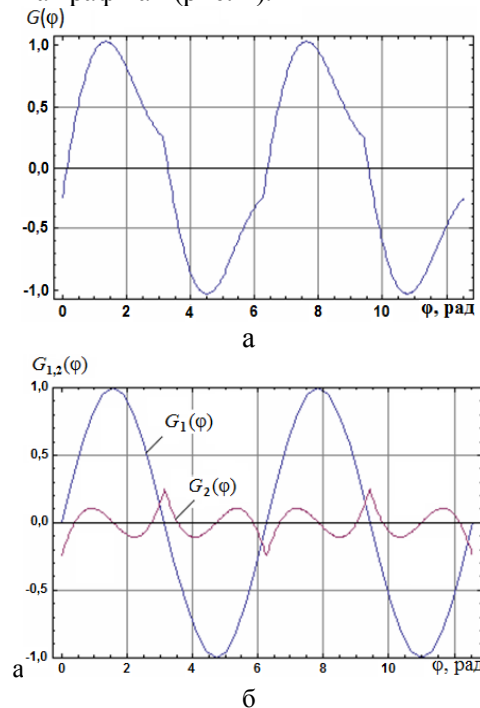


Рис. 1. Фазові залежності резонансного струму у вторинному контурі: а – сумарний сигнал, що містить усі гармонійні складові; б – резонансна частота – $G_1(\varphi)$, вищі гармоніки – $G_2(\varphi)$

Узагальнення основних результатів проведеного аналізу дозволяє сформулювати певні висновки.

Висновки

Визначена амплітудно-часова форма струму у вторинному «вихідному» контурі системи з двох індуктивно зв'язаних послідовних резонансних контурів, коли первинний «вхідний» контур збуджується періодичною послідовністю з прямокутних уніполярних імпульсів напруги.

Для експериментальної моделі системи, що досліджувалася, виконані чисельні оцінки динамічних характеристик електромагнітних процесів, які протікають.

Показано, що зі збільшенням добротності резонансного контуру – Q внесок вищих спектральних складових у формування «вихідного» струму істотно падає, і якщо $Q \gg 1$, останній стає чітко гармонійним.

Отримано, що за умови резонансу напруг реактивний опір індуктивно зв'язаних контурів наближається до нуля, а величина «вхідної» напруги у вторинному контурі дорівнює амплітуді першої гармоніки розкладання Фур'є для сигналу, що збуджується помноженою на коефіцієнт трансформації трансформатора зв'язку між контурами.

Робота виконана в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті в межах науково-дослідної роботи за держбюджетною темою № 08-53-19: «Енергозберігаючі маловитратні технології створення та ремонту гібридних транспортних засобів різного призначення», а саме другого її напрямку, який виконується кафедрою фізики ХНАДУ: «Енергозберігаючі маловитратні технології живлення та ремонту транспортних засобів», які є складовою частиною наукової тематики, що розвивається в університеті.

Література

1. Що таке імпульсний блок живлення і чим він відрізняється від звичайного аналогового. 2017. URL: <http://elektruk.info/device/1081-chtotakoe-impulsnyy-blok-pitaniya.html> (дата звернення: 15.02.2019).
2. N. Tesla. Lectures. Patents. Articles. 2019. URL: <https://ru.scribd.com/document/329266819/Nikola-Tesla-Lectures-Patents-Articles> (дата звернення: 20.08.2018).
3. Transformers. 2015. URL: <https://www.electronicstutorials.ws/transformer/transformer-basics.html> (дата звернення: 14.02.2019).
4. Explainer: what is a Tesla coil? 2018. URL: <http://theconversation.com/explainer-what-is-a-tesla-coil-22723> (дата звернення: 16.02.2019).

5. Нікола Тесла – пророк електричного віку. 2009. URL: <https://www.epochtimes.com.ua/science/persons/nikola-tesla-prorok-elektrychnogo-viku-61402.html> (дата звернення: 16.02.2019).
6. Тесла Нікола. Фізик із майбутнього. 2009. URL: <http://msmb.org.ua/biblioesursi/biligrifiya/osobistosti/tesla-nikola-fizik-iz-maybutnyogo/> (дата звернення: 17.02.2019).
7. Мельник Э. Тесла и его подлинные взгляды. Лучшие работы разных лет / Никола Тесла. (Раскрытые тайны). Москва: Эксмо, 2010. 320 с.
8. Резонансный усилитель мощности тока промышленной частоты. 2008. URL: <http://allpowr.ru/33> (дата звернення: 17.02.2019).
9. Пат. UA 95481. Україна. Спосіб індукційного нагріву металевих елементів автомобільних конструкцій. Опубл. 25.12.2014.
10. Индуктор магнитный или индукционный нагрев металлов. 2011. URL: www.индуктор-авто.рф (дата звернення: 18.02.2019).
11. Схема трансформатора Тесла. Трансформатор Тесла – принцип работы. 2015. URL: <http://fb.ru/article/167817/shema-transformatora-tesla-transformator-tesla---printsip-raboty/> (дата звернення: 19.02.2019).
12. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. Л.: Энергия, 2006. 220 с.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – Москва: Наука, 1973. – 832 с.
14. Батыгин Ю. В., Шиндерук С. А., Сериков Г. С., Ерёмин Е. Ф. Резонансный усилитель электрической мощности. Экспериментальные исследования. *Перспективні технології та прилади*. 2018. Вип. № 13. С. 18–24.
- viku-61402.html (accessed 16.02.2019) [in Ukrainian].
6. Tesla Nikola. Fyzik iz maybutnoho. [Tesla Nicola. Physicist from the future]. Retrived from: <http://msmb.org.ua/biblioesursi/biligrifiya/osobistosti/tesla-nikola-fizik-iz-maybutnyogo/> (accessed 17.02.2019) [in Ukrainian].
7. Melnyk E. (2010). Tesla y eho podlynnnye vzglyady. Luchshye rabo-ty raznykh let / Nykola Tesla. (Raskrytye tayny). [Tesla and his authentic views. Best works of different years / Nikola Tesla. (Revealed secrets)]. M: Éksmo [in Russian].
8. Rezonansnyy usylytel moshchnosty toka promyshlennoy chastoty. [Industrial Frequency Current Resonance Amplifier]. Retrived from: <http://allpowr.ru/33> (accessed 17.02.2019) [in Russian].
9. Pat. UA 95481. (2014) Ukraine. Sposib induktsiynoho nahrivu metalevykh elementiv avtomobilnykh konstruktсий. [Method of induction heating of metal elements of automobile constructions]. Opubl. 25.12.2014 [in Ukrainian].
10. Ynduktor mahnytnyy yly ynduktsyonnyy nahrenv metallov. [Inductor magnetic or induction heating of metals.]. Retrived from: www.ynduktor-avto.rf (accessed 18.02.2019) [in Russian].
11. Skhema transformatora Tesla. Transfor-mator Tesla – pryntsyyp raboty. [Scheme transformer Tesla. Tesla transformer - the principle of operation]. Retrived from: <http://fb.ru/article/167817/shema-transformatora-tesla-transformator-tesla-printsip-raboty/> (accessed 19.02.2019) [in Russian].
12. Atabekov H. Y. (2006). Osnovy teoryy tsepey. [Fundamentals of the theory of chains]. L: Énerhyya, 2006. 220 p. [in Russian].
13. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p. [in Russian].
14. Batygin Yu., Shynderuk S., Serikov G., Yeryomina E. (2018). Rezonansnyy usylytel élektrycheskoy moshchnosty. Éksperymentalnye yssledovanyya. [Resonant electric power amplifier. Experimental research] *Perspective technologies and devices*, 13, 18–24. [in Russian].

References

1. Shcho take impulsnyy blok zhyvleniya i chym vin vidriznyayetsya vid zvychnooho analohovoho. [What is a pulse power supply and how it differs from the usual analog]. Retrived from: <http://elektruk.info/device/1081-cho-to-takoe-impulsnyy-blok-pitaniya.html> (accessed 15.02.2019) [in Ukrainian].
 2. N. Tesla. Lectures. Patents. Articles. 2019. Retrived from: <https://ru.scribd.com/document/329266819/Nikola-Tesla-Lectures-Patents-Articles> (accessed 20.08.2018).
 3. Transformers. 2015. Retrived from: <https://www.electronicstutorials.ws/transformer/transformer-basics.html> (accessed 14.02.2019).
 4. Explainer: what is a Tesla coil? 2018. Retrived from: <http://theconversation.com/explainer-what-is-a-tesla-coil-22723> (accessed 16.02.2019).
 5. Nikola Tesla – prorok elektrychnoho viku. [Nicola Tesla is a prophet of electric age]. Retrived from: [https://www.epochtimes.com.ua/sci-](https://www.epochtimes.com.ua/science/persons/nikola-tesla-prorok-elektrychnogo-)
- Батыгин Юрій Вікторович**, д.т.н., професор, за-
відувач кафедри фізики, тел. +380577073653,
e-mail: yu.v.batygin@gmail.com,
Єрёміна Олена Федорівна, к.т.н., доцент кафе-
дри фізики, тел. +380577073727,
e-mail: elena.yeryomina@gmail.com,
Шиндерук Світлана Олександрівна, к.т.н., до-
цент кафедри фізики, тел. +380577073727, e-mail:
s.shinderuk.2016102@ukr.net,
Серіков Георгій Сергійович, к.т.н., доцент ка-
федри автомобільної електроніки,
тел. +380577003852,
e-mail: georgy301212@gmail.com,
Серікова Ірина Олексіївна, к.т.н., доцент кафе-
дри автомобільної електроніки,

тел. +380671085237, e-mail:

irinaserikova_ae_khadi@ukr.net,

Ходак Сергій Сергійович, студент,

тел. +380934516875,

e-mail: sergey.hodak3@gmail.com.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Inductive excitation of a series RLC-circuit by rectangular voltage pulses. Analysis, numerical estimates

Abstract. Problem. In this paper, we determined the amplitude-time form of the current in the secondary «output» circuit of a system of two inductively coupled sequential resonant circuits, when the primary "input" circuit is excited by a periodic sequence of rectangular unipolar voltage pulses. **Goal.** Determination of the time form of the current at the voltage resonance in the secondary active-reactive circuit. The latter is excited by inductive coupling with the primary active-reactive circuit, where the input signal is represented by a time periodic sequence of rectangular unipolar voltage pulses. **Methodology.** With the help of limiting transitions to the corresponding, the reliability of the found basic analytical dependences for the excited currents and voltages is shown. The obtained calculated relations are based on rigorous mathematical approach using the apparatus of the theory of electrical circuits. **Results.** For the experimental model of the system studied, numerical estimates of the dynamic characteristics of the electromagnetic processes occurring are performed. It is shown that with an increase in the quality factor of the resonant circuits, the contribution of higher spectral components to the formation of the "output" current drops significantly, and when the latter becomes strictly harmonic. It was found that at voltage resonance the reactance of inductively coupled circuits tends to zero, and the value of the "input" voltage in the secondary circuit is equal to the amplitude of the first harmonic of the Fourier expansion for the exciting signal multiplied by the ratio of the transformer of the coupling between the circuits. **Originality.** Determination of the time current form at the voltage resonance in the secondary active-reactive circuit of a system of two inductively coupled circuits, excited by a time periodic sequence of rectangular unipolar voltage pulses, the spectrum of which, along with the fundamental frequency of oscillations, contains so-called higher harmonics with frequencies multiple to the main type hesitation. **Practical value.** The results of the analysis are necessary for the design of electrical devices with resonant components. For example, to supply high-resistance loads with increased voltage, in induction heating devices, etc.

Key words: Tesla transformer, inductively coupled circuits, Q-factor, transformation ratio, voltage amplifier.

Batygin Yuriy Victorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Physics Chair, tel. +380577073653,

e-mail: yu.v.batygin@gmail.com,

Yeryomina Elena Fedorovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Physics, tel. +380577073727,

e-mail: elena.yeryomina@gmail.com,

Shinderuk Svitlana Olexandrivna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Physics Chair, tel. +38(057)707-37-27, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net,

Serikov Georgiy Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the of the Vehicle Electronics Chair, tel. +380577003852,

e-mail: georgy301212@gmail.com,

Sierikova Irina Alekseevna, Ph.D., associate professor. Automobile electronics, tel. +3806 71085237, e-mail: irinaserikova_ae_khadi@ukr.net,

Khodak Sergey Sergeevich, student, tel. +38093451 6875, e-mail: sergey.hodak3@gmail.com.

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Индуктивное возбуждение последовательного RLC-контура прямоугольными импульсами напряжения. Анализ, численные оценки

Аннотация. В данной работе определена амплитудно-временная форма тока во вторичном «выходном» контуре системы из двух индуктивно связанных последовательных резонансных контуров. Для экспериментальной модели исследованной системы выполнены численные оценки динамических характеристик протекающих электромагнитных процессов.

Ключевые слова: трансформатор Тесла, индуктивно-связанные контуры, добротность, коэффициент трансформации, усилитель напряжения.

Батыгин Юрий Викторович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой физики, тел. +380577073653,

e-mail: yu.v.batygin@gmail.com,

Еремина Елена Федоровна, к.т.н., доцент кафедры физики, тел. +3805770737 27,

e-mail: elena.yeryomina@gmail.com,

Шиндерук Светлана Александровна, к.т.н., доцент кафедры физики, тел. +380577073727,

e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net,

Сериков Георгий Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры автомобильной электроники, тел. +380577003852,

e-mail: georgy301212@gmail.com,

Серикина Ирина Алексеевна, к.т.н., доцент кафедры автомобильной электроники, тел. +380671085237,

e-mail: irinaserikova_ae_khadi@ukr.net,

Ходак Сергей Сергеевич, студент,

тел. +38093451 6875,

e-mail: sergey.hodak3@gmail.com.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.