

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.3.011

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.67.060>

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ БЕЗДРОТОВОЇ ЗАРЯДКИ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА НА ОСНОВІ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛИ

М.О. Ломко, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: nlomko@gmail.com

Досліджено процеси бездротового накопичення енергії високої напруги за допомогою резонансного трансформатора Тесли на експериментальних зразках у дії. Проведено моделювання зарядних ланок зі схемою Латура та мостовим випрямлячем. Визначено перспективність використання розроблених моделей для корекції параметрів зарядних пристроїв. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: дистанційне накопичення енергії, трансформатор Тесли, часткові ємності, зарядні кола, струм зміщення, моделювання.

Сучасні передові технології вимагають широкого впровадження систем бездротової передачі енергії. Такі системи не мають альтернативи для бездротової зарядки акумуляторів імплантованих електростимуляторів у медицині. Вони також є незамінними під час передачі енергії герметичним об'єктам, а також у важкодоступні місця. Широке впровадження мобільних пристроїв, зокрема електромобілів, також потребує бездротового заряджання акумуляторів.

Слід зазначити, що бездротова передача енергії за допомогою теслівських процесів здійснюється завдяки струмам зміщення через часткові ємності, утворені антенами випромінювача й приймача енергії та середовищем між ними. На відміну від струму провідності, що протікає в провідних середовищах (металах), який може бути як постійним, так і змінним або пульсуючим, струм зміщення має місце в будь-якому середовищі, зокрема в порожнечі, і завжди змінюється в часі. Що стосується передачі електричної енергії в просторі, то вона можлива тільки в тому випадку, якщо є дві складові електромагнітного поля: електрична та магнітна, причому в теслівських процесах електрична складова значно перевищує магнітну складову. Тому на відміну від передачі енергії за допомогою електромагнітного випромінювання, де значна величина магнітної складової може перевищувати допустимі норми, така система більш безпечна і може бути широко використана, зокрема в медицині.

Чим швидше змінюється електричне поле, тим більше струм зміщення та його магнітне поле і тим більше енергії може бути передано. Дослідження показали, що найбільша ефективність теслівських процесів у разі бездротової передачі енергії спостерігалася в діапазоні частот від 20 кГц до 1 МГц [8–10]. Значний ефект може бути досягнутий і на більш високих частотах.

Потужність ємнісних накопичувачів залежить від їхньої ємності та напруги, на яку вони розраховані, причому залежність від напруги є квадратичною. Тому накопичення енергії на високих напругах є пріоритетним як з погляду величини накопичувальної енергії, так і для її подальшого використання у відповідних електротехнологіях.

Бездротова передача та накопичення енергії у високовольтних накопичувачах дає змогу проводити цей процес більш безпечно щодо техніки безпеки, а також виключає необхідність відключення від джерела накопичення в разі технологічного розряду накопичувача.



У багатьох технологіях, де використовуються ємнісні накопичувачі, час заряду накопичувача навіть на декілька порядків перевищує час його розряду. Тому для накопичення енергії доцільно використовувати пристрої високої напруги невеликої потужності. Таким пристроєм може бути резонансний трансформатор Тесли [3–5], за допомогою якого можна отримати високі потенціали в десятки і навіть в сотні кіловольт. Генерація струмів високої частоти за дуже високої напруги на вторинній обмотці трансформатора Тесли дає змогу проводити дистанційне накопичення енергії в високовольтних накопичувачах через часткові ємності [1, 2]. Джерелами живлення можуть бути як акумуляторні батареї, так і сонячні панелі, а генератором високої частоти (до 1 МГц) – автогенератор Бровіна.

Метою роботи є моделювання процесів накопичення енергії для оцінювання переваг та недоліків різних схем накопичення, а також можливостей удосконалення перетворювальних пристроїв, за допомогою яких відбувається накопичення енергії. Як орієнтири для побудови моделей у пакеті прикладних програм для розрахунку електричних кіл Matlab були взяті результати експериментальних досліджень, які відображені в [2].

Розглянемо зарядні кола з природними струмообмежувальними елементами, якими на високих частотах є так звані «часткові ємності» [7–10].

У роботі [1] наведено схему заряду ємності від трансформатора Тесли із використанням кола подвоєння напруги за схемою Латура. Спрощено зарядне коло за цією схемою наведено на рис. 1 а.

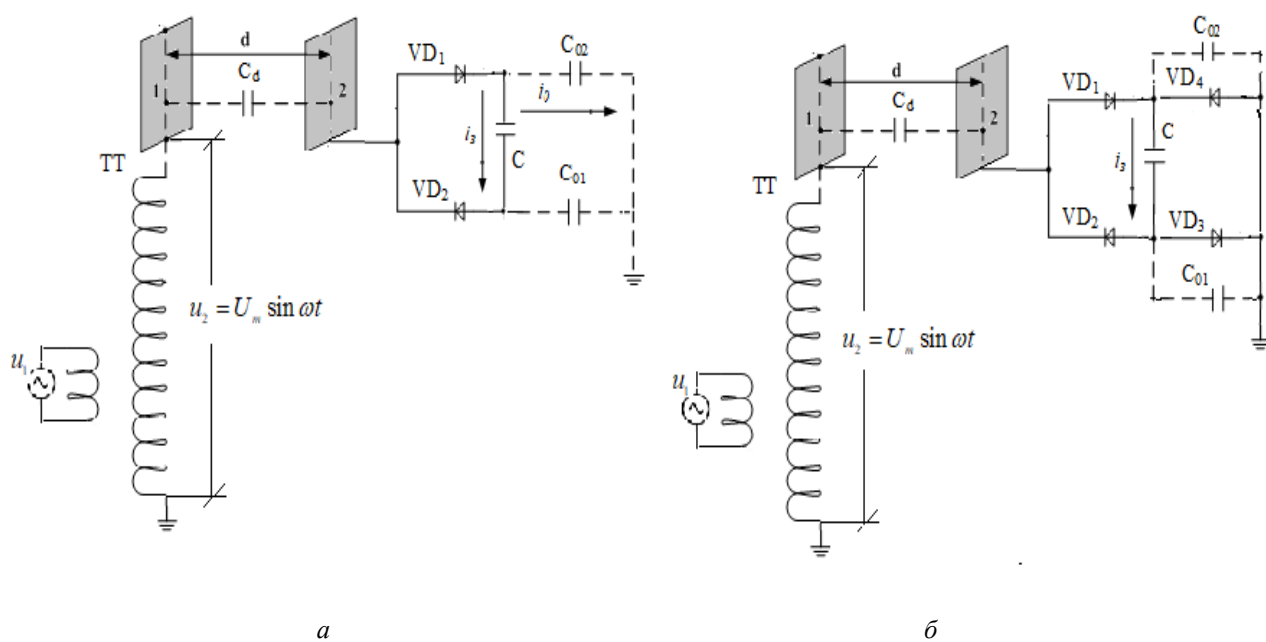


Рис. 1

На рис. 1 а: u_1 – напруга високої частоти (1 МГц), що подається на первинну обмотку трансформатора Тесли (ТТ); $u_2 = U_m \sin \omega t$ – напруга, що знімається дистанційно зі вторинної обмотки трансформатора Тесли через штучну часткову ємність C_d , причому пластина 1 цієї ємності безпосередньо приєднана до високовольтного кінця вторинної обмотки трансформатора Тесли, а пластина 2 на відповідній відстані приєднана до точки з’єднання вентилів VD_1 та VD_2 схеми Латура. Часткові ємності C_{01} та C_{02} , що розташовані в плечах моста, – це природні ємності [7], які є одночасно і струмообмежувальними. Їхні величини залежать від відстані схеми заряду до найближчого заземлення і становлять десятки й навіть сотні відсотків пікофаради. C – ємність або батарея конденсаторів, що заряджається.

Розглянемо процеси, які відбуваються в зарядному колі протягом напівперіоду в середині зарядного циклу. Коли в колі тече зарядний струм i_3 , згідно з другим законом Кірхгофа сума миттєвих значень напруг на частковій ємності C_d , на батареї конденсаторів C та частковій ємності C_{01} повинна бути рівною миттєвому значенню напруги на вторинній обмотці трансформатора Тесли для будь-якого n -го напівперіоду зарядки, тобто:

$$u_{C_{dn}} + u_{C_n} + u_{C_{01n}} = U_m \sin(\omega\tau + \varphi_n), \quad (1)$$

де τ – час відліку від початку чергового імпульсу зарядного струму; φ_n – кут зсуву моменту відмикання вентилів відносно початку напівхвилі синусоїди на n -му напівперіоді зарядки.

Здиференціюємо праву та ліву частини рівняння (1) по τ та запишемо результат у такому вигляді:

$$\frac{1}{C_d} \left(C_d \frac{du_{C_{dn}}}{d\tau} \right) + \frac{1}{C} \left(C \frac{du_{C_n}}{d\tau} \right) + \frac{1}{C_{01}} \left(C_{01} \frac{du_{C_{01n}}}{d\tau} \right) = U_m \omega \cos(\omega\tau + \varphi_n), \quad (2)$$

звідки отримаємо вираз для n -го імпульсу зарядного струму

$$i_3(\tau)_n = C_d \frac{du_{C_{dn}}}{d\tau} = C \frac{du_{C_n}}{d\tau} = C_{01} \frac{du_{C_{01n}}}{d\tau} = U_m \omega \frac{C_d C C_{01}}{C_{01} C + C_d C_{01} + C_D C} \cos(\omega\tau + \varphi_n). \quad (3)$$

У зарядному колі (рис. 1) струм із вторинної обмотки трансформатора Тесли через часткову ємність C_d на кожному з напівперіодів розподіляється на дві частини, одна з яких є струмом зарядки i_3 батареї конденсаторів C і тече через одну із струмообмежувальних часткових ємностей (наприклад, на n -му інтервалі через C_{01}), а друга частина i_0 перезаряджує другу струмообмежувальну часткову ємність (на n -му інтервалі C_{02}), готуючи її до наступного напівперіоду зарядки.

Вираз для n -го імпульсу струму холостої перезарядки буде мати вигляд:

$$i_0(\tau)_n = C_{02} \frac{du_{C_{02n}}}{d\tau} = U_m \omega \frac{C_d C_{02}}{C_d + C_{02}} \cos(\omega\tau + \varphi_n). \quad (4)$$

Треба зауважити, що ємності C_{01} і C_{02} змінюються ролями після кожного напівперіоду зарядного струму.

Будемо проводити макетування за допомогою пакету прикладних програм для розрахунку електричних кіл Matlab. На рис. 2 показано Simulink-модель дистанційного накопичування енергії з використанням схеми Латура. Трансформатор Тесли представлений у вигляді блоку взаємної індуктивності двох магнітнозв'язаних котушок (обмоток) та резонансної ємності C_r . Параметри первинної та вторинної обмоток відповідають параметрам експериментального зразка трансформатора Тесли у дії. Параметри первинної обмотки, яка виконана з мідного проводу діаметром 3,5 мм та має форму диску: кількість витків $n_1=5$, активний опір $R_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ Ом, індуктивність $L_1=3,2$ мкГн; параметри вторинної обмотки, яка виконана з мідного проводу діаметром 0,2 мм, що намотаний на каркасі в один шар: кількість витків $n_2=1500$, активний опір $R_2 = 143$ Ом, індуктивність $L_2=18,8$ мГн.

Два зустрічно підключених напівпровідникових силових діода з приєднаною до них зарядною ємністю та струмообмежувальні часткові ємності між точками під'єднання та землею відповідають схемі Латура (рис. 1 а). Вторинна обмотка трансформатора Тесли з'єднана зі схемою Латура штучною частковою ємністю (на рис. 1 а ємність C_d), величина якої обернено пропорційна відстані між високовольтним виводом вторинної обмотки трансформатора Тесли та місцем з'єднання діодів схеми Латура. Штучна часткова ємність в установці в дії – це два однакових алюмінієвих диска діаметром 60 мм, що підключені відповідно до вторинної обмотки трансформатора Тесли та на загальну точку з'єднання діодів. Під час розрахунків відстань між дисками прийнято рівною 400 мм.

У моделі також враховано часткову ємність відносно землі місця з'єднання діодів і штучної ємності (C_{ch}). Первинна обмотка трансформатора Тесли підключена до генератора змінного струму частотою 1 МГц з напругою, величина якої відповідає напрузі на виході автогенератора Бровіна на установці в дії (33 В).

Слід зауважити, що під час налаштування роботи моделі необхідно враховувати, що резонансний режим роботи трансформатора Тесли дуже залежить від величини штучної часткової ємності між високовольтним виводом вторинної обмотки та зарядним пристроєм, а також від співвідношення цієї величини з величинами інших часткових ємностей. Зменшення відстані між високовольтним виводом вторинної обмотки та зарядним пристроєм сприяє збільшенню зарядного струму, але за умови збереження резонансного режиму. Як показали

дослідження, навіть у разі незначного відхилення робочої частоти від резонансного значення (не більш ніж 10 %) величина інтегрального коефіцієнта перетворення напруги трансформатора Тесли значно зменшується (більше ніж на порядок) [6]. Тому для забезпечення необхідного часу зарядки треба намагатися не відходити від резонансного режиму роботи.

На моделі рис. 2 праворуч на цифрових моніторах показано дійсні значення розрахованих параметрів після закінчення другої секунди заряду в такій послідовності згори донизу:

- величина напруги на вторинній обмотці трансформатора Тесли, B ;
- величина напруги на штучній ємності C_d дистанційного заряду, B ;
- величина напруги на ємності C , що заряджається, B ;
- величина струму заряду ємності C , A ;
- величина напруги на частковій струмообмежувальній ємності C_{01} , B ;
- величина напруги на частковій струмообмежувальній ємності C_{02} , B .

Із наведених результатів видно, що за схемою Латура ємність у 20 мкФ за 2 секунди заряджається на напругу більше ніж на 400 В. Ураховуючи лінійний характер заряду, можна за 10 секунд зарядити її до напруги вище ніж 2 кВ.

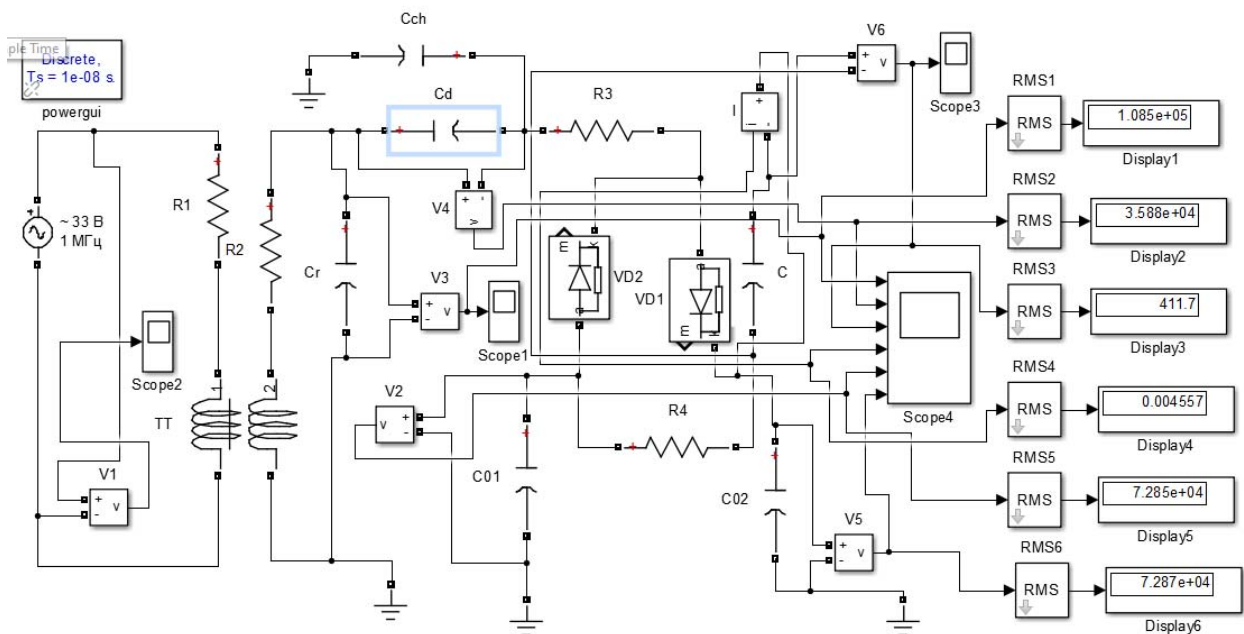


Рис. 2

На рис. 3 зображено осцилограми амплітудних значень відповідних величин за останні 10 мкс другої секунди зарядки.

У роботі [2] досліджено процеси безпровідної передачі енергії в накопичувальний конденсатор від трансформатора Тесли шляхом його заряду до високої напруги тривалим малим зарядним струмом зміщення, що тече через штучну часткову ємність, яка підключена до мостової схеми. Досліджено особливості заряду ємнісного накопичувача та запропоновано аналітичні залежності змінення величини напруги заряду ємнісного накопичувача в часі.

На відміну від схеми Латура, в мостовій схемі (рис. 1 б) тільки штучна ємність є струмообмежувальною. Часткові ємності, що розташовані в плечах моста, шунтуються діодами. Ще однією особливістю мостової схеми є те, що вона повинна обов'язково бути заземленою, тобто мати спільне заземлення з вторинною обмоткою трансформатора Тесли.

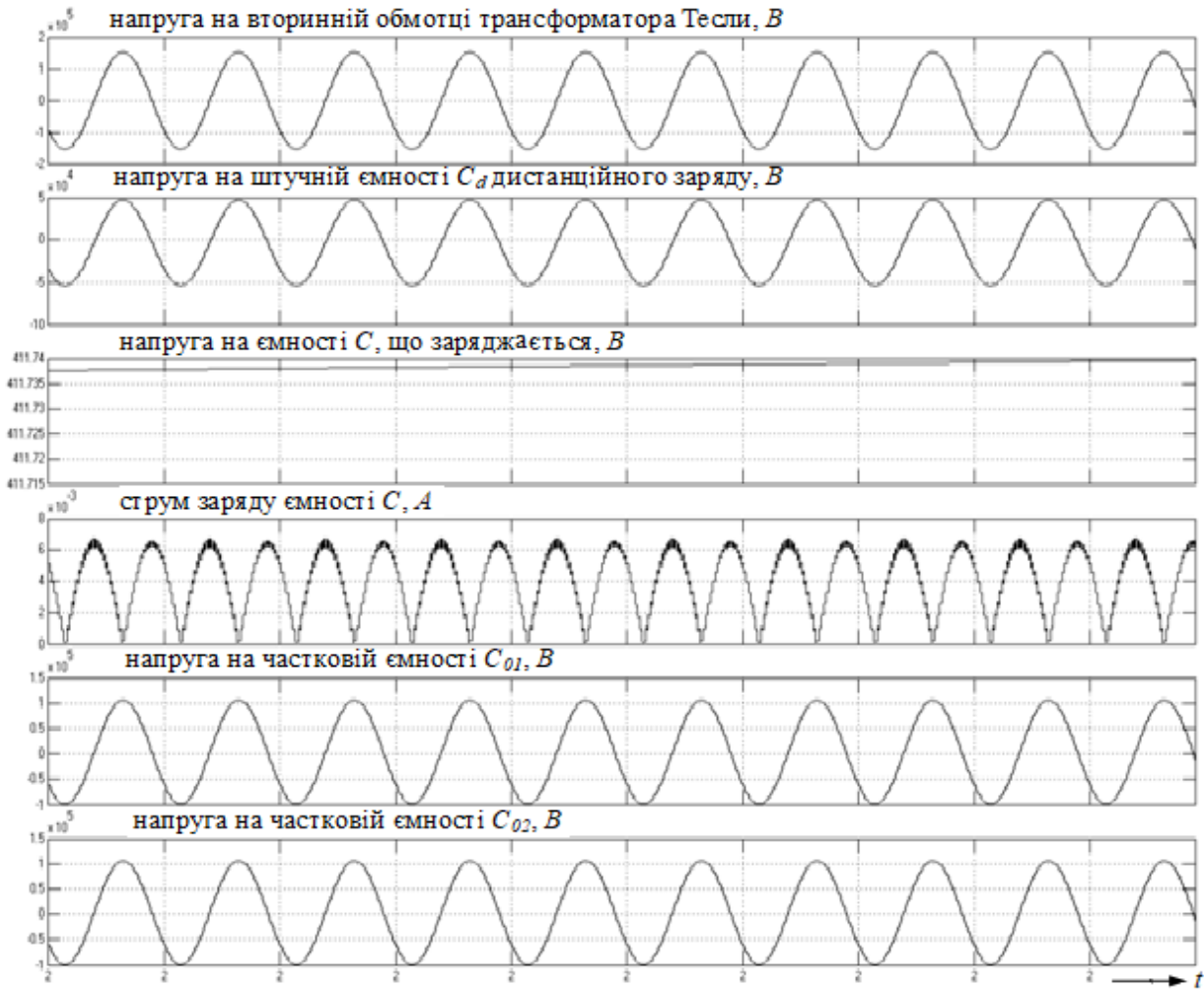


Рис. 3

Simulink-модель дистанційного накопичування енергії з використанням мостової схеми показано на рис. 4. Вона відрізняється від моделі за схемою Латура лише тим, що доповнює її до мостової схеми наявністю двох додаткових діодів та загального заземлення між мостом та вторинною обмоткою трансформатора Тесли.

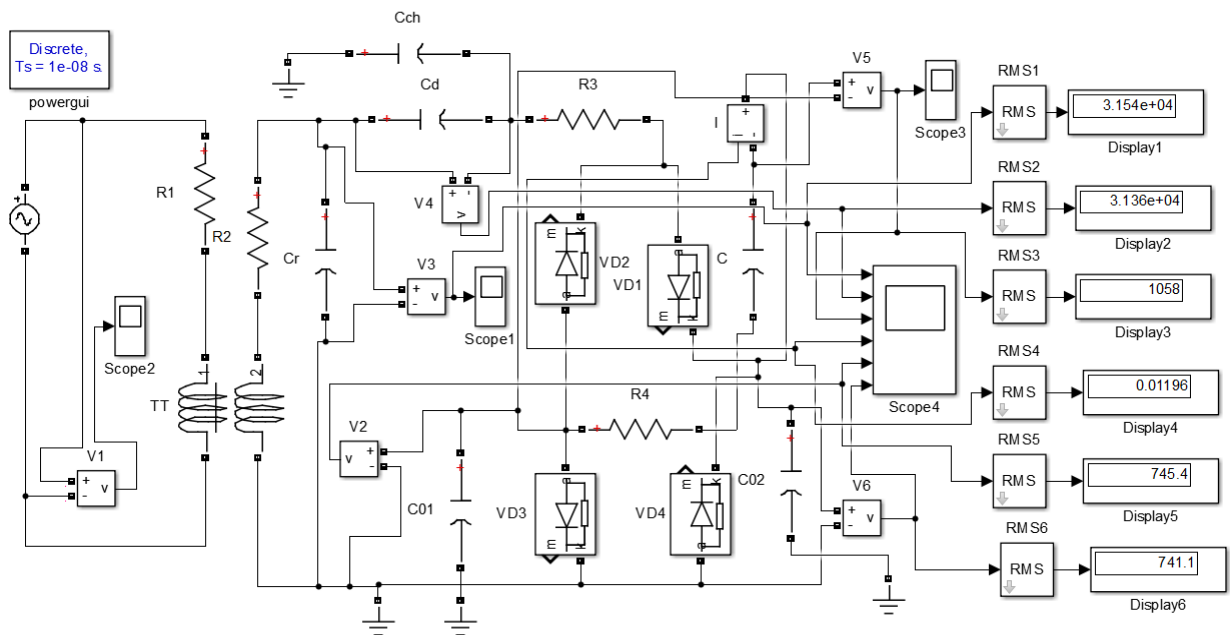


Рис. 4

Як і на моделі рис. 2, на цифрових моніторах представлено дійсні значення розрахованих параметрів після закінчення другої секунди заряду в тій же послідовності за винятком останніх двох параметрів, які відповідають величині напруги на діодах VD3 та VD4 відповідно. Результати показують, що за мостовою схемою ємність у 20 мкФ за 2 секунди заряджається на напругу більше ніж на 1000 В, тобто за 10 секунд її можна зарядити до напруги вище ніж 5 кВ.

На рис. 5 показано осцилограми амплітудних значень відповідних величин за останні 10 мкс другої секунди зарядки. Аналіз отриманих результатів підтверджує повну адекватність моделі запропонованим у [2] аналітичним залежностям змінення величини напруги заряду ємнісного накопичувача в часі. Якщо рівняння усередненої кривої зміни напруги на ємнісному накопичувачі можна представити як [2]:

$$U_C = U_m \left[1 - (1 - k)^{\frac{\omega t}{\pi}} \right], \quad (5)$$

де $k = \frac{2C_d}{C_d + C}$, то час заряду накопичувача – від 0 до U_C :

$$t = \frac{\pi \ln\left(1 - \frac{U_C}{U_m}\right)}{\omega \ln(1 - k)} = \frac{\ln\left(1 - \frac{U_C}{U_m}\right)}{2f \ln(1 - k)} = \frac{\ln\left(1 - \frac{1058}{\sqrt{2} \cdot 31540}\right)}{2 \cdot 1 \cdot 10^6 \ln\left(1 - \frac{2 \cdot 0,06}{0,06 + 20000000}\right)} \approx 2c. \quad (6)$$

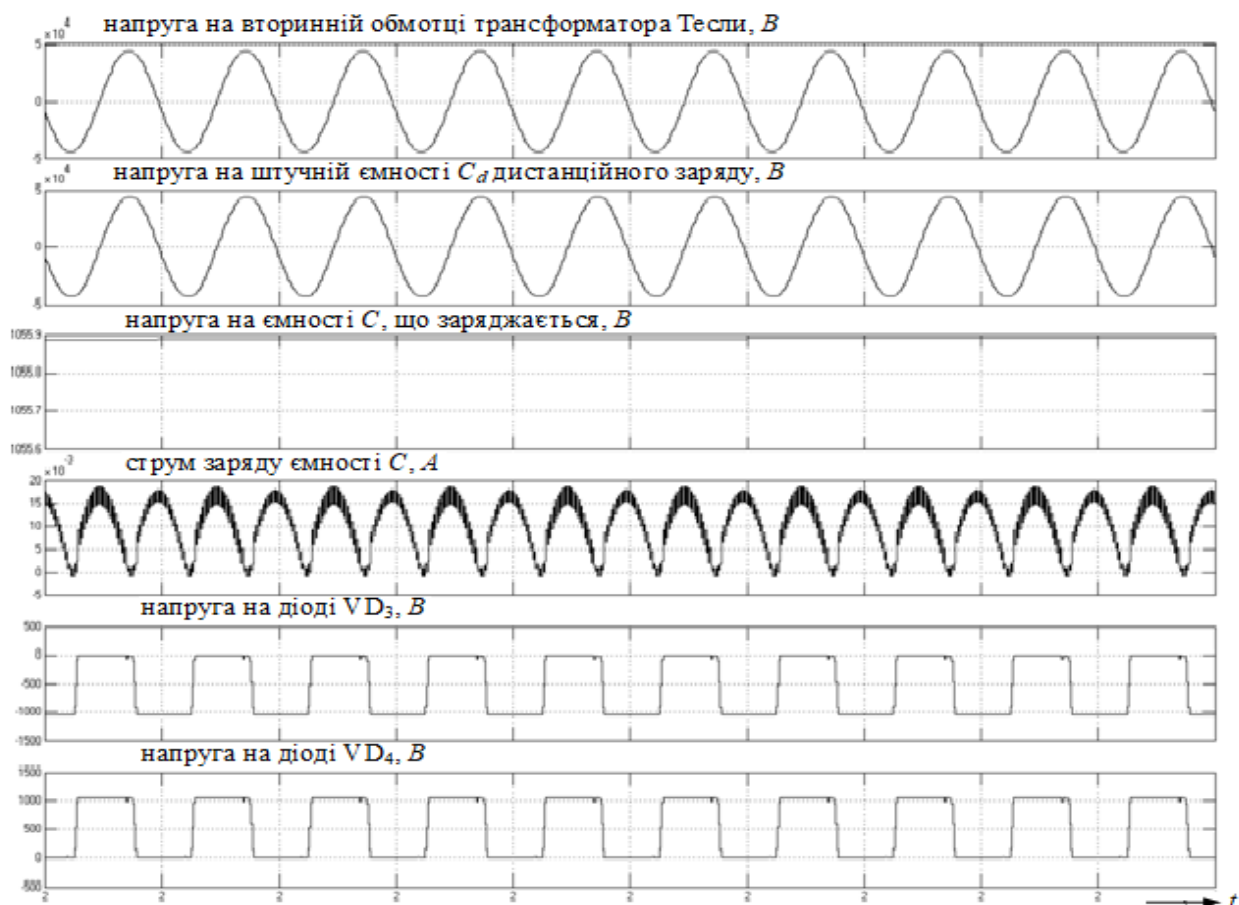


Рис. 5

Отже, запропонована модель відповідає як теоретичним дослідженням, так і результатам експериментальних досліджень, що наведені в [2].

Висновки. 1. У результаті оцінювання переваг та недоліків схем бездротової передачі та накопичування енергії можемо зазначити, що мостова схема значно переважає схему Латура як з погляду налаштування її роботи з резонансним режимом роботи трансформатора Тесли, так і швидкості накопичування енергії. Єдина перевага схеми Латура полягає в тому, що вона не потребує спеціального заземлення, зарядний струм накопичувача замикається через природні часткові ємності.

2. Досліджені схеми бездротової передачі та накопичування енергії дуже актуальні в умовах, де частково або постійно відсутнє централізоване енергопостачання, а електророзрядні технології в дії потребують накопичення енергії високих напруг від малопотужних автономних джерел.

3. Розглянуті схеми накопичення енергії доцільно використовувати в електротехнологіях, де потребується зарядка ємнісних накопичувачів до високих напруг (більше 10 кВ) при невеликій частоті зарядно-розрядних циклів.

4. Запропоновані моделі дають можливість моделювати режими роботи як діючих зарядних пристроїв високої напруги, так і тих, що розробляються з метою поліпшення їхніх якісних та кількісних показників.

Фінансується за держбюджетною темою "Розробка основ теорії і методів дослідження впливу несинусоїдних напруг і струмів та виникаючих електротермодинамічних процесів на надійність і ресурс сучасних кабельних ліній електропередачі та на енергоефективність електротехнічних установок резонансного типу" (Шифр "ЕЛРЕС"), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 03.08.2022 р., Протокол №8. Державний реєстраційний номер роботи 0123U100693.

1. Щерба А.А., Ломко Н.А. Бесконтактный заряд емкостного накопителя с использованием трансформатора Тесла. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. № 44. С. 104–110.
2. Щерба А.А., Ломко Н.А. Передача большой энергии в накопительный конденсатор высоковольтных генераторов разрядных импульсов с трансформаторами Тесла. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2019. № 52. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.52.005>
3. Nikola Tesla. Apparatus for Transmitting Electrical Energy, January 18, 1902, U.S. Patent 1,119,732, December 1, 1914.
4. Ashwin J.S., Sinthuja S. and Manoharan Dr.N.. A Review in Wireless Power Transmissions. *Internatijnal Journal of Electronics and Communication Engineering & Technology*. 2015. No 6(10). Pp. 1–5.
5. Mr.Dhikale Vaibhav, S.S. Bachhav, D.R. Bhise. Wireless Transmitting of Electricity Through Tesla. Tower: Review Paper. *IJSART*. 2019. Vol. 5 Issue 3. VARCH.
6. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А., Третинников Е.А. Выходное напряжение трансформатора Тесла при отклонении рабочей частоты от резонансного значения. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Електротехніка та електроенергетика 2018. Вип. 36. С. 188–194. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142157>
7. Ермуратский П.В. Крах нового "сверхпроводника" или конденсаторы вокруг нас. *Наука и жизнь*. 1992. № 5–6. С. 88–91.
8. Пентегов И.В. К теории тесловских процессов зарядки емкостных накопителей энергии. *Электричество*. 1996. № 6. С. 42–47.
9. Пентегов И.В., Волков И.В., Приступа А.Л. Никола Тесла и системы однопроводной и беспроводной передачи энергии. *Технічна електродинаміка*. 2006. № 4. С. 72–80.
10. Пентегов И.В., Волков И.В., Приступа А.Л. Применение тесловских процессов для бесконтактного заряда аккумуляторов бытовых электрических устройств. *Технічна електродинаміка*. Тем. Вип. Проблеми сучасної електротехніки. 2006. Ч. 2. С. 16–21.

MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF WIRELESS CHARGING OF A CAPACITIVE STORAGE DEVICE BASED ON A TESLA TRANSFORMER

M.O. Lomko

Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: nlomko@gmail.com

The processes of wireless high-voltage energy storage using a Tesla resonant transformer were studied on working experimental samples. Modeling of charging links with a Latour circuit and a bridge rectifier was carried out. The prospects of using the developed models for correcting the parameters of charging devices are determined. Ref. 10, fig. 5.

Key words: remote energy storage, Tesla transformer, partial capacitances, charging circuits, displacement current, modeling.

1. Shcherba A.A., Lomko N.A. Non-contact charge of storage capacitor using Tesla transformer. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. No 44. Pp. 104–110. (Rus)
2. Shcherba A.A., Lomko N.A. High energy transmission to reservoir capacitor of high-voltage generators of discharge pulses with Tesla coils. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2019. No 52. Pp. 5–12. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.52.005>
3. Nikola Tesla. Apparatus for Transmitting Electrical Energy. January 18, 1902, U.S. Patent 1,119,732, December 1, 1914.
4. Ashwin J.S., Sinthuja S. and Manoharan Dr.N.. A Review in Wireless Power Transmissions. *Internatijnal Journal of Electronics and Communication Engineering & Technology*. 2015. No 6(10). Pp. 1–5.
5. Mr.Dhikale Vaibhav, S.S. Bachhav, D.R. Bhise. Wireless Transmitting of Electricity Through Tesla. Tower: Review Paper. IJSART. 2019. Vol. 5 Issue 3. VARCH 2019.
6. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Tretinnikov E.A. The output voltage of the Tesla transformer when the operating frequency deviates from the resonant value. *Visnyk Pryazovskogo derzhavnogo universitetu. Elektrotekhika ta Elektroenergetyka*. 2018. No 36. Pp. 188–194. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142157>
7. Ermuratsky P.V. The collapse of the new "superconductor" or capacitors around us. *Nauka i zhyzn*, 1992. No 5–6. Pp. 88–91. (Rus)
8. Pentegov I.V. On the theory of Tesla processes of charging the capacitive energy storage devices. *Elektrichestvo*. 1996. No 6. Pp. 42–47. (Rus)
9. Pentegov I.V., Volkov I.V., Pristupa A.L. Nikola Tesla and systems of single-wire and wireless energy transmission. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2006. No 4. Pp. 72–80. (Rus)
10. Pentegov I.V., Volkov I.V., Pristupa A.L. Application of Tesla processes for contactless charging of batteries of domestic electric appliances. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2006. Problemy suchasnoi elektrotekhniki. Part 2. Pp. 16–21. (Rus)

Надійшла: 18.10.2023

Прийнята: 09.11.2023

Submitted: 18.10.2023

Accepted: 09.11.2023