

УДК 621.314.5

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.087>

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАНСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВИСОКОЇ НАПРУГИ НА НАВАНТАЖЕННІ ЄМНІСНОГО ТИПУ

Д.В. Вінниченко

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: vdvvvs@gmail.com

Робота присвячена порівняльному аналізу струмів в колах інверторів безтрансформаторних резонансних та трансформаторних резонансних і нерезонансних систем однакової потужності для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу. Метою роботи є визначення типу системи, що характеризується найменшим середнім діючим струмом ключів інвертора. Отримано залежності струмів у колах інверторів від параметрів резонансних кіл, результати розрахунків за якими дають змогу стверджувати, що застосування безтрансформаторної схеми для забезпечення однакової потужності систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу дозволить майже удвічі знизити середній діючий струм у колі інвертора. Проведено імітаційне моделювання процесів у досліджених схемах, яке підтверджує отримані теоретичні результати. Застосування високовольтних безтрансформаторних резонансних систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу дасть змогу вдвічі знизити номінальні та максимально допустимі струмові характеристики силових елементів перетворювачів. Бібл. 10, рис.3.

Ключові слова: електротехнічна система, змінний струм, індуктивно-ємнісний контур, послідовний резонанс, безтрансформаторний зарядний пристрій, добротність резонансного кола.

На сьогодні виникає гостра необхідність в швидкому проведенні діагностики якості ізоляції високовольтних мереж, поблизу яких здійснено руйнування конструкційних елементів на трасах кабельних ліній або технічних споруд. Згідно з [1] позапланові випробування якості ізоляції необхідно проводити після відновлення кабельних ліній та усунення механічних пошкоджень, що виникли в результаті воєнних дій, на трасах кабельних ліній або поблизу них, на яких виконуються будівельні роботи. Тому актуальною задачею є створення малогабаритних мобільних високовольтних установок для випробування міцності ізоляції високовольтних кабелів.

Згідно з [1] випробування електричної міцності ізоляції високовольтних кабелів 2 кВ–35 кВ проводиться випрямленою напругою від 70 кВ. Для того, щоб підняти постійну напругу на заданий рівень, необхідно зарядити ємність між жилою та екраном (для кабелів зі зшитого поліетилену питома ємність дорівнює 330 пФ/м із довжиною кабелю від 1 км до 20 км). Щоб зарядити таку ємність мінімум до 70 кВ, зазвичай застосовують високовольтний трансформатор з випрямлячем потужністю до десятків кіловат. Тобто великі розміри сучасних випробувальних установок зумовлені ємнісним характером електричного навантаження та високою напругою. Фактично така випробувальна установка є потужним високовольтним зарядним пристроєм ємнісного накопичувача енергії. Крім того, зарядні пристрої (ЗП) високовольтних ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) застосовуються в актуальних нині високовольтних технологіях. Наприклад, для отримання наноструктурних покриттів із карбідів титану та вольфраму [2] та отримання органічних кислот [3] використовують генератори імпульсних струмів [4], що забезпечують напругу до 50 кВ, для яких зниження маси та габаритів зарядних пристроїв також актуальні. Для зниження масо-габаритних характеристик систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу в статті [5] запропоновано використання високодобротних резонансних систем та відмову від високовольтного трансформатора.

У резонансних системах отримання високої постійної напруги на ємнісному навантаженні, яким є ємність ізоляції високовольтних кабелів, виникають ситуації енергообміну між конденсатором резонансного кола та ємністю ізоляції. Аналіз процесів енергообміну конденсаторів проведено в [6]. Але наведені методи аналізу не дають змогу отримати вирази для



розрахунку високої постійної напруги в резонансних системах заряджання ємності ізоляції високовольтних кабелів.

Застосування резонансних систем зі стабілізованим вихідним струмом в зарядних пристроях ЄНЕ не є новим [7, 8]. У цих роботах обґрунтовано використання високовольтних трансформаторів для отримання високої напруги на ЄНЕ. Тобто високовольтні трансформатори, що узгоджують опір навантаження з опором резонансного кола, були невід'ємною частиною таких ЗП. Причини застосування високовольтних трансформаторів у резонансних ЗП обґрунтовано І.В. Пентеговим у [8] для забезпечення критерію мінімуму габаритів реактивних елементів резонансного кола, але автор не враховував додаткові габарити самих трансформаторів. Тобто високовольтні безтрансформаторні резонансні зарядні пристрої цими авторами не досліджувалися.

Розробка високовольтних безтрансформаторних зарядних пристроїв гальмується тим, що реактивна потужність у резонансному колі значно більша за активну потужність у колі навантаження. Іншими словами струм у резонансному колі, в яке входять транзисторні ключі, значно перевищує струм у колі навантаження. Це явище спостерігається як для випадку неперервного розкачування струму в резонансному колі [9], так і для генерації послідовних резонансних імпульсів [10]. Не має сенсу використовувати такі резонансні системи, якщо підвищення струму в колі інвертора вимагає підвищувати номінальні та максимально допустимі струмові характеристики силових елементів перетворювачів. Це може призвести до збільшення втрат енергії в елементах резонансного кола, знизити ККД зарядного пристрою та підвищити ціну пристрою в цілому.

Але такі висновки суперечать результатам попередніх досліджень високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою (ВВБРЗП) [5], які показали, що елементи резонансного кола експериментальних високовольтних резонансних зарядних пристроїв нагріваються значно менше за елементи трансформаторних зарядних пристроїв (ТЗП), в яких використовується масляне охолодження [4]. Отже, залишається відкритим питання порівняння струмів у колах інверторів високовольтних зарядних пристроїв ЄНЕ найбільш розповсюджених схем. Саме тому дослідження та порівняння характеристик резонансних систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу є актуальною задачею.

Мета роботи: дослідити та порівняти струми в колах інверторів безтрансформаторних резонансних та трансформаторних систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу для визначення типу системи, що характеризується найменшим середнім струмом ключів інвертора.

Моделювання процесів заряджання ємнісного накопичувача енергії до напруги 70 кВ.

Для отримання напруги порядку $U_{out}=70$ кВ із застосуванням резонансного зарядного пристрою ЄНЕ із вхідною напругою E необхідно забезпечити високу добротність резонансного кола $Q > U_{out}/E$ [9]. Таку умову можна задовольнити, забезпечивши задане відношення індуктивного ωL та активного опору r резонансного кола, а саме, $Q = \omega L/r$. Через те, що власна частота резонансного кола, побудованого на нелінійному індуктивному елементі (дросель із осереддям), значно залежить від температури осереддя, у резонансних зарядних пристроях використовують повітряні дроселі. У такому випадку активний опір r резонансного кола практично дорівнює опору дроселя. У разі збільшення індуктивності повітряного дроселя зростає і його активний опір, що стає причиною теплових втрат енергії в резонансному колі, що знижує ККД резонансного зарядного пристрою. Таким чином, необмежене збільшення добротності резонансного кола є недоцільним. Тому для моделювання процесів у зарядному пристрої задано напругу на виході резонансного кола в межах 30 кВ. Для забезпечення вихідної напруги $U_{out}=70$ кВ, необхідної для випробування електричної міцності ізоляції високовольтних кабелів, випрямляч побудовано за схемою збільшення напруги у три рази.

Для проведення порівняльного аналізу електричних характеристик резонансного кола з традиційними нерезонансними системами обрали три найбільш відомі схеми зарядних пристроїв ємнісних накопичувачів енергії, наведені на рис. 1. На рис. 1 а наведено схему зарядного пристрою ЭНЕ, позначеного на схемі C_p , з індуктивним струмообмеженням за допомогою дроселя L (ЗПС), на рис. 1 б – схему трансформаторного резонансного зарядного пристрою

(ТРЗП), в якому струмообмеження виконано за допомогою послідовного резонансного кола, на рис. 1 а – схему високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою. Резонансне коло на рис. 1 б, в утворюють індуктивність L та ємність C_r . Формувач постійної напруги (ФПН) на рис. 1 показано як джерело напруги E . У всіх схемах використовується проміжне перетворення частоти за допомогою напівмостового інвертора з транзисторними ключами S_1, S_2 та конденсаторами C_1, C_2 . Як генератор або джерело постійної напруги можна використовувати випрямляч мережевої напруги або акумулятор. Інвертор може мати мостову або напівмостову топологію. Високовольтний випрямляч може бути побудований за мостовою, одно- або двофазною схемою постійного струму або за схемою множення напруги.

Дослідження процесів в схемах ЗП проведено за допомогою імітаційного моделювання засобами LTSpice. На рис. 2 наведено модель в середовищі LTSpice для моделювання процесів у ЗПС (рис.2 б), ВВБТРЗП (рис.2 в), ТРЗП (рис.2 г) з єдиним джерелом живлення постійного струму E (рис.2 а). Параметри моделі ВВБТРЗП дорівнюють параметрам дроселя експериментального зразка ЗП.

Для порівняння струмів у колах інверторів зарядних пристроїв ємнісного накопичувача енергії параметри в трансформаторних схемах задано таким чином, що вони забезпечують однакову вихідну потужність.

$$P_{out} = \frac{W_{Cp}}{t_3} = \frac{C_p U_{Cp}^2}{2t_3}. \quad (1)$$

де W_{Cp} – енергія, накопичена в ЄНЕ, C_p – ємність ЄНЕ, U_{Cp} – напруга, до якої заряджений ЄНЕ, t_3 - час заряджання ЄНЕ.

Параметри моделей ЗПС та ТРЗП підбрано так, щоб заряджання ЄНЕ до напруги 70 кВ здійснювалось за однаковий час. Тобто всі представлені моделі мають однакову вихідну потужність заряджання ЄНЕ до 70 кВ.

На рис. 2 а наведено модель джерела напруги, на виході якої формується постійна напруга 300 В (між вузлами hv та N, а також між N та землею). Конденсатори C32, C36 – C38 є частиною напівмостової схеми інверторів. На рис. 2 б, в, г наведено транзисторні частини інверторів із транзисторними ключами S .

Модель ЗПС на рис. 2 б містить транзисторні ключі інвертора S_2, S_3 , паралельно до яких приєднано зворотні діоди. Модель трансформатора побудовано на магнітноз'єднаних індуктивностях L_2, L_3 , коефіцієнт трансформації визначається за виразом $k_{tr} = \sqrt{L_3/L_2}$.

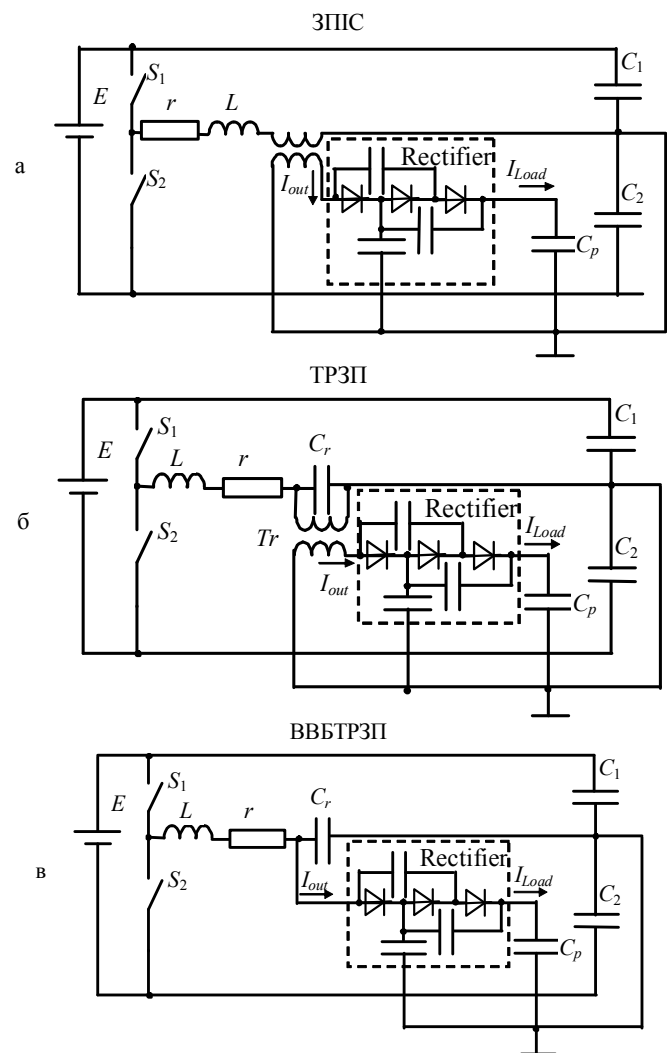


Рис. 1. Структурні схеми зарядних пристроїв ємнісних накопичувачів енергії

У моделі трансформатора його індуктивність розсіювання вказана як така, що дорівнює нулю. Реальна індуктивність розсіювання трансформатора підсумовується з індуктивністю зовнішнього дроселя і дорівнює індуктивності L4, яка обмежує струм транзисторів.

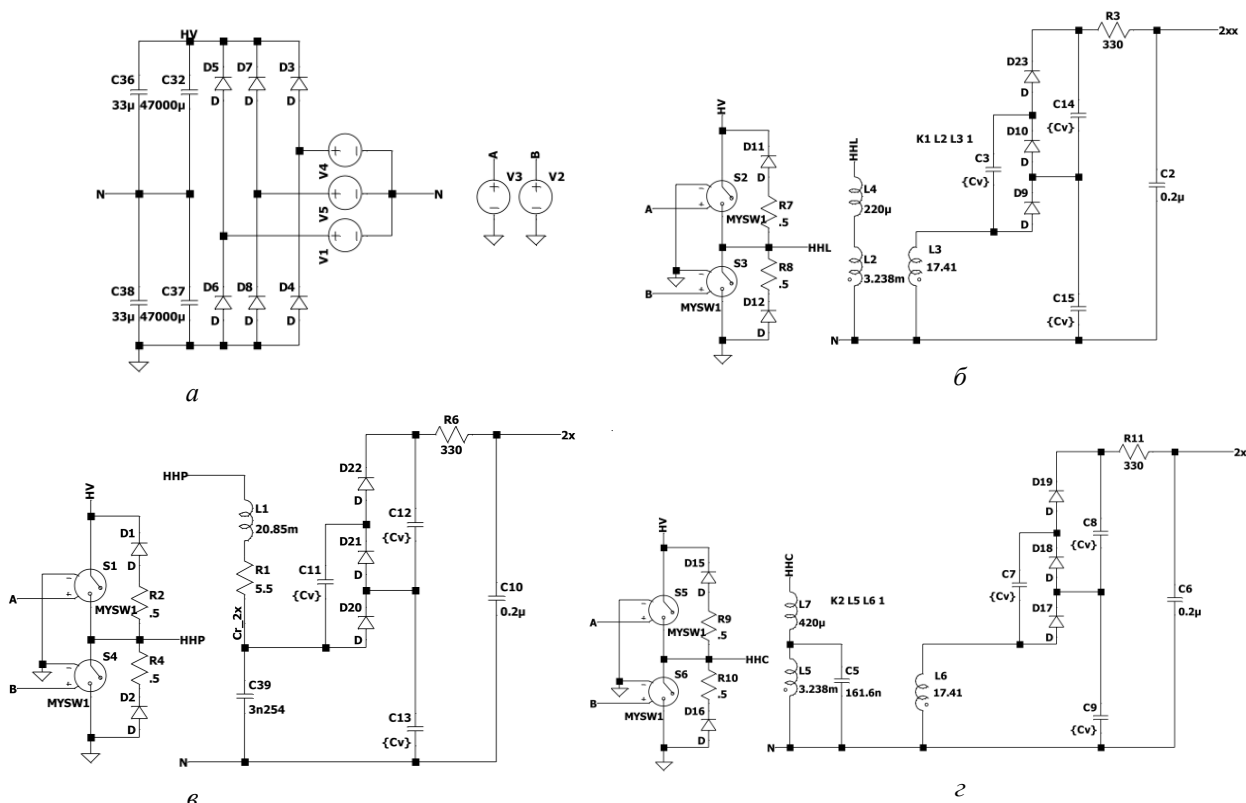


Рис. 2. Схеми для імітаційного моделювання в середовищі LTSpice процесів в ЗПС (б), ВВБТРЗП (в), ТРЗП (з) з єдиним ФПН (а)

Модель помножувача напруги побудовано із діодів D9, D10, D23 та конденсаторів C3, C14, C15. Ємнісний накопичувач енергії на моделі представлено конденсатором C2, напруга на якому вимірюється між точками 2xx та N.

Модель ВВБТРЗП на рис. 2 в містить транзисторні ключі інвертора S1, S4, паралельно до яких приєднано зворотні діоди. Індуктивність L1 утворює резонансне коло з конденсатором C39. Активний опір котушки індуктивності представлено на моделі резистором R1. Модель помножувача напруги побудовано із діодів D20 – D22 та конденсаторів C11 – C13. Ємнісний накопичувач енергії на моделі представлено конденсатором C10, напруга на якому вимірюється між точками 2x та N. Модель ТРЗП на рис.2 з містить транзисторні ключі інвертора S5, S6, паралельно до яких приєднано зворотні діоди. Модель трансформатора побудовано на магнітноз’єднаних індуктивностях L5, L6, коефіцієнт трансформації визначається за виразом $k_{tr} = \sqrt{L5/L6}$.

У моделі трансформатора індуктивність його розсіювання вказана як така, що дорівнює нулю. Реальна індуктивність розсіювання трансформатора сумується з індуктивністю зовнішнього дроселя і дорівнює індуктивності L7, яка утворює резонансне коло з конденсатором C5. Модель помножувача напруги побудовано із діодів D17– D19 та конденсаторів C7– C9. Ємнісний накопичувач енергії на моделі представлено конденсатором C6, напруга на якому вимірюється між точками 2xy та N.

На рис. 3 наведено результати імітаційного моделювання – струми через транзистори інверторів ЗПС (див. рис. 3 а), БТРЗП (див. рис. 3 б), ТРЗП (див. рис. 3 в) та напруга на ЄНЕ (див. рис. 3 з). Середній струм заряду ЄНЕ для всіх схем (див. рис. 2 б, в, з) однаковий, що впливає із залежності середнього зарядного струму I_z від ємності C_p ЄНЕ, напруги на ньому

U_{Cp} й часу зарядки t_3 : $I_3 = C_p U_{Cp} / t_3$ та однакових значень всіх змінних у правій частині рівняння. Для схем із трансформатором із коефіцієнтом трансформації k_{tr} (ЗПС, ТРЗП) струм транзисторів інвертора визначається через струм вторинної обмотки трансформатора I_2 за виразом $I_1 = k_{tr} I_2$.

Для ЗПС зарядний струм зменшується в процесі зарядки, а вимірний середній діючий струм транзисторів інвертора (або струм крізь струмообмежувальну індуктивність) (див. рис. 3 а) дорівнює $I_L = 7,03$ А.

Його визначили за результатами імітаційного моделювання.

Для ТРЗП вимірний за результатами моделювання (див. рис. 3 б) середній діючий струм крізь транзистори інвертора або струм індуктивності резонансного кола, приведений до первинної обмотки трансформатора, дорівнює $I_L = 7,85$ А. Для схеми ВВБТРЗП вимірний за результатами моделювання (див. рис. 3 в) середній діючий струм крізь транзистори інвертора та індуктивність резонансного кола дорівнює $I_L = 4,16$ А, що в 1,9 раза менше за струм у схемі ТРЗП та в 1,7 раза менше за струм у схемі з індуктивним струмообмеженням.

Результати моделювання показують, що струм у колі інвертора за використання безтрансформаторної резонансної схеми майже в два рази менший порівняно з іншими наведеними трансформаторними схемами. Це підтверджують результати попередніх досліджень, у яких транзистори інвертора ВВБТРЗП нагріваються значно менше за транзистори інвертора в трансформаторних схемах.

Залежності струмів в колах інверторів від параметрів їхніх елементів.

Для отримання залежностей струмів у колах досліджуваних схем від їхніх параметрів використовували спрощену модель зарядного пристрою, наведену в [9]. У моделі напругу U_{Cr} , що встановилася на конденсаторі резонансного кола C_r , можна задати як падіння напруги на активному опорі R , якій розраховується за виразом $R = U_{Cr} / I$. Слід відмітити, що потужність $p_{Cp} = u_{Cp} i$ зарядки ЄНЕ C_p має активний характер, тому що добуток напруги на ЄНЕ u_{Cp} та струму i в колі навантаження з опором R завжди позитивний. Через спрощення схеми, замінивши послідовно з'єднані випрямляч та ємнісний накопичувач C_p на активний опір R , отримано більш просту модель, яка дає змогу одержати зручні для аналізу залежності характеристик високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача від його параметрів та добротності резонансного кола. У цій моделі відносний безрозмірний активний опір навантаження визначається виразом $k = \frac{R}{\omega L}$, де добротність резонан-

$$Q = \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{\omega C_p r}.$$

Наведена модель побудована для схеми випрямляча, яка не передбачає множення напруги. У випадку використання помножувача напруги як вихідна напруга за моделлю розраховується максимальна напруга на ємності резонансного кола U_{Crm} . Напруга на ЄНЕ складає

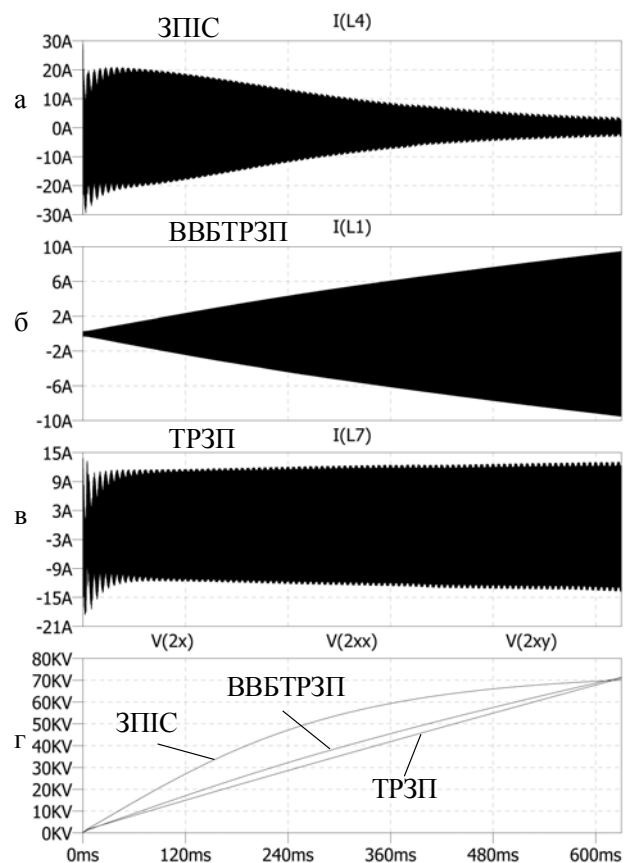


Рис. 3. Результати імітаційного моделювання – струми транзистори інверторів ЗПС (а), ТРЗП (б), ВВБТРЗП (в) та напруги на ЄНЕ (г)

$U_{Cp}=3U_{Crm}$. У разі використання помножувача напруги вихідним струмом, що розраховується за моделлю, є струм I_{out} , який йде на вхід випрямляча (див. рис.1). Зарядний струм дорівнює $I_{Load}=I_{out}/3$. Відповідно для помножувача напруги опір навантаження визначається як $R=U_{Crm}/I_{out}$. Наведена в [9] модель є спрощеною, але вона дає змогу оцінити залежність струмів у зарядному пристрої від добротності резонансного кола та напруги на навантаженні, що дорівнює U_{Crm} та пов'язана зі значенням відносного безрозмірного опору навантаження k виразом, наведеним в [9] $k = \frac{Q \cdot |U_{Crm}|}{QE - |U_{Crm}|}$, де U_{Crm} – максимальна напруга на ємності резонансного

кола, яка втричі менша напруги на ЄНЕ, що зумовлено використанням помножувача напруги на 3. Для моделі ТРЗП з урахуванням коефіцієнта трансформації k_{tr} , відносний безрозмірний активний опір, приведений до первинної обмотки трансформатора, дорівнює $k' = \frac{R}{\omega L k_{tr}^2} = \frac{k}{k_{tr}^2}$.

Згідно з виразом [9] $I_L = \frac{Q \cdot E \cdot (jk + 1)}{j\omega L \cdot (k + Q - j)}$ модуль струму в резонансному колі моделі ТРЗП дорівнює

$$I_1 = I_L = \frac{Q \cdot E \cdot \sqrt{k^2 + 1}}{\omega L \cdot \sqrt{(k+Q)^2 + 1}} = \frac{Q \cdot I_{CS} \cdot \sqrt{k^2 + 1}}{\sqrt{(k+Q)^2 + 1}}, \quad (2)$$

де $I_{CS}=E/\omega L$ – струм індуктивності резонансного кола та транзисторів інвертора в разі короткого замикання навантаження, тобто коли опір навантаження дорівнює нулю в момент початку зарядки конденсаторів випрямляча та ЄНЕ.

Із урахуванням умови $Q \gg 1$ цей вираз перетворюється у вираз $I_1 = I_{CS} \cdot \sqrt{k^2 + 1}$. За умови короткого замикання ($U_{Cp}=0, R=0, k'=0$) $I_1 = I_{CS}$.

Коли напруга на ЄНЕ досягне заданого значення (70 кВ у моделюванні), напруга на первинній обмотці трансформатора досягне напруги E_m , що відповідає значенню відносного навантаження $k'=1$. Відповідно до виразу (2) струм індуктивності резонансного кола та транзисторних ключів досягне значення $\sqrt{2}I_{CS}$. Тобто в моделі ТРЗП середній діючий струм індуктивності L буде визначатись площею криволінійної трапеції (див. рис. 3 в), паралельні бокові грані якої дорівнюють I_{CS} та $\sqrt{2}I_{CS}$. У процесі зарядки ЄНЕ k' буде змінюватись у діапазоні від 0 до 1, а струм у колі інвертора буде змінюватись незначно. Виміряний за результатами моделювання середній діючий струм індуктивності резонансного кола дорівнює $I_1 = 7,85$ А.

Для моделі ВВБТРЗП із виразу (2) слідує, що модуль струму індуктивності резонансного кола за умови короткого замикання ($U_{Cp}=0, R=0, k=0$) дорівнює I_{CS} , а наприкінці зарядки дорівнює

$$I_1 = I_L = \frac{Q \cdot I_{CS} \cdot \sqrt{k^2 + 1}}{\sqrt{(k+Q)^2 + 1}}, \quad (3)$$

Слід врахувати, що напруга на конденсаторі резонансного кола в моделі ВВБТРЗП в k_{tr} разів більша за напругу на конденсаторі резонансного кола в моделі ТРЗП. Це пояснюється тим, що в усіх моделях ЄНЕ заряджається до однакової напруги. Відповідно струм короткого замикання I_{CS} у моделі ВВБТРЗП у k_{tr} разів менше за струм у моделі ТРЗП. Введемо позначення I_{CSi} і I_{CSil} відповідно для трансформаторної та безтрансформаторної схем. Тоді $I_{CSi}=k_{tr}I_{CSil}$.

Зростання струму за виразом (3) пояснюється послідовним введенням енергії в резонансний контур. Водночас, огинаючи епюр струму індуктивності резонансного кола і напруги на конденсаторі резонансного кола є подібними. Тому можна вважати, що в моделі ВВБТРЗП наприкінці зарядки ЄНЕ до заданої напруги за виразом (1) струм за виразом (3) незначно відрізняється від струму індуктивності резонансного кола в моделі ТРЗП. Тобто коефіцієнт при I_{CS} у виразі (3) приблизно дорівнює k_{tr} .

Наприкінці зарядки струм у колі інвертора ВВБТРЗП I_1 згідно з виразом (3) буде значно більше струму на початку зарядки I_{CSil} . Отже, будемо вважати, що для моделі ВВБТРЗП огинаюча епюри цього струму має форму трикутника (див. рис. 3 б). Отже, середній діючий

струм в колі інвертора буде визначатись площею цього трикутника. Завдяки тому, що площа трикутника майже вдвічі менша за площу трапеції для моделі ТРЗП з практично рівними паралельними гранями, то і струм у колі інвертора для схеми ВВБТРЗП буде меншим, ніж у схемі ТРЗП. Цей висновок підтверджено результатами імітаційного моделювання.

Отримані залежності струмів у колах інверторів від параметрів резонансних кіл довели, що застосування безтрансформаторної схеми для забезпечення однакової потужності ЗП ЄНЕ дасть змогу майже удвічі знизити номінальні та максимально допустимі струмові характеристики силових елементів перетворювачів. Це зумовлено майже лінійною залежністю зростання діючого значення струму в резонансному колі від часу зарядки ЄНЕ. Таким чином, використання безтрансформаторної схеми майже удвічі знизить номінальні та максимально допустимі струмові характеристики силових елементів перетворювачів у резонансних зарядних пристроях однакової потужності.

Висновки. Проведені дослідження та порівняння струмів у колах інверторів безтрансформаторних резонансних та трансформаторних резонансних і нерезонансних систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу дало змогу визначити тип системи, що характеризується найменшим середнім діючим струмом ключів інвертора. Отримані залежності струмів у колах інверторів від параметрів резонансних кіл та результати розрахунків за ними дають підставу стверджувати, що застосування безтрансформаторної схеми для забезпечення однакової потужності систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу майже вдвічі знизять середній діючий струм у колі інвертора. Теоретичні результати підтверджено результатами імітаційного моделювання. Використання високовольтних безтрансформаторних резонансних систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу майже вдвічі знизять номінальні та максимально допустимі струмові характеристики силових елементів перетворювачів.

Роботу виконано за Проектом № 2022.01/0211 "Розробка мобільної системи формування напруги зі змінними параметрами для моніторингу безпеки і надійності високовольтного електрообладнання енергетичних об'єктів критичної інфраструктури України", який фінансується Національним фондом досліджень України.

1. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. 2018. Харків: Індустрія, 320 с.
2. Boguslavsky L.Z., Sinchuk A.V., Nazarova N.S., Adamchuk Y.O., Chuschak S.V. Creation of nanostructural carbide coatings on material surfaces using products of refractory wire electroexplosion. *Journal of Physical Studies*. 2020. Vol. 24. No.3. Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.24.3501>
3. Malyushevskaya A., Koszelnik P., Yushchishina A., Mitryasova O., Mats A., Gruca-Rokosz R. Eco-friendly principles on the extraction of humic acids intensification from biosubstrates. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24. No.2. Pp. 317–327. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/156867>
4. Вовченко А.И., Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 5. С. 69–74.
5. Vinnychenko D., Nazarova N., Vinnychenko I. Transformerless high-voltage resonant charging systems for capacitive energy storage devices for electro-discharge technologies. *Proc. of IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2022)*. 2022. Pp. 727–731. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927052>
6. Супруновская Н., Щерба А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 3–11.
7. Милях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. 1974. К.: Наукова Думка. 216 с.
8. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. 1982. Киев: Наукова думка. 422 с.
9. Vinnychenko D.V., Nazarova N.S., Vinnychenko I.L. Research of characteristics of high voltage transformerless resonant charger of capacitary storage device. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No. 2. Pp. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.021>
10. Pavlov G., Vinnichenko I., Pokrovskiy M. Research of the interrelationship between the frequency converter on the basis of the resonant inverter with nonlinear control power unit parameters and its load. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2017. Pp. 554–559. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100300>

CHARACTERISTICS OF RESONANT SYSTEMS FOR OBTAINING HIGH VOLTAGE ON A CAPACITIVE LOAD**D.V. Vinnychenko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteisky ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,
e-mail: vdvvs@gmail.com

The work is devoted to the comparative analysis of currents in inverter circuits of transformerless resonant and transformer resonant and non-resonant systems of the same power for obtaining high voltage on a capacitive load. The purpose of the work is to determine the type of system characterized by the smallest average operating current of the inverter switches. The dependence of the currents in the circuits of the inverters on the parameters of the resonant circuits was obtained, the results of calculations according to which allow us to state that the use of a transformerless circuit to ensure the same power of systems for obtaining high voltage on a capacitive type load will allow to almost halve the average operating current in the inverter circuit. Simulation modeling of the processes in the studied schemes was carried out, which confirms the obtained theoretical results. The use of high-voltage transformerless resonant systems to obtain high voltage on a capacitive load will allow to halve the nominal and maximum permissible current characteristics of the power elements of the converters. Ref. 10, fig. 3.

Key words: electrotechnical system, alternating current, inductive-capacitive circuit, series resonance, transformerless charger, resonant circuit Q factor.

1. Rules for the technical operation of consumers' electrical installations. 2018. Kharkiv: Industry, 320 p. (Ukr)
2. Boguslavsky L.Z., Sinchuk A.V., Nazarova N.S., Adamchuk Y.O., Chuschak S.V. Creation of nanostructural carbide coatings on material surfaces using products of refractory wire electroexplosion. *Journal of Physical Studies*. 2020. Vol. 24. No. 3. Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.24.3501>
3. Malyushevskaya A., Koszelnik P., Yushchishina A., Mitryasova O., Mats A., Gruca-Rokosz R. Eco-friendly principles on the extraction of humic acids intensification from biosubstrates. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24. No. 2. Pp. 317–327. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/156867>
4. Vovchenko A.I., Boguslavsky L.Z., Miroshnichenko L.N. Trends in the development of powerful high-voltage pulsed current generators at the Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No. 5. Pp. 69–74. (Rus)
5. Vinnychenko D., Nazarova N., Vinnychenko I. Transformerless high-voltage resonant charging systems for capacitive energy storage devices for electro-discharge technologies. *Proc. of IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2022)*. 2022. Pp. 727–731. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927052>
6. Suprunovskaya N., Shcherba A. Processes of redistribution of electrical energy between parallel-connected capacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No. 4. Pp. 3–11 (Rus)
7. Milyakh A.N., Volkov I.V. Constant current systems based on inductive-capacitive converters. 1974. K.: Naukova Dumka. 216 p. (Rus)
8. Pentegov I.V. Fundamentals of the theory of charging circuits of capacitive energy storage devices. 1982. Kyiv: Naukova Dumka. 422 p. (Rus)
9. Vinnychenko D.V., Nazarova N.S, Vinnychenko I.L. Research of characteristics of high voltage transformerless resonant charger of capacitary storage device. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No. 2. Pp. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.021>
10. Pavlov G., Vinnichenko I., Pokrovskiy M. Research of the interrelationship between the frequency converter on the basis of the resonant inverter with nonlinear control power unit parameters and its load. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2017. Pp. 554–559. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100300>

Надійшла: 17.06.2024
Прийнята: 23.08.2024

Submitted: 17.06.2024
Accepted: 23.08.2024