

ВПЛИВ ВЕЛИЧИНИ ЄМНОСТІ ПОСЛІДОВНОГО РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРУ НА ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ РЕЗОНАНСНОГО ТИПУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

Н.І. Супруновська*, докт. техн. наук, **Д.В. Вінниченко****, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: iednat1@gmail.com; vdvvs@gmail.com.

Досліджено процеси заряду ємнісного накопичувача електроенергії (ЄНЕ), яким може бути електроізоляція високовольтного устаткування (силових кабелів, турбогенераторів та інших крупних електричних машин) під час проведення поточного моніторингу її технічного стану на основі дослідження зміння в ній величини струму витоку після підведення підвищеної напруги. Для формування такої напруги у роботі використовується безтрансформаторна електротехнічна система (ЕТС), що використовує послідовний резонансний індуктивно-ємнісний контур (ІСК) високої добротності, в якому протікають високочастотні синусоїдальні струми. Отримано аналітичні вирази для усталеної напруги на клеммах такого ЄНЕ і перехідних струмів в колах його заряду. З використанням програмного пакету LTSpice виконано імітаційне моделювання перехідних процесів у колах ЕТС під час заряджання ЄНЕ. Показано, що залежності вихідної напруги та струмів у електричних колах ЕТС від часу, отримані за аналітичними виразами, практично збігаються з результатами імітаційного моделювання. Досліджено вплив співвідношення ємностей навантаження та ІСК на тривалість заряду ємності навантаження і відповідно на потужність ЕТС. Виявлено, що задля збільшення потужності високовольтних безтрансформаторних ЕТС такого резонансного типу необхідно збільшувати відношення ємності ЄНЕ до ємності ІСК резонансного кола ЕТС. Такий підхід може застосовуватися під час використання ЕТС з резонансними ІСК для створення потужних електророзрядних установок (ЕРУ) задля реалізації технологій отримання електроіскрових мікро- і нанопорошків з унікальними експлуатаційними властивостями. Під час створення потужних ЕРУ пропонується використовувати величину вказаного співвідношення не менше 10. Бібл. 31, рис. 5.

Ключові слова: електротехнічна система, синусоїдний струм, індуктивно-ємнісний контур, послідовний резонанс, добротність, відношення ємностей.

Підвищення безпеки та надійності високовольтного електрообладнання (зокрема, силових кабельних ЛЕП, турбогенераторів та інших крупних електричних машин) в енергооб'єктах сучасної критичної інфраструктури України вимагає удосконалення поточного моніторингу електроізоляції такого обладнання для оперативного визначення доцільності й умов його подальшого використання. Вказаний моніторинг можливо проводити шляхом вимірювання в ізоляції вказаного обладнання змінень величини струмів витоку під час підведення до неї підвищеної напруги. Згідно з Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів електроенергії випробування електричної міцності ізоляції високовольтних силових кабелів до 35 кВ на струми витоку проводиться випрямленою напругою до 70 кВ. Для проведення такого типу випробувань з використанням мережевої синусоїдної напруги 220/380 В її необхідно підвищити в десятки разів і випрямити, а потім заряджати ємність електроізоляції кабелів напругою до 70 кВ та спостерігати за змінням величини струмів витоку.

Питома ємність сучасних силових кабелів зі зшитого поліетиленовою (ЗПЕ) ізоляцією становить близько 330 пФ/м. За довжини кабелю до 20 км його повна ємність складатиме до 6,6 мкФ. До-

© Супруновська Н.І., Вінниченко Д.В., 2024
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0001-7499-9142>; ** <https://orcid.org/0000-0002-8894-860X>
© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

слідження перехідних процесів заряду ізоляції силових кабелів до необхідної підвищеної напруги та визначення змінень величини струмів витoku через таку ізоляцію є подібними до аналізу перехідних процесів заряду і подальшого розряду ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ), який є навантаженням зарядного пристрою (ЗП) технологічних електророзрядних установок (ЕРУ) різного типу [1–4].

Задля підвищення напруги в десятки разів у силових і вимірювальних електричних колах ЕРУ зазвичай використовують ЗП з високовольними трансформаторами промислової частоти, від яких заряджають ЄНЕ [5–9]. Основні недоліки ЗП такого типу визначаються досить великими масо-габаритними показниками ЕРУ та необхідністю використовувати в них додаткові засоби для обмеження випадкових надвеликих імпульсних струмів у навантаженні, які можуть призводити до появи недопустимих аварійних режимів. Задля зменшення вказаних недоліків у зарядні контури ЄНЕ вводять додаткові ланки підвищеної частоти [6], а в батареї ЄНЕ інтегрують пристрої для вирівнювання розподілу електричної енергії між паралельно з'єднаними конденсаторами [7, 8]. Задля підвищення компактності та динамічних характеристик ЕРУ в їхніх ЄНЕ використовують суперконденсатори (СК) [9], ємність яких зростає з підвищенням напруги на вихідних клеммах СК, збільшуючи, порівняно з використанням звичайних лінійних конденсаторів, швидкість накопичення в ЄНЕ електроенергії та передачу її до навантаження.

На даний час вказані підходи забезпечили створення потужних високовольних ЕРУ, здатних реалізовувати новітні електрогідравлічні технології [10] та енергетично і технологічно ефективні електророзрядні установки задля отримання мікро- та наноструктурних іскроерозійних порошоків з унікальними експлуатаційними властивостями [11]. Проте проблема швидкого (бажано параметричного) обмеження надвеликих струмів у навантаженні за швидких і тривалих зменшеннях його електричного опору залишалася, що обмежувало електротехнологічну ефективність існуючих як високовольних, так і низьковольних ЕРУ [10, 11]. Зважаючи на те, що у разі використання підвищувальних трансформаторів в електричних схемах ЕРУ після попереднього коливального розряду ЄНЕ на навантаження він може бути зарядженим до протилежного знаку і наступний його заряд буде до підвищеної напруги і т. інш., проблема обмеження струмів в колах заряду і розряду ЄНЕ може суттєво ускладнюватися. У більшості випадків її вирішують шляхом суттєвих удосконалень електричних схем ЕРУ [8, 11] та введенням до схем ЕРУ додаткових струмообмежувальних елементів (зокрема активних, як в [2, 10]), які значно погіршують питомі енергетичні показники та загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) установок у разі їхнього промислового використання.

У роботі [12] автори запропонували використовувати послідовний резонансний індуктивно-ємнісний контур (ІЕК) для перетворення джерел незмінної синусоїдальної напруги промислової частоти 50 Гц в джерело синусоїдного струму, амплітудне та ефективне значення якого практично не залежать від величини електричного опору навантаження. Включення таких ІЕК в схеми ЗП ЕРУ забезпечує реалізацію параметричної стабілізації струму у навантаженні у разі виникнення як короткочасних, так і тривалих коротких замикань його електричного опору, вирішуючи таким чином проблему параметричного обмеження надвеликих струмів у навантаженні під час швидких короткочасних і тривалих зменшеннях його електричного опору. В роботі [13] розвинуто принципи побудови та оптимізації електричних схем індуктивно-ємнісних перетворювачів джерел синусоїдальної напруги частотою 50 Гц в джерело незмінного струму, а в [14] виконано оптимізацію таких перетворювачів з мостовим однофазним випрямлячем, ємнісним фільтром і активним навантаженням за питомими потужностями електромагнітних елементів через виникнення в їхніх ІЕК резонансних струмів частотою 50 Гц.

При цьому в [12–14] було показано, що найвищий коефіцієнт корисної дії (ККД) мають ІЕК, в яких величина вихідної напруги є близькою до вхідної. У разі збільшення вихідного опору і, відповідно, вихідної напруги ІЕК його ККД зменшується до нуля за нескінченного вихідного опору, що є неробочим режимом ІЕК. Тому для одночасного отримання високого ККД і заряду ЄНЕ до високих напруг рекомендовано використовувати підвищувальний трансформатор. Саме такий підхід реалізовано в роботі [15], в якій крім цього використовувався змінний струм на частоті в декілька разів вищій від 50 Гц, що дало можливість покращити масо-габаритні показники ЗП для електроживлення лазерів. Аналогічний підхід використано і в працях [16, 17] під час виготовлення джерел живлення лазерів і фотоелектричних систем середньої потужності.

Проте в даний воєнний час дуже важливим є вирішення проблеми мобільної діагностики технічного стану високовольної електроізоляції таких важливих енергооб'єктів, як кабельні лінії електропередачі напругою до 35 кВ [18, 19], турбогенератори АЕС [20] та інші потужні електромашини [21]. Діагностику ізоляції таких енергооб'єктів можливо здійснювати на основі контролю величини струмів

витоку за підвищеної напруги та вимірювання рівня часткових розрядів (ЧР) за підвищеної напруги та сталій її частоті або за підвищеної частоти та сталій величині напруги. Важливо розробляти і створювати саме мобільні та автономні ЕТС з малими масо-габаритними показниками та високою регульованою добротністю ІЕК, які здатні здійснювати діагностику електроізоляції безпосередньо на енергооб'єктах та мати високу стійкість до кричних процесів, виникаючих через електропробої ізоляції. ЕТС для діагностики високовольтної ізоляції турбогенераторів АЕС та інших електромашин можуть мати потужність від 10 до 200 Вт, причому тривалість процесу вимірювання струмів витоку в одній зоні ізоляції не перевищуватиме 1 хв., що суттєво зменшує вимоги до ККД і втрат електроенергії.

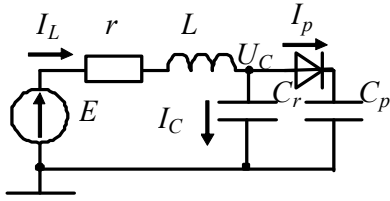
Під час діагностики ізоляції кабелів потужність ЕТС буде залежати від загальної ємності кабелів, яка є пропорційною їхній довжині. Кабелі довжиною 20 м будуть мати ємність до 6,6 нФ і для реалізації необхідного резонансу напруг у послідовному ІЕК необхідно в тисячі разів підвищити частоту напруги його електроживлення, оскільки збільшити в таке число разів індуктивність його дроселя практично неможливо. Тому у роботі [22] розроблено наукову концепцію створення високовольтних ЕТС резонансного типу на основі реалізації в них послідовних високодобротних ІЕК і високочастотних (ВЧ) резонансних струмів, здатних викликати багатократне підвищення змінної напруги на реактивних елементах ІЕК та на навантаженні, підключеному паралельно до одного з них. Така концепція забезпечує значне зменшення імпульсної енергії ЕТС без змінення їхньої середньої потужності та збільшення швидкодії керування і параметричної стабілізації режимів навантаження навіть за швидкого зменшення його електричного опору майже до нуля, яке виникає через електропробу ізоляції. Вибір частоти резонансного підвищення напруги до 40–70 кВ на виході ЕТС резонансного типу, ІЕК яких мають добротності більше 250, не є аварійним режимом, оскільки такі ЕТС спрямовані на вимірювання струмів витоку величиною близько 0,2 мА із високовольтної ізоляції силових кабелів, турбогенераторів та інших крупних електричних машин. Потужність цих ЕТС зазвичай не перевищує 20 Вт у разі виникнення на виході ЕТС як короткого замикання, так і розриву, причому робочий режим ЕТС та ІЕК по суті є дуже близьким до так званого холостого режиму або розриву вихідного кола ЕТС. Саме для того, щоб такий режим не став аварійним, а був контрольованим робочим режимом, запропонована концепція передбачає використання регулювання частоти струму в ІЕК для реалізації максимальних значень його добротності та вихідної напруги. Цим концепція, запропонована в [22], відрізняється від концепції, представленої у [12–15], яка базується на реалізації достатньо потужних ЕТС, які стабілізують досить великі низькочастотні синусоїдальні струми у навантаженні.

За концепцією, представленою в роботі [22], в ІЕК формуються резонансні струми частотою до 50 кГц. Такий ІЕК має добротність $Q_{\text{ІЕК}} = 260$, для чого в ньому використовуються керамічні конденсатори (ємністю до 3,5 нФ і добротністю більше 1000) та котушки (індуктивністю 25 мГн та добротністю $Q_L = 270$, виготовлені з багатожильних ізольованих і скручених між собою мідних проводів типу "літцендрат"). В ІЕК можна формувати регульовану вихідну напругу до 90 кВ, проте задля забезпечення надійної стабілізації струму регулюванням його частоти бажано формувати вихідну напругу, меншу від 75 кВ [22]. При цьому втрати електроенергії будуть зменшуватися пропорційно збільшенню величини добротності $Q_{\text{ІЕК}}$, а використання частоти струму до 50 кГц забезпечує зменшення масо-габаритних параметрів ІЕК та ЕТС та створення їхніх мобільних і автономних зразків.

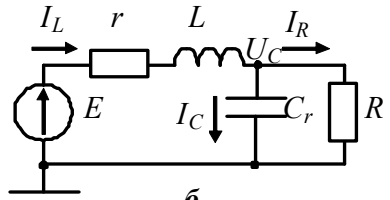
Такого типу ЕТС з високочастотними ІЕК є ефективними для моніторингу струмів витоку та часткових розрядів у високовольтній ізоляції силових кабелів напругою до 35 кВ [23, 24] довжиною в десятки метрів. Ці ЕТС призначені для діагностики розвитку каналів водяних триїнгів у високовольтній ЗПЕ ізоляції [24, 25] та збільшення розмірів порожнин і газових включень [26] як в ЗПЕ ізоляції високовольтних кабелів, так і самоутримних ізольованих проводів (СІП) [27]. ЕТС вказаного типу може ефективно використовуватися також для діагностики електроізоляції поточного стану джерел електроживлення індукційних каналних печей виготовлення мідної катанки [28].

Проте за суттєвого збільшення довжини високовольтних кабелів, скажімо до сотень метрів, та у разі використання ЕТС з ІЕК задля створення безтрансформаторних ЗП ЄНЕ високотехнологічних ЕРУ [1–4] потужність ІЕК треба суттєво збільшувати, що вимагає окремих досліджень взаємного впливу параметрів ІЕК та ЄНЕ на вказане збільшення потужності безтрансформаторних ЕТС.

Оскільки дослідження процесів заряду ізоляції силових кабелів і визначення струмів витoku через неї є подібними до аналізу процесів заряду і розряду ЄНЕ, який використовується в різного типу технологічних ЕРУ, **метою даної роботи** був аналіз особливостей і закономірностей перетворення параметрів електромагнітної енергії в ІСК під час підвищення потужності заряду ЄНЕ.

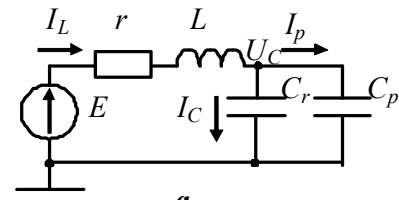


а

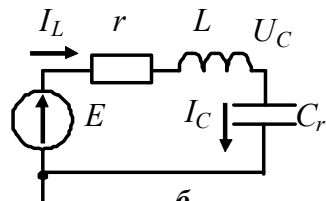


б

Рис. 1



а



б

Рис. 2

На рис. 1, а наведено схему ЕТС з ІСК, навантаженням якої є конденсатор ємністю C_p , який виконує функції ЄНЕ. Індуктивність L і ємність C_r утворюють в ЕТС резонансний ІСК.

На рис. 1, б наведено схему ЕТС, в якій напругу на послідовно з'єднаних випрямлячі та ємнісному накопичувачі C_p промодельовано активним змінним опором R [7, 8, 29, 30]. Для цієї схеми досліджено вплив паразитних параметрів резонансного кола (опору r) на характеристики ІСК ЕТС. Проведені дослідження показали, що її вихідні характеристики залежать від паразитних параметрів резонансного кола, які визначають його добротність Q . Отримані залежності вихідних напруги та струму від опору навантаження R та добротності резонансного кола Q обґрунтували, що у разі наближення вихідних характеристик ІСК до характеристик джерела стабілізованого струму бажано збільшувати добротність ІСК, що можна здійснити зменшенням величини його активного опору r .

Аналіз усталених процесів в схемі на рис. 1, а виконано для 2 випадків: з відкритим і закритим діодом. Зробимо припущення, що вольт-амперна характеристика діода є ламаною лінією з горизонтальним відрізком для його закритого стану (тобто коли його електричний опір можна вважати нескінченним) і вертикальним відрізком для його відкритого стану (коли електричний опір діода можна вважати рівним нулю). Для таких відрізків апроксимованої вольт-амперної характеристики будуть вірними лінійні диференціальні рівняння з постійними коефіцієнтами. Розв'язки рівнянь для кожного відрізка будуть мати постійні інтегрування, які можна знайти методом припасування величин в моменти переходу на черговий відрізок характеристики за допомогою законів комутації, тобто за умов безперервності струмів в індуктивності та напруг на ємностях.

Схему для моделювання перехідних процесів у дисипативній резонансній системі заряджання ємнісного накопичувача C_p наведено на рис. 1, а.

На рис. 2, а наведено схему для відкритого стану діода, а на рис. 2, б – для закритого.

Для проведення аналізу процесів в цій схемі використовувалася умова резонансу в резонансному колі (див. рис. 1) і вводилося визначення відносного опору навантаження k та добротності резонансного кола Q для випадку резонансної частоти, тобто у разі виконання умови резонансу (за умови $E = E_{\max} \sin \omega t$)

$$\omega L = \frac{1}{\omega C_r}; \quad (1) \quad k = \frac{R}{\omega L} = \omega C_r R; \quad (2)$$

$$Q = \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{r \omega C_r}. \quad (3)$$

Позначимо струм в індуктивності L у випадку КЗ конденсатора резонансного кола C_r як I_{SC} . З урахуванням того, що $r \ll \omega L$ можна записати, що

$$I_{SC} = \frac{E}{\omega L} = E \omega C_r. \quad (4)$$

Проведено аналіз усталених струмів та напруг в схемі з відкритим діодом, показаний на рис. 2, а

$$I_L \cdot \left(r + j\omega L + \frac{1}{j\omega(C_r + C_p)} \right) = E; \quad (5)$$

$$U_c = I_L \cdot \frac{1}{j\omega(C_r + C_p)}; \quad (6)$$

$$I_p = U_c \cdot j\omega C_p. \quad (7)$$

Після перетворень вирази мають наступний вигляд:

$$I_L = \frac{E \cdot j\omega(C_r + C_p)}{(r + j\omega L) \cdot j\omega(C_r + C_p) + 1}; \quad (8) \quad I_L = \frac{E \cdot \omega C_r \left(1 + \frac{C_p}{C_r}\right)}{\omega L \omega C_r \left(\frac{r}{\omega L} + j\right) \cdot \left(1 + \frac{C_p}{C_r}\right) + 1}. \quad (9)$$

Введемо коефіцієнт

$$k_{Cp} = C_r / C_p. \quad (10)$$

З виразу (9) та урахуванням (1) і (10) можна записати

$$I_L = \frac{E \cdot j\omega C_r (1 + k_{Cp}^{-1})}{j((Q^{-1} + j) \cdot (1 + k_{Cp}^{-1}) - j)}; \quad (11)$$

З урахуванням (3) та (4) отримано

$$I_L = \frac{I_{SC} (1 + k_{Cp}^{-1})}{(Q^{-1} + j) \cdot (1 + k_{Cp}^{-1}) - j}; \quad (12)$$

$$I_L = \frac{I_{SC} \cdot k_{Cp}^{-1} \cdot (k_{Cp} + 1)}{k_{Cp}^{-1} \cdot ((Q^{-1} + j) \cdot (k_{Cp} + 1) - j k_{Cp})}; \quad (13)$$

$$I_L = \frac{I_{SC} \cdot (k_{Cp} + 1)}{Q^{-1} + j + Q^{-1} k_{Cp} + j k_{Cp} - j k_{Cp}}; \quad (14)$$

$$I_L = \frac{I_{SC} \cdot (k_{Cp} + 1)}{Q^{-1} (k_{Cp} + 1) + j}; \quad (15)$$

$$U_c = \frac{E \cdot j\omega(C_r + C_p)}{(r + j\omega L) \cdot j\omega(C_r + C_p) + 1} \cdot \frac{1}{j\omega(C_r + C_p)}; \quad (16)$$

$$U_c = \frac{E}{(r + j\omega L) \cdot j\omega(C_r + C_p) + 1}; \quad (17)$$

$$U_c = \frac{E}{j\omega L \omega C_r \left(\frac{r}{\omega L} + j\right) \cdot \left(1 + \frac{C_p}{C_r}\right) + 1}. \quad (18)$$

З урахуванням (10), (1), (3) з виразу (18) випливає

$$U_c = \frac{-jE \cdot k_{Cp}}{Q^{-1} (k_{Cp} + 1) + j}; \quad (19) \quad U_c = \frac{E \cdot k_{Cp} \cdot \exp\left(-j \left(\arctg\left(\frac{Q}{k_{Cp} + 1}\right) + 90^\circ\right)\right)}{\sqrt{\left(\frac{k_{Cp} + 1}{Q}\right)^2 + 1}}. \quad (20)$$

Вираз для модуля комплексу напруги на ЄНЕ та конденсаторі резонансного кола

$$|U_c| = \frac{E \cdot k_{Cp}}{\sqrt{\left(\frac{k_{Cp} + 1}{Q}\right)^2 + 1}}. \quad (21)$$

З (20) випливає, що за відкритого діода (рис. 2, а) та резонансної частоти згідно (1) в усталеному режимі напруга на ЄНЕ менша за вхідну напругу E за умови, що $k_{Cp} < 1$.

Чим більше k_{Cp} , тим більше власна частота коливань в колі на рис. 2, а $f = \left(2\pi \sqrt{LC_r \left(1 + \frac{1}{k_{Cp}}\right)}\right)^{-1}$ буде наближатися до резонансної частоти $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_r}}$, в результаті чого напруга на конденсаторі перевищуватиме напругу E .

Для струму у ЄНЕ маємо вираз

$$I_p = U_c j \omega C_p = \frac{-jE \cdot k_{Cp} j \omega C_p}{Q^{-1}(k_{Cp} + 1) + j}. \quad (22)$$

З (10), (4) та (22) отримано

$$I_p = \frac{I_{SC}}{Q^{-1} \cdot (k_{Cp} + 1) + j}; \quad (23) \quad I_p = \frac{I_{SC} \cdot \exp\left(-j \cdot \arctg\left(\frac{Q}{k_{Cp} + 1}\right)\right)}{\sqrt{\left(\frac{k_{Cp} + 1}{Q}\right)^2 + 1}}. \quad (24)$$

Вираз для модуля комплексу струму в ЄНЕ

$$|I_p| = \frac{I_{SC}}{\sqrt{\left(\frac{k_{Cp} + 1}{Q}\right)^2 + 1}}. \quad (25)$$

З (25) випливає, що усталений зарядний струм ЄНЕ I_p стає тим більшим, чим більшою є добротність резонансного кола Q та меншим відношення ємності резонансного кола до ємності ЄНЕ k_{Cp} . Якщо $k_{Cp} \leq 0,1$, то його значення практично не впливає на зарядний струм I_p , а вираз (25) перетворюється на вираз $|I_p| = \frac{I_{SC}}{\sqrt{Q^{-2} + 1}}$. Тобто в цьому випадку усталений зарядний струм ЄНЕ не залежить від

реактивного опору ЄНЕ, тобто є однаковим незалежно від навантаження.

Вираз для струму I_C у конденсаторі резонансного кола

$$I_C = U_c j \omega C_p = \frac{-jE \cdot k_{Cp} j \omega C_r}{Q^{-1}(k_{Cp} + 1) + j}. \quad (26)$$

З виразів (4), (10) та (26) отримано

$$I_C = \frac{I_{SC} k_{Cp}}{Q^{-1} \cdot (k_{Cp} + 1) + j}. \quad (27)$$

Вираз для модуля комплексу струму у конденсаторі резонансного кола

$$|I_C| = \frac{I_{SC} k_{Cp}}{\sqrt{\left(\frac{k_{Cp} + 1}{Q}\right)^2 + 1}}. \quad (28)$$

З порівняння виразів (23) та (27) випливає, що $I_C = I_p k_{Cp}$, а враховуючи, що $I_p + I_C = I_L$, вирази для струму в індуктивності резонансного кола I_L і в ЄНЕ I_p є такими

$$I_L = I_p \cdot (1 + k_{Cp}), \quad I_p = I_L / (1 + k_{Cp}). \quad (29)$$

З цих виразів випливає, що за відкритого діода в схемі на рис.1, а струм в ЄНЕ визначається тільки струмом в нерозгалуженій частині схеми I_L та відношенням ємностей ЄНЕ і резонансного конденсатора C_r , причому чим меншим буде коефіцієнт k_{Cp} (10), тим більшою буде та доля струму індуктивності резонансного кола I_L , яка потече у коло ЄНЕ.

Таким чином, в момент комутації діодного вентиля струм, що протікає через індуктивність резонансного кола, розподіляється між конденсатором резонансного кола та ЄНЕ. Чим менше відношення їхніх ємностей, тим ближче зарядний струм ЄНЕ за величиною до струму короткого замикання резонансного кола й тим меншим є тривалість його заряджання до заданої напруги.

Також було проведено аналіз усталених струмів та напруг для режиму з закритим вентилям (див. рис. 2, б)

$$I_L \cdot \left(r + j \omega L + \frac{1}{j \omega C_r}\right) = E; \quad (30) \quad U_c = I_L \cdot \frac{1}{j \omega C_r}. \quad (31)$$

Після перетворень отримано

$$I_L = \frac{E \cdot j\omega C_r}{(r + j\omega L) \cdot j\omega C_r + 1}; \quad (32)$$

$$I_L = \frac{E \cdot j\omega C_r}{j\omega L \cdot \left(\left(\frac{r}{j\omega L} + 1 \right) \cdot j\omega C_r + \frac{1}{j\omega L} \right)}; \quad (33)$$

$$I_L = \frac{E \cdot j\omega C_r}{j\omega L \cdot j\omega C_r \cdot \left(-j \frac{r}{\omega L} + 1 + \frac{1}{j\omega L \cdot j\omega C_r} \right)}. \quad (34)$$

З урахуванням виразів (1), (3) та (4) маємо

$$I_L = \frac{I_{SC}}{j \cdot (-jQ^{-1} + 1 - 1)} = I_{SC} Q. \quad (35)$$

З виразу (35) видно, що струм через індуктивність у Q разів перевищує струм I_{SC} з виразу (4). З виразів (31) та (10) та з урахуванням виразу (1) запишемо

$$U_C = \frac{I_{SC}}{j\omega C_r \cdot Q^{-1}} = \frac{E \cdot Q}{j\omega C_r \cdot \omega L} = -jE \cdot Q. \quad (36)$$

Модуль комплексу напруги розраховувався як

$$|U_C| = E \cdot Q. \quad (37)$$

Слід відзначити, що за $k_{Cp} \gg Q$ вираз (37) збігається з виразом (24) [30]. Тобто, усталену напругу дійсно можна обчислювати, використовуючи в схемі заряджання ЄНЕ (рис. 1, а) замість конденсатора активний опір (рис. 1, б).

Було проведено аналіз перехідних процесів у резонансній ЕТС заряджання ЄНЕ.

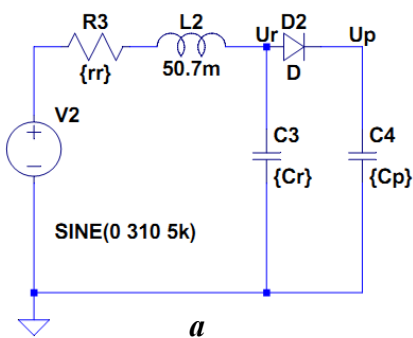
Для схеми на рис. 2, б аналітичне рішення за умови (1) є відомим [31]. Вираз для напруги на конденсаторі u_{Cr} можна отримати у результаті додавання рівнянь для вимушеного та вільного коливань ($E = E_m \cos(\omega t)$) та $-U_{Cm} e^{-\delta t} \cos(\omega t)$, де U_{Cm} можна визначити з виразу (37)

$$C_r = U_{Cm} \cdot (1 - e^{-\delta t}) \cos(\omega t), \quad (38)$$

де $\delta = r/2L$; ω – резонансна частота, що задовольняє вираз (1).

Але для однопівперіодної безтрансформаторної ЕТС, приведеної на рис. 1, а, аналітичне рішення є відсутнім, тому епюри струмів і напруг у даній роботі отримувалися імітаційним моделюванням, результати якого представлено на рис. 3.

У разі імітаційного моделювання використовувалися частоти струму від 10 до 40 кГц.



На рис. 3, а наведено схему однопівперіодного безтрансформаторного ЕТС для імітаційного моделювання засобами LTSpice. На рис. 3, б наведено результати імітаційного моделювання, а саме епюри напруги на резонансному конденсаторі $V(ur)$, напруги на ЄНЕ $V(up)$, струму в індуктивності резонансного кола $I(L2)$ та струму в ЄНЕ $I(C4)$.

Аналіз епюр напруги (рис. 3, б) показує, що напруга на конденсаторі резонансного кола $V(ur)$ в інтервалі часу від t_1 до

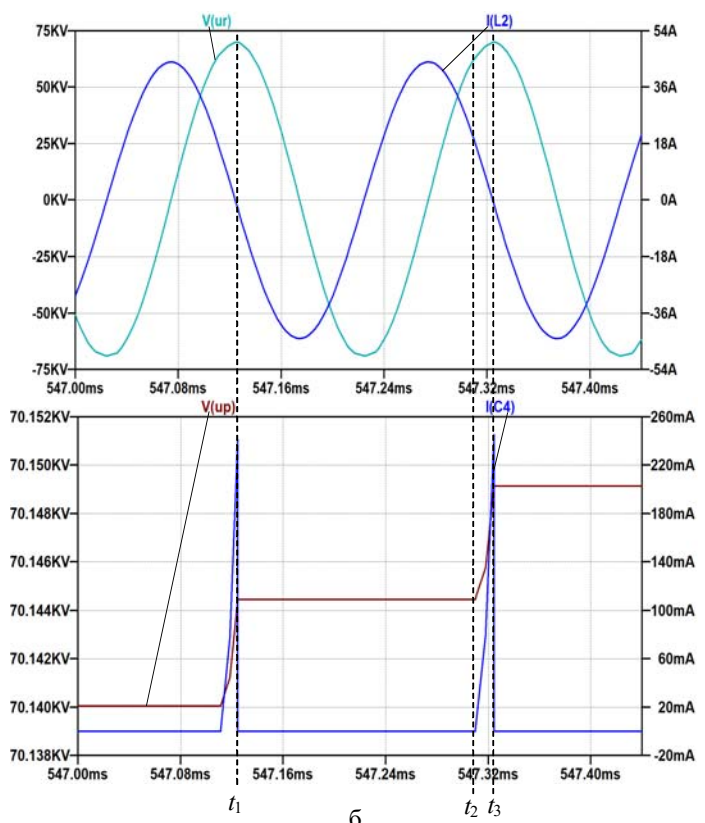


Рис. 3

t_2 зростає у відповідності з виразом (38), тоді як напруга $V(ur)$ на ЄНЕ на цьому інтервалі не збільшується.

В інтервалі часу від t_2 до t_3 здійснюється заряджання ЄНЕ (напруга $V(ur)$ збільшується).

В результаті амплітуда напруги $V(ur)$ на цьому інтервалі часу менша, ніж на попередньому інтервалі (від t_1 до t_2), тобто напруга в резонансному колі зростає повільніше під час заряджання ЄНЕ. Таке явище має місце завдяки тому, що частина енергії видаляється з резонансного кола та йде на заряджання ємності C_p , а частина розгойдує напругу в резонансному колі.

Форма кривої, що огинає епюру $V(ur)$, має експоненційний характер і описується формулою

$$u_{Cp} = U_{Cm} \cdot (1 - e^{-t/\tau}), \quad (39)$$

де τ – постійна часу.

З урахуванням того, що напруга u_{Cp} розраховується з виразу (39), епюра зарядного струму в ЄНЕ також має експоненційну форму

$$i_p = I_{av} \cdot e^{-t/\tau}, \quad (40)$$

де I_{av} – середній струм заряду ЄНЕ.

З виразу (25) за умови $k_{Cp} \leq 0,1$ випливає, що струм в ЄНЕ не залежить від його ємності C_p і є пропорційним струму короткого замикання конденсатора резонансного кола C_r (4). Імітаційне моделювання (див. рис. 3, б) показує, що форма струму $I(C4)$ значно відрізняється від гармонічної, а середній струм на початку заряду I_{av0} можна оцінити з криволінійного трикутника, і він є трохи більшим ніж 0,5 від максимального значення струму трикутної форми (яке можна розрахувати з виразу (4))

$$I_{av0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{E_m}{\omega L} = 0,577 \frac{E_m}{\omega L}. \quad (41)$$

З одного боку, зарядний струм змінюється із збільшенням струму в резонансному колі (ив. рис. 3, б), а з іншого боку, цей струм, як і максимальна напруга заряду ємнісного накопичувача C_p , практично не залежать від його ємності за умови $k_{Cp} \leq 0,1$ (див. (25)), тому з певним наближенням $I_{av} \approx I_{av0}$ і у виразі (40) можна використовувати замість I_{av} початкове значення середнього струму I_{av0} , яке розраховується за формулою (41).

Постійна часу τ може бути визначена графічно як довжина піддотичної в будь-якій точці графіку напруги від часу [31], зокрема як довжина проєкції на вісь часу відрізка дотичної до кривої напруги (якою є похідна напруги), який обмежується з одного боку початковим значенням напруги, а з другого – її максимальним значенням U_{Cm} . Як видно з рис. 3, б, напругу на ЄНЕ $V(ur)$ можна розглядати як лінійну функцію (тобто як пряму) на відрізку від початкового моменту зростання до значення $U_{Cp} = 0,66U_{Cm}$. Тоді її похідну du_{Cp}/dt можна вважати константою на цьому відрізку та записати

$$\frac{du_{Cp}}{dt} = \frac{I_{av}}{C_p}; \quad (42) \quad \tau = U_{Cm} \frac{dt}{du_{Cp}} = U_{Cm} \frac{C_p}{I_{av}}. \quad (43)$$

Слід зазначити, що у разі зменшення добротності резонансного кола (тобто збільшенні активного опору) частота вільних загасаючих коливань стає меншою за резонансну і в колі виникають биття частоти, які супроводжуються періодичним зменшенням амплітуди коливань в колі. Це явище здатне зменшити зарядний струм. Для урахування зміни форми епюри зарядного струму введемо коефіцієнт k_f . Тоді вираз для постійної часу прийме вид

$$\tau = k_f U_{Cm} C_p / I_{av}. \quad (44)$$

Як показав експеримент, для $k_{Cp} = 0,1$ k_f приблизно дорівнює $\sqrt{2}$.

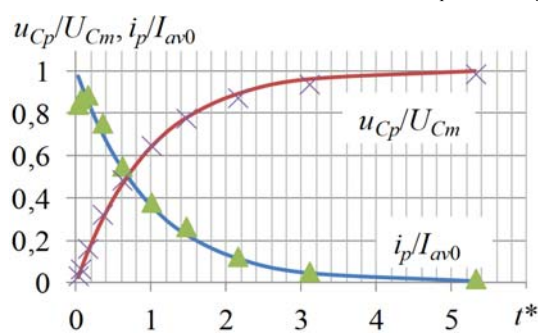


Рис. 4

З визначеними параметрами U_{Cm} (вираз (37)), I_{av} (вираз (41)), τ для $k_{Cp} = 0,1$ (вираз (44)) за виразами (39) та (40) розраховано оригінальні зарядного струму i_p та напруги ЄНЕ u_{Cp} .

На рис. 4 наведено залежності u_{Cp}/U_{Cm} , i_p/I_{av0} від часу $t^* = t/t_{Uc}$, де t – поточний час заряджання, t_{Uc} – час, за який напруга ЄНЕ досягає $U_{Cp} = 0,66U_{Cm}$. Суцільними лініями позначено розраховані залежності, а маркерами – залежності, отримані в результаті імітаційного моделювання.

Розраховані та отримані в результаті імітаційного моделювання експоненційні залежності вхідної напруги та зарядного струму від часу практично збігаються.

Слід зазначити, що за однакового струму короткого замикання, визначеного за виразом (4), час заряду ЄНЕ залежить від k_{Cp} – відношення ємності резонансного кола до ємності ЄНЕ. Це випливає з результатів аналізу виразів (15), (25) та (29). Під час комутації (відкритті) діодного вентиля струм індуктивного дроселя резонансного кола розподіляється на підтримку електричної енергії, що циркулює в резонансному колі, а саме на заряджання конденсатора C_r , та безпосередньо на заряджання конденсатора C_p . Через те, що струм короткого замикання, визначеного за виразом (4), залежить тільки від параметрів резонансного кола, зарядний струм I_p (див. вираз (29)) буде визначатися тільки значенням k_{Cp} . Чим меншим є k_{Cp} , тим більшим буде зарядний струм та меншим час заряджання.

Для підтвердження цього висновку проведено моделювання процесів в схемі, наведеній на рис. 3, а, для різних значень відношення $C_r/C_p = k_{Cp}$. З постійною ємністю ЄНЕ C_p варіювали ємність конденсатора резонансного кола C_r . Відповідно до виразу (4) за резонансної частоти зарядний струм залежить тільки від напруги живлення та реактивного опору ωL . Тому задля забезпечення однакового зарядного струму відповідно до виразу (1) за різних частот змінювали індуктивність резонансного кола. Час заряджання ЄНЕ для $k_{Cp} = 0,1$ ($C_r = 20$ нФ, $C_p = 200$ нФ) обрали за мінімальний час (t_{\min}). Енергія, що накопичується в ЄНЕ, визначалася як $W = C_p U_C^2 / 2$, а потужність – $P = W/t = C_p U_C^2 / 2t$, де t – час заряджання. Для заданих ємності ЄНЕ, напруги та енергії потужність зарядного пристрою визначається часом заряджання. Потужність безтрансформаторної ЕТС та середній зарядний струм за $k_{Cp} = 0,1$ приймалися максимальними (P_{\max}, I_{\max}).

Задля отримання залежностей характеристик зарядного пристрою від k_{Cp} збільшували ємність C_r , розраховували частоту f та індуктивність резонансного кола L таким чином, щоб забезпечити однаковий струм короткого замикання I_{SC} , визначений за виразом (4).

За результатами імітаційного моделювання визначали час заряджання t до напруги 20 кВ та середній зарядний струм I , потім розраховували відношення t/t_{\min} , I/I_{\max} , P та P/P_{\max} .

Отримані результати наведено на рис. 5. Залежність t/t_{\min} від $C_r/C_p = k_{Cp}$ наведено на рис. 5, а;

залежності I/I_{\max} (епюра 1), P/P_{\max} (епюра 2) та розрахований за виразом (29) відносний зарядний струм I/I_{\max} (епюра 3) – на рис. 5, б.

Аналіз отриманих залежностей показує, що у разі збільшення k_{Cp} час заряджання зростає, наприклад, для $k_{Cp} = 1$ – $t/t_{\min} = 1,7$, а для $k_{Cp} = 8$ – $t/t_{\min} = 6,6$.

Чим більшим є час заряджання, тим меншою є потужність зарядного пристрою. Це зумовлено зменшенням зарядного струму. За однакового струму короткого замикання I_{SC} , визначеного за виразом (4), середній зарядний струм в схемах на рис. 1, а та 1, б за однакових параметрах резонансного кола та вхідної напруги E буде відрізнятись тим більше, чим більшим буде k_{Cp} в порівнянні з величиною 0,1.

Тобто, найбільшу потужність мають високовольтні безтрансформаторні ЕТС, в яких відношення ємності ємнісного накопичувача енергії до ємності резонансного кола є не меншим ніж 10. А для однакових струмів короткого замикання I_{SC} , визначених за виразом (4), зарядний струм та тривалість заряду ЄНЕ визначається величиною k_{Cp} . Чим більшим є величина k_{Cp} , тим меншим є зарядний струм і потужність зарядного

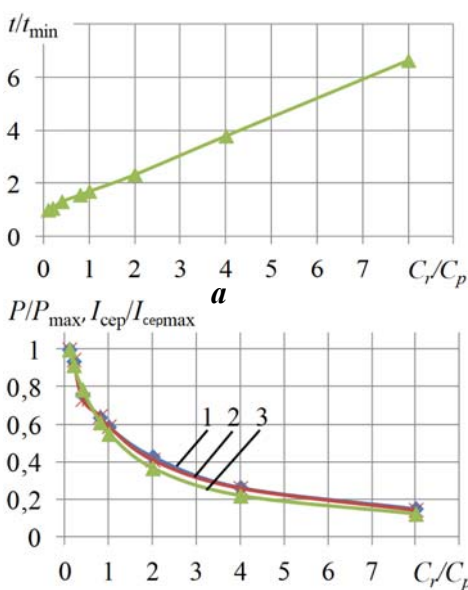


Рис. 5

пристрою або більш тривалим є заряд ЄНЕ до тієї ж напруги.

Висновки. На основі аналізу усталених і перехідних процесів у колах безтрансформаторної електротехнічної системи заряду ЄНЕ, який може використовуватися в ЕРУ та імітувати процеси заряду ізоляції високовольтних силових кабелів, визначено особливості перетворення параметрів електроенергії, які проявляються в тому, що:

1) в момент комутації діодного вентиля такої системи струм, що протікає через індуктивність резонансного кола, розподіляється між ємнісним накопичувачем та конденсатором резонансного кола. При цьому чим більшим є відношення їхніх ємностей, тим більшим є зарядний струм ЄНЕ і біль-

шою потужність резонансного зарядного пристрою, а тривалість заряду ЄНЕ до заданої напруги відповідно зменшується;

2) під час розробки та створення потужних ЕТС зі швидким зарядом їхніх ЄНЕ необхідно реалізувати відношення ємності ЄНЕ до ємності послідовного резонансного ІСК не менше 10;

3) усталений зарядний струм ЄНЕ не залежить від опору навантаження за умови, що відношення ємності ІСК до ємності ЄНЕ $k_{Cp} \leq 0,1$.

Експоненційні залежності вихідної напруги та зарядного струму від часу заряджання високовольтної безтрансформаторної резонансної ЕТС, розраховані за отриманими аналітичними виразами, практично збігаються з результатами імітаційного моделювання.

Дослідження виконано за Проєктом № 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. Фрюнгель Ф. Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов. М.: Энергия, 1965. 488 с.

2. Лившиц А.Л., Отто М.Ш. Импульсная электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1983. 352 с.

3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. М.: Энергия, 1973. 239 с.

4. Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications. Berlin: Springer-Verlag, 2006. Pp. 288–305.

5. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. К.: Наук. думка, 1982. 422 с.

6. Дубовенко К.В. Моделирование зарядных цепей емкостных накопителей энергии со звеном повышенной частоты. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. № 3. С. 58–63.

7. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 3–11.

8. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric energy loss at energy exchange between capacitors as function of their initial voltages and capacitances ratio. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.

9. Білецький О.О., Супруновська Н.І., Щерба А.А. Залежність енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від їхніх початкових і кінцевих напруг. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.003>.

10. 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.

11. Ochin P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y.N., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 738–739. Pp. 451–455. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.451>.

12. Милях А.Н., Кубышин Б.Е., Волков И.В. Индуктивно-емкостные преобразователи источников напряжения в источники тока. К.: Наукова думка, 1964. 304 с.

13. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизации схем индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наукова думка, 1981. 176 с.

14. Спирін В.М., Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Салко С.В., Гребенюк В.Г. Оптимізація індуктивно-емнісного перетворювача з мостовим однофазним випрямлячем, емнісним фільтром та активним навантаженням за питомими потужностями електромагнітних елементів. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 6. С. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.025>.

15. Закревский С.И. Разработка и исследование автономных источников стабилизированного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Дис. ... канд.техн.наук. Институт электродинамики АН УССР. Киев. 1971. 244 с.

16. Kazanivsky M. Lazer power supply based on multiphase resonance converters. Proc. International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 23–27 February 2010. Pp. 115–115.

17. Montes O.A., Son S., Kim S., Seok H., Lee J.S., Kim M. Forward-flyback resonant converter for high-efficient medium-power photovoltaic applications. Proc. Conference of IEEE on Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA, 26–30 March 2017. Pp. 1223–1228. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEC.2017.7930851>.

18. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – An overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2001. Vol. 17. No 1. Pp. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.1109/57.901613>

19. Hartlein R. Diagnostic testing of underground cable systems (cable diagnostic focused initiative). NEETRAC, Atlanta, GA, USA, Tech. Rep. DOE DE-FC02-04CH11237, NEETRAC 04-211/04-212/09-166, 2010.

20. Титко А.И., Васьяковский Ю.Н. Научные основы, методы и средства диагностики асинхронных двигателей. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2015. 300 с.
21. Danikas M.G., Sarathi R. Electrical machine insulation: Traditional insulating material, nanocomposite polymers and the question of electrical trees. *Funktechnikplus J.* 2014. Vol. 1. Issue 5. Pp. 7–32.
22. Щербя А.А., Вінниченко Д.В., Супруновська Н.І. Наукова концепція розробки високовольтних електротехнічних систем резонансного типу з швидкодіючими керуванням і параметричною стабілізацією режимів навантаження. *Технічна електродинаміка.* 2024. № 2. С. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.030>.
23. Eigner A., Rethmeier K. An overview on the current status of partial discharge measurements on AC high voltage cable accessories. *IEEE Electrical Insulation Magazine.* 2016. Vol. 32. No 2. Pp. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2016.7414231>
24. Shcherba M., Shcherba A., Peretyatko Y. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation. Proc. IEEE 7th International Conference on *Energy Smart Systems, (ESS 2020)*, Kyiv, Ukraine, 12–14 May 2020. Pp. 353–356. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293>.
25. Shcherba A., Shcherba M., Peretyatko Y. Electric Field Disturbance Near Water Trees In XLPE Insulation of Power Cables and Self-carrying Insulated Wires at Non-Sinusoidal Voltages and Currents. Proc. Conference IEEE 3rd KhPI Week on *Advanced Technology (KhPI Week 2022)*, Kharkiv, Ukraine, 03–07 October 2022. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916385>.
26. Shahsavarian T., Shahrtash S.M. Modelling of aged cavities for partial discharge in power cable insulation. *IET Sciences, Measurement and Technology.* 2015. Vol. 9. No 6. Pp. 661–670. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2014.0222>.
27. Щербя А.А., Щербя М.А., Перетятко Ю.В. Електрофізичні процеси деградації зшитої поліетиленової ізоляції силових кабелів і самоутримних ізолюваних проводів за несинусоїдних напруг і струмів. *Технічна електродинаміка.* 2023. № 1. С. 3–6. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.003>.
28. Щербя А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Белянин Р.В. Моделирование и контроль длительно протекающих электромагнитных и тепловых процессов в индукционной канальной печи для производства медной катанки. *Технічна електродинаміка.* 2017. № 4. С. 55–64. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.055>.
29. 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)*, Lviv, Ukraine, 10–14 October 2022. Pp. 727–731. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927052>.
30. Вінниченко Д.В., Назарова Н.С., Вінниченко І.Л. Дослідження характеристик високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача. *Технічна електродинаміка.* 2023. № 2. С. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.021>.
31. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М: Энергия, 1975. 752 с.

THE INFLUENCE OF THE CAPACITANCE OF THE SERIES RESONANT CIRCUIT ON THE POWER OF RESONANT-TYPE ELECTRICAL SYSTEMS FOR MONITORING THE INSULATION OF HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT

N.I. Suprunovska, D.V. Vinnychenko

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.**

E-mail: iednat1@gmail.com; vdvvs@gmail.com.

It were analyzed the processes of charging the capacitive electro-technical storage (CES), which can be the electrical insulation of modern high -voltage equipment (in particular power cables) during the current monitoring of its technical condition by the value of leakage currents when applying high voltage to insulation. The transformerless electro-technical system (ETS) of a resonance type, in which resonant inductive-capacitive circuit (ICC) with a high Q -factor carried out a multiple increase in AC voltage, was used to generate such voltage. Analytical expressions were obtained for the steady-state voltage on such CES and transient currents in the ETS circuit its charging. Simulation modeling of transient processes in the circuits of such ETS during CES charging was performed using the LTSpice software package. It is shown that the dependences of the output voltage and current of the ETS on time, obtained by analytical expressions, practically coincide with the results of simulation simulations. The influence of the ratio of the load capacitance and the resonant circuit capacitance on the relative load charging time and, accordingly, on the ETS power was studied. It was found that in order to increase the power of high -voltage transformerless ETS of the specified resonance type, it is necessary to increase the ratio of the CES capacity to the ICC capacity of the resonant circuit of the ETS. This approach can be used when using ETS with resonant ICCs to create powerful electric discharge installations

(EDIs) for the implementation of technologies for obtaining electro-spark micro- and nanopowders with unique operational properties. When creating powerful EDIs, it is suggested to use the value of the above-mentioned ratio at least 10. References 31, figures 5.

Key words: electro-technical system, alternating current, inductive-capacitive circuit, series resonance, resonant circuit Q-factor, ratio of capacitances.

1. Friungel F. Pulse technology. Generation and application of capacitor discharges. Moskva: Energiia, 1965. 488 p. (Rus)
2. Livshits A.L., Otto M.Sh. Pulse electrical engineering. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 352 p. (Rus)
3. Schwab A. Measurements at high voltage. Moskva: Energiia, 1973. 239 p. (Rus)
4. Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications. Berlin: Springer-Verlag, 2006. Pp. 288–305.
5. Pentegov I.V. Fundamentals of the theory of charging circuits of capacitive energy storage. Kyiv: Naukova dumka, 1982. 422 p. (Rus)
6. Dubovenko K.V. Modeling of charging circuits of capacitive energy storage devices with an increased frequency link. *Elektrotehnika ta elektromekhanika*. 2006. No 3. Pp. 58–63. (Rus)
7. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 4. Pp. 3–11. (Rus)
8. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric energy loss at energy exchange between capacitors as function of their initial voltages and capacitances ratio. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.03.009>.
9. Biletsky O.O., Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Dependence of power characteristics of circuit at charge of supercapacitors on their initial and final voltages. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.01.003>. (Ukr)
10. Vovchenko A.I., Boguslavsky L.Z., Miroshnichenko L.N. Trends in the development of high-power high-voltage pulse current generators at the Institute of IPPT of NAS of Ukraine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No 5. Pp. 69–74. (Rus)
11. Ochinn P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y.N., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 738–739. Pp. 451–455. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.451>.
12. Milyakh A.N., Kubyshin B.E., Volkov I.V. Inductive-capacitive converters of voltage sources into current sources. Kyiv: Naukova Dumka, 1964. 304 p. (Rus)
13. Volkov I.V., Gubarevich V.N., Isakov V.N., Kaban V.P. Principles of construction and optimization of schemes of inductive-capacitive converters. Kyiv: Naukova dumka, 1981. 176 p. (Rus)
14. Spirin V.M., Hubarevich V.M., Marunia Y.V., Salko S.V., Grebenyuk V.G. Optimization of inductive-capacitive converter with bridge one-phase rectifier, capacitive filter and parallel active load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 6. Pp. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2019.06.025>. (Ukr)
15. Zakrevsky S.I. Development and research of autonomous sources of stabilized current based on inductive-capacitive converters. diss. ... Candidate of Technical Sciences. Institute of Electrodynamics of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Kiev. 1971. 244 p. (Rus)
16. Kazanivsky M. Lazer power supply based on multiphase resonance converters. Proc. International Conference on *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*. Lviv-Slavske, Ukraine, 23–27 February 2010. Pp. 115–115.
17. Montes O.A., Son S., Kim S., Seok H., Lee J.S., Kim M. Forward-flyback resonant converter for high-efficient medium-power photovoltaic applications. Proc. Conference of IEEE on *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Tampa, FL, USA, 26–30 March 2017. Pp. 1223–1228. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEC.2017.7930851>.
18. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – An overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2001. Vol. 17. No 1. Pp. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.1109/57.901613>.
19. Hartlein R. Diagnostic testing of underground cable systems (cable diagnostic focused initiative). NEETRAC, Atlanta, GA, USA, Tech. Rep. DOE DE-FC02-04CH11237, NEETRAC 04-211/04-212/09-166, 2010.
20. Titko A.I., Vaskovsky Yu.N. Scientific foundations, methods and diagnostic tools for asynchronous motors. Kiev: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2015. 300 p. (Rus)
21. Danikas M.G., Sarathi R. Electrical machine insulation: Traditional insulating material, nanocomposite polymers and the question of electrical trees. *Funktechnikplus J*. 2014. Vol. 1. Issue 5. Pp. 7–32.
22. Shcherba A.A., Vinnychenko D.V., Suprunovska N.I. Scientific concept of the development of high-voltage electrical systems of the resonant type with fast-acting control and parametric stabilization of load modes. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 2. Pp. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2024.02.030>. (Ukr)

23. Eigner A., Rethmeier K. An overview on the current status of partial discharge measurements on AC high voltage cable accessories. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2016. Vol. 32. No 2. Pp. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2016.7414231>.
24. Shcherba M., Shcherba A., Peretyatko Y. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation. Proc. 2020 IEEE 7th International Conference on *Energy Smart Systems (ESS 2020)*, Kyiv, Ukraine, 12–14 May 2020. Pp. 353–356. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293>.
25. Shcherba A., Shcherba M., Peretyatko Y. Electric Field Disturbance Near Water Trees In XLPE Insulation of Power Cables and Self-carrying Insulated Wires at Non-Sinusoidal Voltages and Currents. Proc. Conference IEEE 3rd KhPI Week on *Advanced Technology (KhPI Week 2022)*, Kharkiv, Ukraine, 03–07 October 2022. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916385>.
26. Shahsavarian T., Shahrtash S.M. Modelling of aged cavities for partial discharge in power cable insulation. *IET Sciences, Measurement and Technology*. 2015. Vol. 9. No 6. Pp. 661–670. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2014.0222>.
27. Shcherba A.A., Shcherba M.A., Peretyatko Yu.V. Electro-physical processes of degradation of cross-linked polyethylene insulation of power cables and self-carrying insulated wires under non-sinusoidal voltages and currents. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No 1. Pp. 3–6. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.003>. (Ukr)
28. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., Zolotarev V.M., Belyanin R.V. Modeling and control of long-term electromagnetic and thermal processes in induction channel furnace for copper rod production. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 55–64. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.055>. (Rus)
29. 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)*, Lviv, Ukraine, 10–14 October 2022. Pp. 727–731. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927052>.
30. 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. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.021>. (Ukr)
31. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. Fundamentals of Circuit Theory. Moskva: Energiia, 1975. 752 p. (Rus)

Надійшла 30.04.2024
Остаточний варіант 24.06.2024