

ВИЗНАЧЕННЯ ТА АНАЛІЗ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ПОСЛІДОВНОГО ВИСОКОДОБРОТНОГО РЕЗОНАНСНОГО LC-КОНТУРУ

А.А. Щерба * чл.-кор. НАН України, **О.Д. Подольцев** ** докт. техн. наук,
Н.І. Супруновська *** докт. техн. наук, **Д.В. Вінниченко** **** канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail podoltsev.alexander@gmail.com

У роботі проведено аналіз робочих характеристик електротехнічної системи (ЕТС), побудованої на основі послідовного високодобротного резонансного LC-контуру, яка призначена для діагностики ізоляції високовольтного обладнання. Експериментально досліджено частотні залежності параметрів L та C елементів резонансного контуру і показано, що для цих елементів існує оптимальна частота, за якій добротність контуру є максимальною. Причому ця добротність визначається переважно добротністю індуктивності контуру і може мати максимальне значення $Q_{LC \max} = 280$ за частоти $f = 40$ кГц. Розроблено Simulink-модель для аналізу робочих характеристик ЕТС в усталеному режимі та наведено графічні залежності, які дають змогу для вибраного активного опору навантаження визначити на ньому напругу та енергетичні характеристики і значення ККД ЕТС на етапі її проектування. Також розроблено Simulink-модель для аналізу динамічних характеристик ЕТС у разі виникнення пробою ізоляції, що діагностується. Показано, що в ЕТС, яка має послідовний високодобротний резонансний контур, пробій ізоляції буде викликати швидке зменшення в ній струму, а не його збільшення до аварійних значень як в ЕТС на основі високовольтних трансформаторів. Таким чином в ЕТС реалізується швидкодіюча параметрична стабілізація вихідного струму навіть у разі електричних пробоеів високовольтної ізоляції енергетичного обладнання, що діагностується, запобігаючи руйнуванню як ЕТС, так і ізоляції. Бібл. 11, рис. 9.

Ключові слова: резонансний контур, добротність, електротехнічна система, частотно-залежні параметри, високовольтна ізоляція, силові кабелі, електромашини, моніторинг технічного стану.

Тривалий час інноваційні дослідження у вітчизняній електроенергетиці, спрямовані на розвиток децентралізованих локальних електричних мереж Microgrid [1–4], здатних здійснювати динамічне регулювання балансу потужностей розосереджених джерел електроенергії в умовах нестаціонарного її споживання промисловими і житловими об'єктами, проводили без урахування технічного стану ізоляції кабельних ліній електропередачі [5] та потужного електроенергетичного обладнання [6, 7]. Поточний моніторинг та діагностику стану ізоляції силових кабелів зазвичай проводили лише за їхнього використання у високовольтних і надвисоковольтних електромережах [5] та в колах розряду лінійних [8] і нелінійних [9] ємнісних накопичувачів енергії сучасних електророзрядних установок, оскільки якість такої ізоляції впливала як на параметри розрядних імпульсів, так і на характеристики та експлуатаційні властивості отримуваних мікро- і нанопорошків [10, 11].

Відомо, що для виявлення ознак наявності дефектів (газових мікровключень) в ізоляції можливо використовувати метод вимірювання рівня часткових розрядів, який широко досліджується протягом останніх десятиліть [2–5]. Використовується також метод оцінки поточного стану ізоляції на основі вимірювання в ній струмів витоку у разі прикладання постійної напруги [6–9]. Причому для моніторингу і діагностики технічного стану високовольтної ізоляції потужного електроенергетичного обладнання необхідно розробляти та використовувати високовольтні електротехнічні системи (ЕТС), що мають швидкодіючий захист від зазвичай аварійних і небезпечних режимів електричного пробоя ізоляції, що діагностуються.

Задля отримання високої вимірювальної напруги (більше 20 кВ) в таких ЕТС зазвичай використовують достатньо масо-габаритні високовольтні трансформатори, що працюють на промисловій

© Щерба А.А., Подольцев О.Д., Супруновська Н.І., Вінниченко Д.В., 2024
ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0002-0200-369X>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9029-9397>;
*** <https://orcid.org/0000-0001-7499-9142>; **** <https://orcid.org/0000-0002-8894-860X>

частоті 50 Гц і мають значну індуктивність розсіювання задля зменшення їхніх струмів короткого замикання, які виникають за коротких замиканнях ізоляції. При цьому регулювання виникаючих небажано великих струмів відбувається за досить тривалий проміжок часу (близько 10 мкс) після виникнення електричного пробоя ізоляції.

У даній статті використовується альтернативний принцип побудови високовольтних ЕТС на основі послідовних LC-контурів, добротність Q яких може бути великою (зокрема $Q > 100$) через протікання в них резонансних високочастотних струмів (частотою $10 \div 100$ кГц). Використання в ЕТС послідовного високодобротного LC-контурів дає можливість отримати на його реактивних елементах напругу, що в Q раз перевищує зовнішню напругу живлення ЕТС [10]. На сьогодні на практиці існуючі ЕТС такого типу працюють на промисловій частоті 50 Гц, тому їхнім недоліком є значні масо-габаритні величини реактивних елементів [10].

Задля побудови компактної ЕТС для діагностики ізоляції авторами запропоновано перейти на високу робочу частоту $10 \div 100$ кГц. Такі ЕТС є розвитком на новому сучасному рівні досліджень та розробок резонансних контурів для живлення різноманітного електротехнологічного обладнання, що проводилися багатьма науковцями, зокрема, Інституту електродинаміки НАН України під керівництвом чл.-кор І.В. Волкова. В той же час робочі характеристики таких ЕТС в усталеному режимі роботи, а також їхні динамічні характеристики під час виникнення пробоя ізоляції, що призводить до короткого замикання в навантаженні, в літературі розглянуто не достатньо детально.

Тому метою даної роботи є:

- аналіз характеристик реактивних елементів побудованої високовольтної ЕТС резонансного типу та її добротності як функції частоти в діапазоні частот $10 \div 100$ кГц;
- аналіз за допомогою комп'ютерної моделі робочих характеристик високовольтної ЕТС, створеної на основі цього контуру, в усталеному режимі роботи;
- аналіз за допомогою комп'ютерної моделі динамічних характеристик високовольтної ЕТС в режимі виникнення швидкого (практично миттєвого) короткого замикання.

Структура високовольтних електротехнічних систем на основі послідовного резонансного LC контуру. Високовольтна ЕТС, що досліджується, може в принципі використовуватися для створення як синусоїдної напруги в ізоляції, зокрема, для діагностики технічного стану високовольтних кабелів, так і постійної напруги для дослідження технічного стану ізоляції турбогенераторів та інших електромашин. У роботі автори досліджують ЕТС, що формує постійну напругу в навантаженні.

Структуру високовольтної ЕТС на основі резонансного LC-контурів для діагностики стану ізоляції на постійній напрузі схематично показана на рис. 1. На ньому первинним джерелом виступає джерело постійної напруги, яке під'єднане до входу інвертора. Це може бути як джерело змінного струму із випрямлячем, так і акумуляторна батарея в разі портативного варіанту виконання джерела.

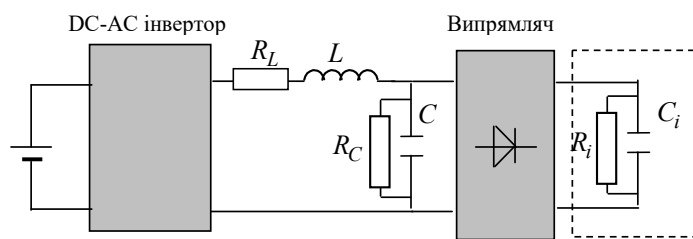


Рис.1

До виходу високочастотного DC-AC інвертора (перетворювача постійного струму в змінний) підключено високодобротний резонансний LC-контур, до ємнісного елемента якого підключено випрямляч із навантаженням. Як навантаження розглядалася ізоляція високовольтного обладнання. Відомо, що напруга на вході випрямляча в режимі резонансу в контурі залежить від добротності Q цього LC контуру, тому побудова контуру із високою добротністю $Q > 100$ є однією з головних задач під час розробки високовольтного ЕТС.

Для реалізації високої добротності ЕТС автори виготовили спеціальні котушки з секційними обмотками з багатожильних ізольованих і скручених у джгут мідних проводів типу "літцентрат" і послідовно з ними підключили промислові керамічні конденсатори необхідної ємності. Було досліджено частотні характеристики таких індуктивного та ємнісного елементів в діапазоні робочої частоти $10 \div 100$ кГц.

Частотно-залежні параметри індуктивності та ємності послідовного резонансного контуру. Задля дослідження частотних характеристик розроблених L , C елементів резонансного контуру в роботі використовувався вимірювач імпедансу.

Параметри індуктивності. Отримані значення частотно-залежних параметрів котушки індук-

тивності $L(f)$ та $R_L(f)$ в діапазоні частот $10 \div 100$ кГц наведено на рис. 2. При цьому використовувалася послідовна заступна схема котушки. Також на цьому рисунку наведено залежність від частоти добротності цієї котушки $Q_L(f)$, яка розраховувалася як $Q_L = \omega L / R_L$. Напря́м стрілок вказує відповідну вісь ординат.

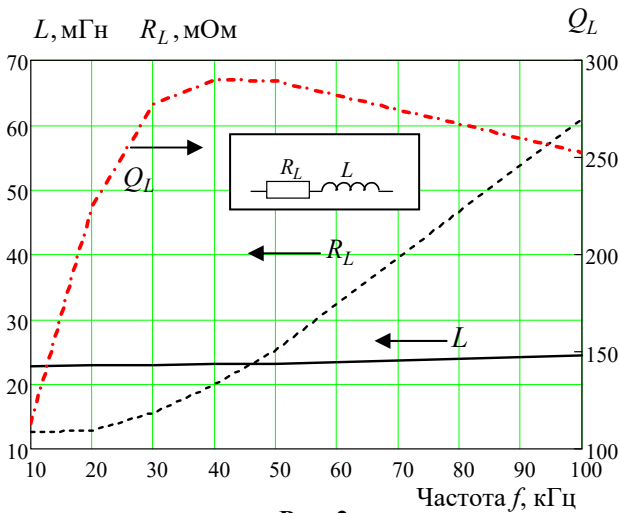


Рис. 2

значення частотно-залежних параметрів цієї батареї – $C(f)$ та $R_C(f)$ в діапазоні частот $10 \div 100$ кГц зображено на рис. 3. При цьому використовувалася паралельна заступна схема конденсатора. Також на цьому рисунку наведено залежність від частоти добротності цієї батареї $Q_C(f) = R_C \omega C$.

З цього рисунку видно, що:

– величина ємності C слабо змінюється із ростом частоти;

– активний опір R_C значно зменшується із ростом частоти;

– величина добротності ємності має максимальне значення $Q_{C \max} = 9,2 \cdot 10^3$ за $f = 30$ кГц.

Отримавши частотні залежності параметрів $L(f)$ та $C(f)$, можна визначити резонансну частоту f_0 коливального контуру, що містить ці послідовно з'єднані елементи, шляхом розв'язання наступного нелінійного алгебраїчного рівняння:

$$\omega L(f) = 1 / (\omega C(f)).$$

Реалізація резонансного контуру з високою добротністю. Задля спрощення подальших розрахунків доцільно перейти від наведеної на рис. 1 паралельної заступної схеми ємності із параметрами C, R_C та добротністю $Q_C = R_C \omega C$ до послі-

довної схеми із параметрами C', R'_C та добротністю $Q'_C = 1 / (R'_C \omega C')$. При цьому можна показати, що за умови $Q_C \gg 1$ справедливі наступні вирази:

$$C' = C, \quad R'_C = R_C / Q_C^2, \quad Q'_C = Q_C.$$

Це дає змогу в подальшому коливальний контур на рис. 1 розглядати як контур із послідовно з'єднаними L, C та $R_{LC} = R_L + R_C / Q_C^2$ елементами.

Для розрахунку значення добротності резонансного контуру із послідовно з'єднаних L елементу із добротністю Q_L та C елементу із добротністю Q_C за визначеній резонансній частоті може бути використана формула

$$Q_{LC} = \frac{Q_L Q_C}{Q_L + Q_C}, \quad (1)$$

яка справедлива за умови, що частота f співпадає з частотою резонансу контуру f_0 . Дійсно, величина добротності контуру на частоті резонансу ω_0 дорівнює

$$Q_{LC} = \frac{\omega_0 L}{R_L + R_C / Q_C^2} \Rightarrow Q_{LC}^{-1} = \frac{R_L}{\omega_0 L} + \frac{R_C}{\omega_0 L Q_C^2} = Q_L^{-1} + Q_C^{-1}, \quad (2)$$

де використовувалося те, що $\omega_0 L = 1/(\omega_0 C)$. Вирази (1) та (2) співпадають і це свідчить про те, що добротність коливального контуру, знаючи добротність його елементів, розраховується так, як за паралельному з'єднанні двох резисторів, розраховується значення еквівалентного резистора. Слід зазначити, що саме від величини добротності Q_{LC} залежить величина максимальної напруги (діюче значення) на реактивних елементах контуру за умови, що частота зовнішнього джерела живлення буде дорівнювати резонансній частоті контуру.

За резонансу у високодобротному контурі ця напруга буде визначатися як

$$U_L = U_C = U \cdot Q_{LC}, \quad (3)$$

де U – діюче значення напруги зовнішнього джерела живлення синусоїдної напруги.

На рис. 4 наведена залежність добротності резонансного контуру $Q_{LC}(f)$, що розрахована за виразом (1). Ця залежність дає змогу, знаючи резонансу частоту контуру f_0 , наприклад, за результатами експерименту або попереднього розрахунку, визначити добротність контуру $Q_{LC}(f)$ (за $f = f_0$) і

потім величину напруги а також величину напруги на реактивних елементах за виразом (3). Ця напруга буде робочою напругою ЕТС.

З рис. 4 також видно, що залежність $Q_{LC}(f)$ для елементів, що досліджувалися, майже збігається із залежністю $Q_L(f)$, що пов'язано із відносно великим значенням добротності ємності $Q_C(f)$, що використовується в контурі. Максимальне значення добротності резонансного контуру становить $Q_{LC \max} = 280$ і досягається за частоти $f = 40$ кГц.

Далі на основі розробленої Simulink-моделі було досліджено робочі характеристики високовольтного джерела живлення як елемента ЕТС та побудованого на основі резонансного LC-контуру, характеристики якого наведені на рис. 2 – 4.

Simulink-модель електротехнічної системи резонансного типу та аналіз її робочих характеристик в усталеному режимі.

На даному етапі для отримання узагальнених результатів розглядався режим роботи джерела живлення на резистивне навантаження R_{Load} , що відповідає випрямлячу та R_i , C_i -елементам на його виході, як показано на рис. 1. Зазначимо, що розглядається ЕТС для створення високої постійної напруги в ізоляції і вибір при цьому конкретного еквівалентного значення R_{Load} становить самостійну задачу. Як джерело живлення використовується джерело напруги прямокутної форми (рис. 5, а) із амплітудою $U_0 = 1$ В, що змінюється із частотою резонансу LC контуру $f_0 = 17,9$ кГц. Вибране амплітудне значення в 1 В спрощує пропорційний перерахунок результатів на іншу напругу, розглядаючи кола на рис. 5 як лінійні. Значення всіх параметрів LC-контуру відповідають даним рис. 2–4 за частоті резонансу $f = f_0$, а саме: $L = 22,9$ мГн, $R_L = 13$ Ом, $C = 3,5 \cdot 10^{-9}$ Ф, $R_C = 22$ МОм.

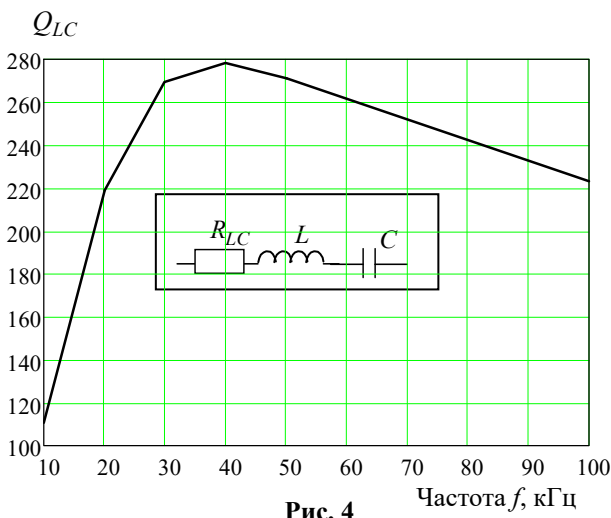


Рис. 4

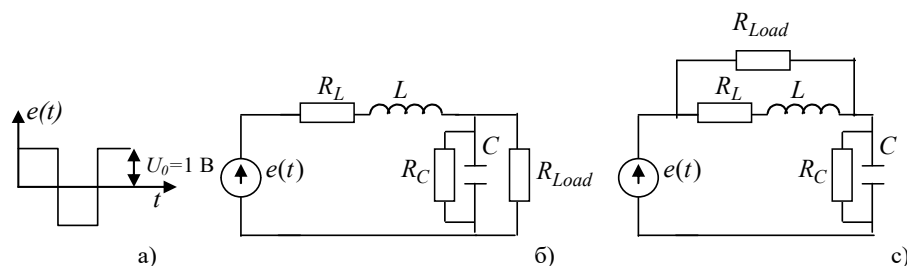


Рис. 5

Досліджувалися два варіанти підключення навантаження – паралельно до ємності резонансного контуру (як показано на рис. 5, б) та паралельно до індуктивності резонансного контуру (рис. 5, в).

Обидві моделі були реалізовані в пакеті Malab/Simulink та проведено розрахунки для усталеного режиму роботи джерела живлення за різних значеннях навантаження R_{Load} .

На рис. 6 показано Simulink-модель для дослідження робочих характеристик ЕТС у разі підключення навантаження R_{Load} паралельно до ємності (рис. 6, а) та результати проведених розрахунків відносного значення напруги на навантаженні, величини потужності на ньому (б), ККД для ЕТС (в) як функцій відносного значення опору навантаження.

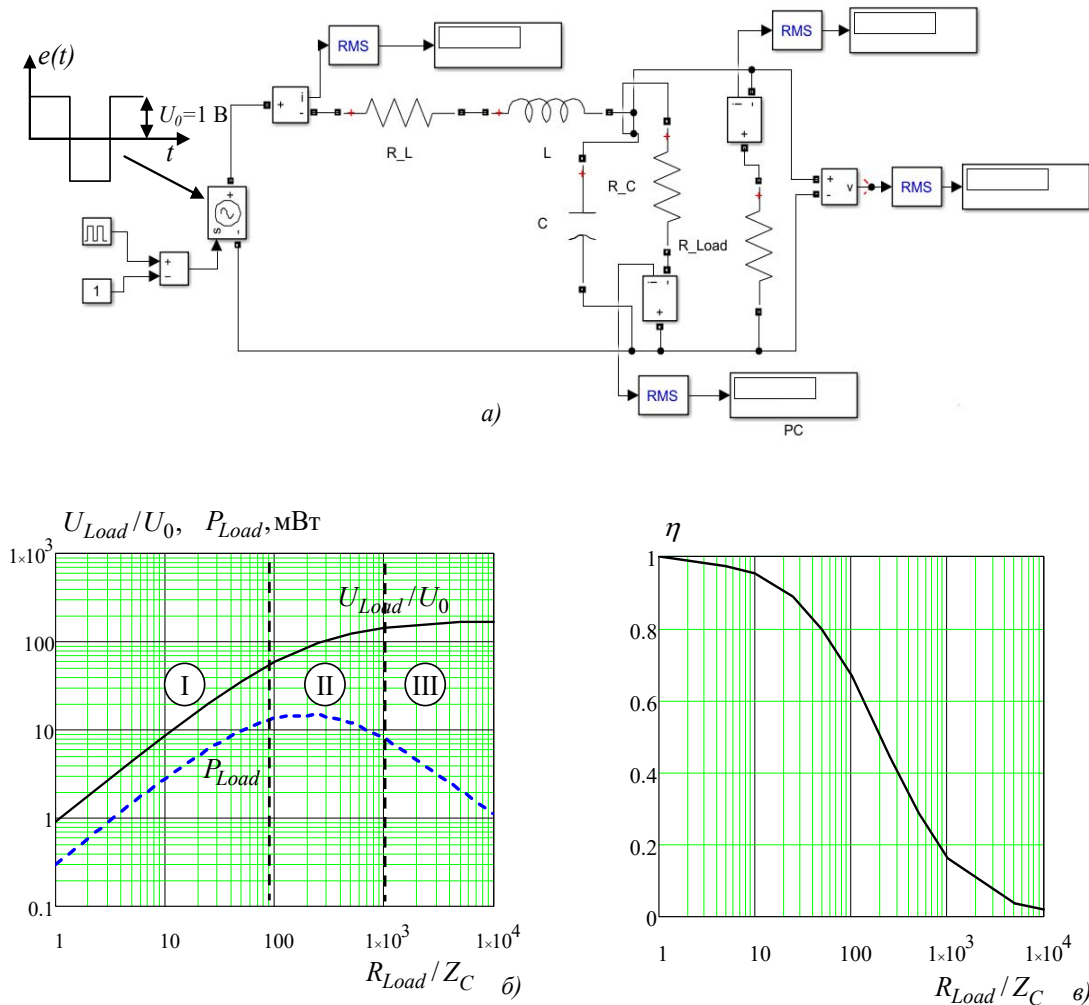


Рис. 6

Зокрема наведені залежності відносного значення напруги на навантаженні U_{Load}/U_0 , величини потужності на навантаженні P_{Load} та величини ККД ЕТС η , що розраховується за формулою $\eta = P_{Load} / (P_{Load} + P_L + P_C)$, як функції відносного значення опору навантаження R_{Load} / Z_C , де $Z_C = 1 / (2\pi f_0 C)$.

На графіку рис. 6, б можна умовно виділити три області в залежності від значення опору навантаження: область I, в якій $R_{Load} / Z_C < 100$ – це робота джерела з високим значенням ККД; область II, в якій $100 \leq R_{Load} / Z_C \leq 1000$ – робота з високим значенням потужності та область III, де $R_{Load} / Z_C > 1000$ – робота з високим значенням напруги на навантаженні. Хоча в області II та особливо в області I напруга суттєво зменшується, однак за допомогою, наприклад, підвищувального трансформатора або DC-DC конвертора, що розташовані на вході інвертора, можливо отримати необхідне значення цієї напруги.

Наведені на рис. 6 результати дають змогу, знаючи величину активного опору навантаження, оцінити на етапі проектування такої ЕТС рівень напруги на цьому навантаженні. Також для цього значення навантаження можна оцінити енергетичні характеристики та рівень ККД ЕТС, що проектується.

На рис. 7 показана Simulink-модель для дослідження робочих характеристик у разі підключенні навантаження R_{Load} паралельно до індуктивності резонансного контуру. Результати проведених на цій моделі розрахунків, а саме, відносного значення напруги на навантаженні, величини потужності на ньому та величина ККД як функцій відносного значення опору навантаження R_{Load}/Z_L , де $Z_L = 2\pi f_0 L$, не відрізняються від відповідних залежностей на рис. 6, б та в. Це пов'язано з тим, що за резонансу $Z_L = Z_C$. Звідси обидва способи підключення навантаження є допустимими.

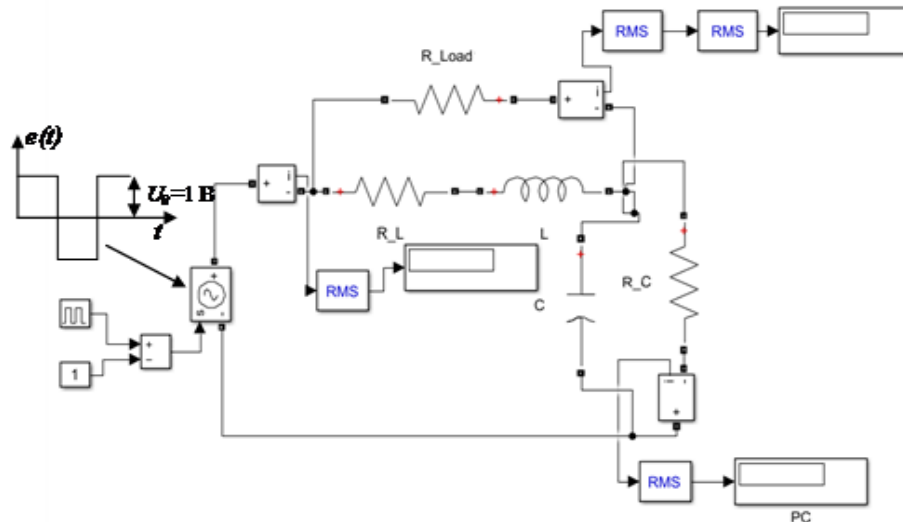


Рис. 7

Аналіз динамічних характеристик високовольтної електротехнічної системи на основі послідовного резонансного контуру. Для високовольтної ЕТС, що досліджується в роботі, важливо оцінити її динамічні процеси в разі пробою ізоляції, що діагностується, тобто коли на певний проміжок часу виникає режим короткого замикання в навантаженні. Такий режим слід вважати штатним режимом, що має бути враховано на етапі проектування такої ЕТС. Як навантаження в цьому режимі, на відміну від розрахунку усталеного режиму, розглядається ізоляція, що підключена до виходу випрямляча та моделюється паралельно з'єднаними активним опором R_{Load}^D та еквівалентної ємності C_1 . Ця ємність враховує як ємність ізоляції, так і наявність, в разі необхідності, додаткової ємності на виході випрямляча для зменшення пульсацій напруги на ізоляції. В цьому режимі роботи також були досліджені два варіанта підключення випрямляча із навантаженням: підключення паралельно ємності резонансного контуру та паралельно індуктивності резонансного контуру.

Значення активного опору навантаження задавалося як $R_{Load}^D / Z_C = R_{Load}^D / Z_L = 100$, а частота прямокутного джерела живлення дорівнювала резонансній частоті. Для розрахунку динамічних характеристик використовувалася розроблена Simulink-модель ЕТС.

На рис. 8, а показана така модель у разі підключення навантаження паралельно ємності. Модель містить комутаційний апарат K , який підключений паралельно до навантаження та замикається на певний проміжок часу, що моделює процес виникнення пробою в ізоляції на етапі її випробування.

Результати комп'ютерних розрахунків для цього способу підключення показані на рис. 8, б, в, на яких наведено змінення у часі електричного струму в розрядному контурі $i_{LC}(t)$ (рис. 8, б) та відносного значення напруги на навантаженні $u_{R_{Load}} / U_0$ (рис. 8, в). З цього рисунку видно, що в разі виникнення пробою в ізоляції (через 5 мс після початку моделювання) ці величини значно зменшуються, а при погасанні іскрового розряду ці величини збільшуються до усталеного значення за проміжок часу приблизно 6 мс.

В разі підключення навантаження паралельно до індуктивності була розроблена Simulink-модель, представлена на рис. 9, а. Результати розрахунків змінення у часі електричного струму в розрядному контурі та відносного значення напруги на навантаженні представлено відповідно на рис. 9, б та 9, в.

Зазначимо, що динамічні характеристики під час підключення навантаження як до ємності ЕТС, так і до його індуктивності змінюються практично однаково. Отже, при роботі ЕТС на активне навантаження в режимі створення постійної напруги обидва способи його підключення можуть бути рекомендовані до реалізації на практиці.

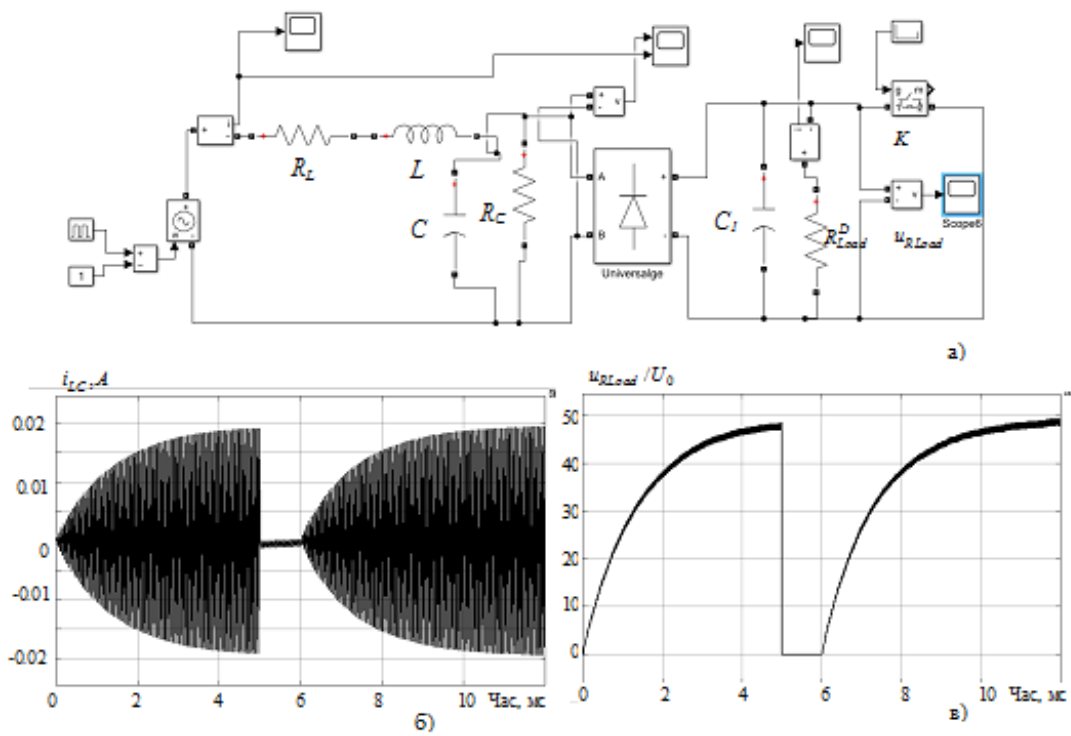


Рис. 8

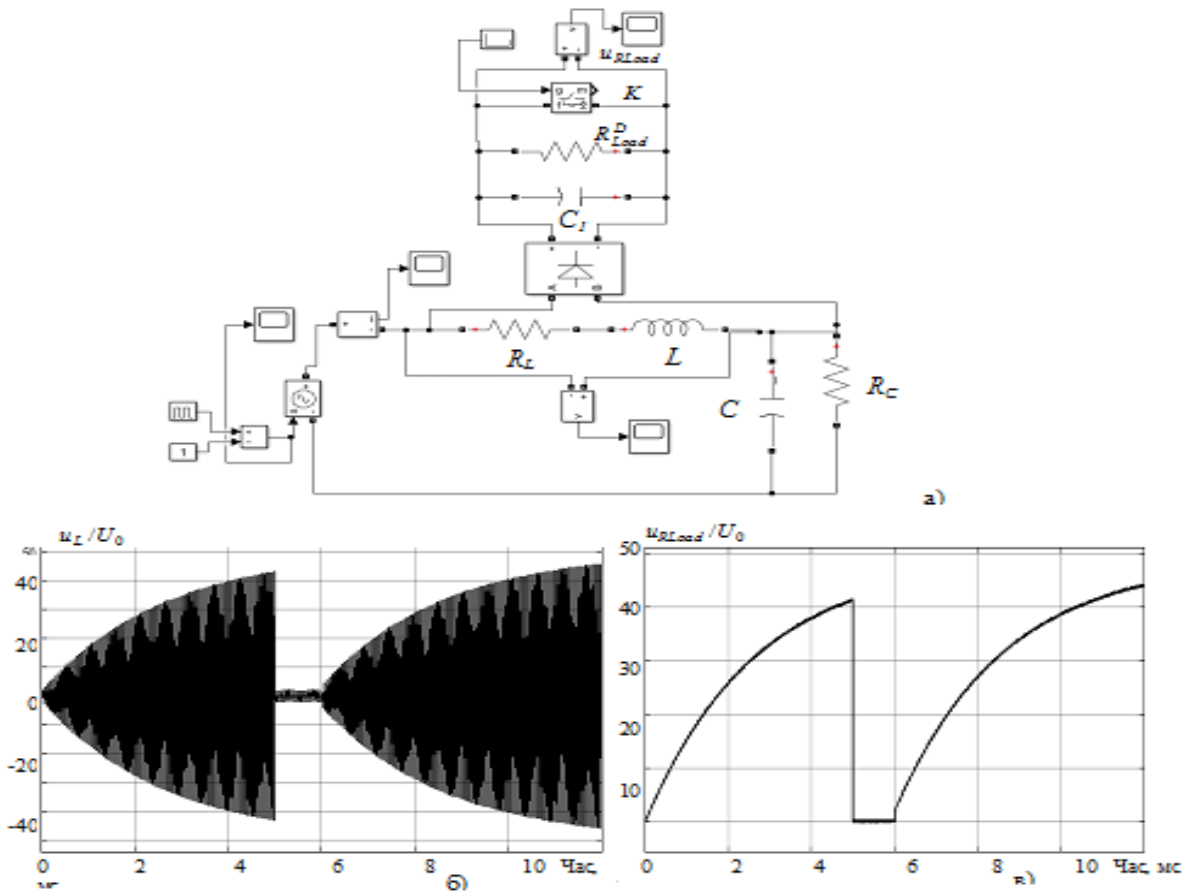


Рис. 9

Таким чином, запропонована високовольтна ЕТС на основі високодобротного резонансного контуру, що призначена для діагностики ізоляції, дає змогу параметричним шляхом впродовж характерного часу $1/f_0$ суттєво зменшувати напругу та струм у навантаженій такої ЕТС у випадку пробою ізоляції, що діагностується. Такий підхід запобігає можливому руйнуванню як самої ЕТС, так і подальшому руйнуванню ізоляції високовольтного обладнання. І таку властивість слід вважати важливою перевагою високовольтної ЕТС саме такого типу в порівнянні з іншими високовольтними джерелами живлення. Слід зазначити, що в разі виникнення як штатного, так і аварійного режиму холостого ходу розглянутої ЕТС напруга на реактивних елементах резонансного контуру буде дорівнювати саме робочій високій напрузі, яка утворюється внаслідок роботи цього контуру на резонансній частоті.

Висновки. Проведено аналіз робочих та динамічних характеристик високовольтної ЕТС, побудованої на основі високодобротного резонансного LC контуру та призначеної для діагностики ізоляції високовольтного обладнання на постійній напрузі. Експериментально досліджено частотні залежності параметрів L та C елементів, що утворюють побудований резонансний контур, і показано, що для обох елементів існує оптимальна частота, за якій величина добротності елемента досягає максимуму. Добротність побудованого контуру визначається переважно добротністю його індуктивності L і досягає максимального значення $Q_{LC\ max} = 280$ за частоти $f = 40$ кГц.

Розроблено Simulink-модель для аналізу робочих характеристик ЕТС в усталеному режимі та встановлено залежності, що дають змогу для даного активного опору навантаження визначити на ньому рівень напруги, а також енергетичні характеристики та значення ККД ЕТС на етапі її проектування.

Розроблено Simulink-модель для аналізу динамічних характеристик ЕТС у разі виникнення пробою в ізоляції навантаження, що діагностується. Показано, що в разі пробою ізоляції, що призводить до виникненню короткого замикання у навантаженні, електричний струм в резонансному контурі параметричним шляхом значно зменшується до безпечного рівня. Це запобігає можливому руйнуванню як ЕТС, так і досліджуваної ізоляції і ця властивість є важливою для такого типу високовольтних ЕТС.

Дослідження виконані 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. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Використання динамічної тарифікації для оптимізації техніко-економічних показників microgrid на локальних ринках електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 3. С. 37-48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.037>.
2. Lezama F., Soares J., Hernandez-Leal P., Kaisers M., Pinto T., Vale Z. Local Energy Markets: Paving the Path Toward Fully Transactive Energy Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019. Vol. 34. No 5. Pp. 4081-4088. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2833959>.
3. Sinha A., Basu A.K., Lahiri R.N., Chowdhury S., Chowdhury S.P., Crossley P.A. Setting of Market Clearing Price (MCP) in Microgrid Power Scenario. *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. 2008. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596357>.
4. Hirsch A., Parag Y., Guerrero J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 90. Pp. 402-411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>.
5. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. Киев: Наш Формат, 2013. 550 с.
6. Титко А.И., Васильковский Ю.Н. Научные основы, методы и средства диагностики асинхронных двигателей. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2015. 300 с.
7. Зозулін Ю.В., Антонов О.С., Бичік В.М., Боричевський А.М., Кобзар К.О., Лівшиць О.Л., Ракогон В.Г., Роговий І.Х., Хаймович Л.Л., Чередник В.І. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій. Харків: ПФ Колегіум, 2011. 228 с.
8. Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications. Berlin: Springer-Verlag, 2006. Pp. 288–305.
9. 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/techned2016.03.009>.
10. Білецький О.О., Супруновська Н.І., Щерба А.А. Залежність енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від їх початкових і кінцевих напруг. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 3-10. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.003>.
11. Nguyen P.K., Sugho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1.

DETERMINING AND ANALYSING PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF HIGH-VOLTAGE ELECTROTECHNICAL SYSTEMS BASED ON A SERIES RESONANT LC-CIRCUIT WITH A HIGH Q-FACTOR

A.A. Shcherba, O.D. Podoltsev, N.I. Suprunovska, D.V. Vinnichenko
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,
e-mail: podoltsev.alexander@gmail.com

The paper analyzes the performance characteristics of the electrotechnical system (ETS), built on the basis of a series high-Q resonant LC circuit and intended for diagnosing the isolation of high-voltage equipment. The frequency dependences of the parameters L and C elements of the resonant circuit were experimentally studied and it was shown that for both elements there is an optimal frequency at which the value of the element's Q -factor reaches its maximum value. It was established that the Q -factor of the investigated circuit is determined mainly by the Q -factor of its inductance and reaches the maximum value $Q_{LC,max} = 280$ at the frequency $f = 40$ kHz. The Simulink model was developed for the analysis of the performance characteristics of the ETS in steady state. Graphical dependences are given, which allow to determine the level of voltage on the load for a given active resistance of this load, as well as the energy characteristics and the value of the efficiency of the ETS at the stage of its design. A Simulink model has also been developed to analyze the dynamic characteristics of the ETS when a breakdown of the diagnosed insulation occurs. It is shown that the breakdown of the insulation in the ETS, which has a series high-Q resonant circuit, will cause a rapid decrease in current by Q times, and not an increase in current to emergency values, as in an ETS based on high-voltage transformers. In this way, a fast-acting parametric stabilization of the output current is implemented in the ETS even in case of electrical breakdowns of the high-voltage insulation of the power equipment under diagnosis. Thus, the ETS implements high-speed parametric stabilization of the output current, which prevents the destruction of both the ETS and the diagnosed high-voltage insulation of power equipment even during its electrical breakdown. References 11, figures 9.

Key words: resonant circuit, Q factor, electrotechnical system, frequency-dependent parameters, high-voltage insulation, power cables, electric machines, technical state monitoring.

1. Kirylenko O.V., Zhuykov V.Ya., Denisyuk S.P. Use of dynamic pricing to optimize technical and economic indicators of Microgrid in the local markets of Ukraine. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No 3. Pp. 37-48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.037>. (Ukr)
2. Lezama F., Soares J., Hernandez-Leal P., Kaisers M., Pinto T., Vale Z. Local Energy Markets: Paving the Path Toward Fully Transactive Energy Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019. Vol. 34. No 5. Pp. 4081-4088. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2833959>.
3. Sinha A., Basu A.K., Lahiri R.N., Chowdhury S., Chowdhury S.P., Crossley P.A. Setting of Market Clearing Price (MCP) in Microgrid Power Scenario. *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. 2008. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596357>.
4. Hirsch A., Parag Y., Guerrero J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 90. Pp. 402-411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>.
5. Shidlovsky A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. Cables with polymer insulation for ultra-high voltage. Kyiv: Our Format, 2013. 550 p. (Rus)
6. Titko A.I., Vaskovsky Yu.N. Scientific foundations, methods and diagnostic tools for asynchronous motors. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2015. 300 p. (Rus)
7. Zozulin Yu.V., Antonov O.E., Bychik V.M., Borychevskyi A.M., Kobzar K.O., Livshyts O.L., Rakogon V.G., Rogovy I.X., Haymovich L.L., Herdman V.I. Creation of new types and modernization of existing turbine generators for thermal power stations. Kharkiv: PF Kolegium, 2011. 228 p.
8. Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications. Berlin: Springer-Verlag, 2006. Pp. 288-305. (Ukr)
9. 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/techned2016.03.009>.
10. 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/techned2016.01.003>. (Ukr)
11. Nguyen P.K., Sugho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1.

Надійшла 04.12.2023
Остаточний варіант 28.12.2023