

НАУКОВА КОНЦЕПЦІЯ СТВОРЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ МОБІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ РЕЗОНАНСНОГО ТИПУ ЗІ ШВИДКОДІЮЧИМИ КЕРУВАННЯМ І ПАРАМЕТРИЧНОЮ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ РЕЖИМІВ НАВАНТАЖЕННЯ

А.А. Щерба^{*}, чл.-кор. НАН України, **Д.В. Вінниченко**^{**}, канд. техн. наук,
Н.І. Супруновська^{***}, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: anat.shcherba@gmail.com; vdvvs@gmail.com; iednatl@gmail.com.

Розроблено наукову концепцію створення мобільних високовольтних безтрансформаторних електротехнічних систем (ЕТС) резонансного типу на основі реалізації в них послідовного високооборотного індуктивно-ємнісного контуру (ІСК) та високочастотного (ВЧ) синусоїдного струму, цілеспрямованим регулюванням частоти якого забезпечується максимальне підвищення величини змінної напруги на навантаженні ЕТС. Значне збільшення частоти струму в ІСК забезпечує відповідне зменшення імпульсної електроенергії в навантаженні ЕТС та підвищення швидкодії керування і стабілізації його режимів навіть у разі зменшення його електричного опору до нуля, характерному для пробою ізоляції. В ІСК використовували котушки індуктивності добротністю $Q_L \sim 270$ (виготовлені авторами з багатожильних ізольованих скручених мідних проводів типу "літцендрат") та керамічні конденсатори ємністю $\sim 3,5$ нФ і добротністю $Q_C > 1000$. Під час формування резонансних струмів частотою ~ 40 кГц в цих ІСК реалізовували максимальну добротність $Q_{ІСК} \sim 260$ і відповідне відношення вихідної напруги ЕТС до вхідної без використання підвищувальних трансформаторів. Зокрема, у разі підключення ЕТС до джерела напруги 220 В на виході ЕТС можливо отримувати напругу з амплітудним значенням до 78 кВ. Використання даної концепції значно зменшує масо-габаритні характеристики ЕТС, що дає підстави для створення мобільних, а за необхідності і автономних ЕТС – з електроживленням від акумуляторів. Дана концепція спрямована саме на створення мобільних ЕТС для моніторингу та діагностики високовольтної ізоляції силових кабелів і потужних електричних машин типу турбогенераторів атомних електростанцій (АЕС) та інших високовольтних энергооб'єктів критичної інфраструктури України в місцях їхнього розташування, що є важливим у даний воєнний період. ЕТС такого типу може використовуватися і для заряду до високих напруг ємнісних накопичувачів енергії (СНЕ) електророзрядних установок (ЕРУ) для виробництва електроіскрових мікро- і нанопорошків з унікальними властивостями та для високовольтної електрогідромпульсної обробки різних матеріалів і середовищ. Бібл. 40, рис. 4.

Ключові слова: електротехнічна система, змінний струм, індуктивно-ємнісний контур, послідовний резонанс, заряд, напруга, розряд, добротність, висока частота, імпульсна енергія, літцендрат.

Необхідність підвищення безпеки й надійності потужного електрообладнання енергетичних об'єктів критичної інфраструктури України у воєнний і повоєнний періоди загострює проблему необхідності мобільного моніторингу технічного стану його електроізоляції та визначення умов її подальшого використання. Розвинені країни Європи, Америки та Азії випробування електроізоляції такого обладнання проводять планово в стаціонарних лабораторіях. Вчені Інституту електродинаміки НАН України (м. Київ), ПАТ "Завод Південкабель" (м. Харків), НТУ України "Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського" і НТУ "Харківський політехнічний інститут" розробили електротехнологічний комплекс серійного виробництва та сертифікації вітчизняних кабельних систем світового рівня зі "зшитою" поліетиленовою (ЗПЕ) ізоляцією на напругу до 400 кВ [1]. Зараз ПАТ "Завод Південкабель", на території якого створено цей комплекс, є єдиним в Україні виробником новітньої вітчизняної кабельно-провідникової продукції (КПП) на всі класи напруги до 400 кВ для потужних энергооб'єктів критичної інфраструктури України та об'єктів спеціального призначення. Вказана КПП

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

використовується також задля відновлення роботи промислових і комунальних енергетичних об'єктів нашої Батьківщини, зруйнованих російським агресором.

Задля випробування КПП підвищеною синусоїдною напругою до 500 кВ згідно стандарту СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 [2] з визначенням електричних характеристик її ЗПЕ ізоляції для міжнародної сертифікації на ПАТ "Завод Південкабель" створено електротехнічну систему (ЕТС) з послідовним резонансним індуктивно-ємнісним контуром (ІЕК) добротністю від 20 до 40 у разі протікання синусоїдного струму частотою 50 Гц. Для реалізації такої добротності використано електрообладнання провідних фірм Європи і США, зокрема 2 низькочастотних індуктори фірми Hirotronics (США) масою по 18 т кожний [1]. ЕТС підключається до лінійної напруги 380 В трифазної промислової електромережі частотою 50 Гц, а для підвищення напруги до 500 кВ в ЕТС крім резонансного ІЕК використовують також підвищувальні автотрансформатор Пашена та додатковий однофазний трансформатор. Аналогічну структуру мають ЕТС таких відомих виробників високовольтної КПП, як АВВ (Німеччина), Nexans (Франція), Bruggkabel (Бельгія), Sumitomo Electric (Японія) та Okonite (США) [1].

Вказані ЕТС забезпечують точне (з похибкою, меншою 2 пКл) вимірювання рівня часткових розрядів (ЧР) в ізоляції високовольтної КПП. Найбільш важливою властивістю таких ЕТС є наявність параметричної стабілізації струму в колах їхнього навантаження навіть за швидкого змінення його електричного опору у разі пробою електроізоляції енергооб'єктів під час її випробування підвищеною напругою. Причому на відміну від ЕТС трансформаторного типу, в яких пробій ізоляції викликає струм короткого замикання недопустимої величини, при пробі ізоляції навантаження ЕТС резонансного типу електричний опір ізоляції, напруга на ній і вихідний струм ЕТС швидко прямують до нуля. Але котушки індуктивності та трансформатори таких ЕТС створені для протікання низькочастотних великих струмів і мають обмежену добротність (< 40) і великі масо-габаритні показники [1]. Ці обставини не дають змоги використовувати такі ЕТС для мобільного моніторингу ізоляції енергооб'єктів в місцях їхнього розташування, що необхідно для забезпечення швидкої діагностики високовольтної ізоляції енергооб'єктів України в даний воєнний час.

Зауважимо, що дослідження властивостей ЕТС резонансного типу з використанням ІЕК, в яких протікали низькочастотні синусоїдні струми, проводили ще у ХХ столітті багато науковців, зокрема Інституту електродинаміки НАН України (м. Київ) під керівництвом О.М. Міляха та І.В. Волкова [3–5]. Проте основні дослідження були спрямовані на визначення оптимальних умов стабілізації низькочастотного струму (в основному частотою 50 Гц) у навантаженні у разі змінення його електричного опору. При цьому у роботі [4] було вказано, що на умови стабілізації синусоїдного струму в навантаженні ІЕК ще у 1891 році звертав увагу відомий французький електротехнік Поль Бушєро. Подальші дослідження стабілізуючих властивостей низькочастотних резонансних ІЕК обґрунтували ефективність їх використання для електроживлення зварювальних дуг [6], регулювання швидкості приводів постійного струму [7], зарядки акумуляторів [8] і накопичувальних конденсаторів [9]. Проводилися також дослідження особливостей використання в ІЕК несинусоїдних напруг (власне урахування вищих гармонічних складових) [10]. Наразі актуальність такого урахування збільшується як у зв'язку зі зростанням частки електроенергії, що генерується вітро- та сонячними електростанціями, які використовують проміжні напівпровідникові перетворювачі, так і внаслідок експлуатації сучасних технологічних установок та систем інформаційного зв'язку, комп'ютерних систем, тощо.

У роботі [11] проведено дослідження ЕТС з використанням проміжного перетворювача частоти та ІЕК, у колах якого можуть протікати струми підвищеної частоти, але для отримання високих вихідних напруг у навантаженні ЕТС все ж таки використовували підвищувальні високовольтні трансформатори. На нашу думку в роботах [6–12] відбувся розвиток тієї ж концепції створення потужних ЕТС з послідовними ІЕК, в яких резонансні процеси досліджували задля формування у навантаженні великих синусоїдних струмів, не залежних від електричного опору навантаження. А частота цих струмів була не важливою. Тим більше, що для її підвищення необхідно було створювати додаткові потужні пристрої – напівпровідникові перетворювачі частоти, по суті випрямлячі та інвертори, що суттєво ускладнювало реалізацію у навантаженні незмінних синусоїдних струмів підвищеної частоти. Більше того, реалізація надвеликих добротностей в ІЕК відповідає режимам їхнього холостого ходу, які в роботах [3–12] вважалися аварійними і недопустимими.

Розвиток імпульсної електротехніки в напрямку інтенсифікації досліджень з використання потужних імпульсних розрядів у навантаженні показав необхідність удосконалення принципів побудови та оптимізації ЕТС з ІЕК [12]. Проте концепція створення ЕТС резонансного типу не отримала подальшого розвитку в напрямку реалізації в їхніх ІЕК надвисоких добротностей і відповідно високих напруг

без використання високовольтних трансформаторів. Удосконалення імпульсної техніки пішло в напрямку розробки нових методів електрофізичної та електрохімічної обробки матеріалів [13, 14] та розробки узагальнюючих основ теорії зарядних і розрядних електричних кіл ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) [15]. Зокрема було показано, що для урахування стохастичного змінення електричного опору навантаження у процесі аналізу перехідних процесів у колах електророзрядних установок (ЕРУ) ефективним є метод різницевої рівнянь [16, 17]. А в роботах [18, 19] було показано, що під час створення ЕРУ для технологій виробництва електроіскрових мікро- і нанопорошків з унікальними характеристиками бажано не тільки використовувати батарею паралельно з'єднаних конденсаторів, але й враховувати перерозподіл між ними електроенергії в залежності від розкиду їхніх власних характеристик та напруг [20]. Для коригування розподілу за розмірами електроіскрових частинок, які отримують в ЕРУ, бажано враховувати залежність втрат електроенергії в паралельно з'єднаних конденсаторах від початкових напруг і співвідношення їхніх ємностей [21].

Проте, з часом у роботах [22–24] було показано, що для зарядки ЄНЕ до високих напруг можна створювати ЕТС резонансного типу без підвищувальних трансформаторів. Зокрема було створено високовольтні ЕРУ для електроіскрової обробки вуглецевмісних газів типу пропан-бутан з отриманням нановуглецевих матеріалів з унікальними властивостями [22, 23]. Таким чином, було розширено можливості ЕТС резонансного типу як науково-технічного рішення для розробки новітніх електророзрядних технологій отримання різних мікро- і наноімцнених конструктивних матеріалів [18, 19, 22, 23, 25].

Проте, у теперішній воєнний період в Україні зростає інтенсивність руйнування російським агресором потужних енергооб'єктів критичної інфраструктури, тому головним пріоритетом даної статті є аналіз результатів наукових досліджень, спрямованих на вирішення проблеми мобільного моніторингу технічного стану високовольтної електроізоляції таких найбільш розвинених і вразливих енергооб'єктів, як силові кабелі ліній електропередачі (ЛЕП) напругою до 35 кВ [26–29] та крупні електромашини типу турбогенераторів АЕС та інших потужних асинхронних і синхронних електромашин [30–33]. Діагностику ізоляції таких енергооб'єктів можливо здійснювати на основі контролю величини струмів витоку за підвищеної напруги [34–36] і вимірювання рівня часткових розрядів (ЧР) за підвищеної напруги та сталій її частоті або за підвищеної частоті та сталій величині напруги [28, 37]. Під час формування високочастотної вхідної напруги ІСК важливо використовувати ефективні методи оптимізації динамічних втрат електроенергії на ключах напівпровідникових перетворювачів [38, 39].

Дуже важливим є створення мобільних і автономних ЕТС, здатних здійснювати швидкий моніторинг і діагностику високовольтної електроізоляції безпосередньо на енергооб'єктах, тому такі ЕТС повинні мати незначні масо-габаритні показники, підвищену стійкість до аварійних режимів під час пробою досліджуваної ізоляції та високу добротність ІСК, величину якої бажано точно регулювати.

Тому основною метою даної роботи була розробка нової наукової концепції створення мобільних високовольтних безтрансформаторних ЕТС резонансного типу на основі реалізації в них послідовного високочастотного та ВЧ синусоїдного струму, цілеспрямованим регулюванням частоти якого забезпечується багатократне підвищення величини змінної напруги на навантаженні ЕТС з одночасним зменшенням електроенергії в кожному імпульсі струму.

Такі мобільні та автономні ЕТС повинні здійснювати швидкий моніторинг і діагностику високовольтної електроізоляції безпосередньо на енергооб'єктах і тому мати невеликі масо-габаритні показники та підвищену стійкість до виникнення аварійних режимів під час пробою досліджуваної ізоляції і високу добротність ІСК, величину якої можливо точно регулювати змінням частоти струму в ІСК.

Слід також враховувати, що підвищення частоти струму в ІСК збільшує швидкість керування і стабілізації режимів навантаження та зменшує в ньому імпульсну енергію без змінення їхньої середньої потужності навіть за швидкого зменшення його електричного опору майже до нуля, як при електропробі ізоляції. В той же час введення цілеспрямованого регулювання частоти струму в ІСК може забезпечувати реалізацію найбільшої добротності ІСК і відповідно найбільшої величини напруги на навантаженні ЕТС. Тому під час розробки нової наукової концепції створення високовольтних ЕТС резонансного типу, здатних реалізувати вихідні напруги в десятки кіловольт, використано наступні підходи.

1. Підвищення в тисячі разів частоти $\omega = 2\pi f$ резонансного струму в ІЕК і введення цілеспрямованого регулювання частоти цього струму, яке забезпечує реалізацію найбільшої добротності ІЕК і відповідно найбільшої напруги на навантаженні ЕТС, що порівняно з явищами, виникаючими в ЕТС через протікання в них струмів промислової частоти 50 Гц, призводить до:

а) збільшення швидкодії керування і параметричної стабілізації режимів навантаження ЕТС;

б) пропорційного збільшення у тисячі разів реактивного опору котушки $X_L = \omega L$ (де L – величина її індуктивності);

в) зменшення величини струму та активних втрат електроенергії в котушці;

г) зменшення енергій $W_L = 0,5 LI_L^2$ та $W_C = 0,5 CU_C^2$, які накопичуються в реактивних елементах ІСК і руйнують електроізоляцію через виділення в ній такої енергії під час її електропробою;

д) багатократного підвищення добротності Q_L котушки, оскільки її активний опір R_L зростає не так швидко, як реактивний $X_L = 2\pi fL$, особливо за частотах струму $f < 10$ кГц, за яких ефект витіснення струмів на поверхню є незначним;

е) широкодіапазонного регулювання вихідної напруги ЕТС у разі змінення частоти струму в ІСК менше, ніж на 0,5 кГц (менше 20%), що викликає зменшення втрат в ньому електроенергії та реалізацію найбільш можливих добротності та вихідної напруги ЕТС.

2. *Виготовлення котушок ІСК із багатожильних ізольованих тісно скручених між собою тонких мідних проводів типу "літцендрат", використання яких забезпечує:*

а) суттєве (в одиниці–десятьки разів) підвищення добротності котушки $Q_L = 2\pi fL/R_L$ у разі протікання в її проводі струму частотою $f > 10$ кГц;

б) підвищення в Q_L разів напруги на котушці та конденсаторі у разі протікання в ІСК резонансних струмів, виникаючих за $X_L = 2\pi fL = (2\pi fC)^{-1}$;

в) зменшення в $Q_{ІСК} > 250$ разів напруги і відповідно струму в навантаженні за швидкого зменшення його електричного опору майже до нуля зокрема при електропробі ізоляції).

У даній роботі у разі резонансу напруг в послідовному ІСК вихідна напруга на навантаженні, підключеному до одного з реактивних елементів, є пропорційною добротності $Q_{ІСК}$ (у даній роботі було досягнуто $Q_{ІСК} > 250$, а під час виникнення аварійних режимів, близьких до короткого замикання (КЗ) електричного опору навантаження, напруга і струм в ньому будуть швидко (за час, менший від півперіода змінення резонансного струму в ІСК) параметрично зменшуватися в $Q_{ІСК}$ разів.

Значення добротності $Q_{ІСК}$ в основному визначається добротністю його дроселя, найбільше значення якої у роботах [1, 3–10, 12] було $Q_{ІСК} = 40$. Це дало змогу зменшити у 40 разів потужність живлення установки визначення рівня ЧР в ЗПЕ ізоляції сучасних кабелів на напругу до 400 кВ та величину можливих струмів короткого замикання у разі пробою ізоляції. Проте використання в установці низькочастотних напруг і струмів та відповідних дроселя, автотрансформатора і підвищувального трансформатора не дає можливості отримувати малі масо-габаритні параметри для створення мобільних випробувальних установок. Крім цього, в дроселі установки в роботі [1] використовують магнітопровід з повітряним проміжком, що обмежує діапазон лінійного змінення його індуктивності.

У даній роботі добротність дроселя збільшено до 270 за рахунок підвищення частоти вхідної напруги ІСК, використання проводу типу "літцендрат", в якому суттєво зменшено вплив "поверхневого ефекту" і величина активного опору проводу, та цілеспрямованого регулювання частоти струму в ІСК, що забезпечує реалізацію в ньому найбільшої добротності згідно рекомендацій роботи [40] та найбільшого підвищення величини напруги на навантаженні ЕТС.

У високовольтних резонансних системах бажано використовувати повітряні секціоновані котушки індуктивності, оскільки секціонування збільшує робочу напругу такої котушки та зменшує її власну ємність [40]. Зазвичай використовують від 3 до 8 секцій. У даних дослідженнях автори використовували 2 котушки: першу 4-секційну з індуктивністю 23,2 мГн і активним опором 12,7 Ом – за робочій напрузі до 35 кВ, а другу 8-секційну з індуктивністю 186,5 мГн і активним опором 34,7 Ом – за робочій напрузі до 50 кВ. Обидві котушки добре працювали під час протікання струмів частотою від 5 до 40 кГц. Секції котушок виконувалися з квадратним перерізом та відношенням середнього діаметру до довжини, рівним приблизно трьом, згідно рекомендацій роботи [40], за якими така котушка має найбільше відношення індуктивності до активного опору. Щодо добротності конденсаторів, то сучасні керамічні конденсатори мають добротність в декілька тисяч.

Чим більшою є частота струму, тим швидшим буде керування режимами і захист навантаження, оскільки вони є параметричними, тобто базуються на властивостях резонансного ІСК, і тому тривалість керування і захисту електроізоляції від імпульсного пробою не може бути більшою від півперіоду напруги в ньому, тобто тривалості часу, за який напруга на ізоляції досягне нульового значення. У разі використання струму частотою 50 Гц тривалість півперіоду його змінення становить 10 мс, а за частоти 50 кГц – 10 мкс, тобто час керування режимами і захист від аварійних режимів зменшується в 1000 разів. Крім цього, доза енергії W , що передається у навантаження, за незмінній середній потужності P значно зменшується, якщо частота f збільшується, оскільки $W = P/f$. Таким

чином, у разі збільшення частоти від 50 Гц до 50 кГц ця доза енергії зменшиться в 1000 разів. Крім цього, підвищення частоти струмів в ІСК за незмінній середній потужності ЕТС призводить до передачі в навантаження енергії значно меншими порціями, що підсилює захист ЕТС.

Слід також зауважити, що під час моніторингу високовольтної ізоляції лобових частин турбогенераторів АЕС вимірювані струми витоку не повинні перевищувати значення 0,2 мА у разі прикладання напруги 40 кВ, що відповідає імпульсній потужності ЕТС резонансного типу $P_{\text{імп}} = 8$ ВА. Наразі створення високочастотних (до 100 кГц) інверторів потужністю до 10 ВА, що мають незначні динамічні втрати електроенергії в своїх напівпровідникових ключах, не є проблемою, і такі інвертори вже широко використовуються в імпульсній електротехніці [22–25], що дає змогу достатньо надійно реалізувати нову концепцію створення високочастотних безтрансформаторних ЕТС резонансного типу з цілеспрямованим регулюванням частоти струму в ІСК, що забезпечує найбільше резонансне підвищення величини високочастотної змінної напруги на навантаженні ЕТС. При цьому електроенергія в кожному імпульсі струму буде зменшуватися пропорційно збільшенню частоти струму. Зменшуватися будуть і масо-габаритні показники ЕТС, що дає можливість створювати їх мобільними і автономними.

Тому у даній роботі розроблено нову наукову концепцію створення високовольтних ЕТС резонансного типу на основі реалізації в них послідовних високодобротних ІСК і ВЧ резонансних струмів, здатних викликати багатократне підвищення змінної напруги на реактивних елементах ІСК і на навантаженні, підключеному паралельно до одного з них, та забезпечувати 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, як при електропробі ізоляції.

Вказане багатократне підвищення напруги до 40–70 кВ на виході ЕТС резонансного типу, ІСК яких мають добротності більше 250, не є аварійним режимом, оскільки такі ЕТС спрямовані на вимірювання струмів витоку величиною до 0,2 мА високовольтної ізоляції силових кабелів, турбогенераторів та інших крупних електричних машин. Потужність цих ЕТС не перевищує 20 Вт у разі виникнення на виході ЕТС як короткого замикання, так і розриву, причому робочий режим ЕТС та ІСК по суті є дуже близьким до так званого холостого режиму або розриву вихідного кола ЕТС. Саме для того, щоб такий режим був не аварійним, а контрольованим робочим режимом, нова концепція передбачає використання регулювання частоти струму в ІСК задля реалізації максимальних значень його добротності та вихідної напруги. Для їх зменшення знову ж таки використовується контрольоване регулювання частоти резонансного струму.

Цим нова концепція суттєво відрізняється від відомої концепції, яку представлено в роботах [3–12] і базується на реалізації достатньо потужних ЕТС з ІСК для стабілізації великих низькочастотних синусоїдальних струмів у навантаженні, і для якої реалізація надвисоких добротностей (більше 250) є суттєво аварійним режимом, за якого від вхідного джерела синусоїдної напруги потужність споживання електроенергії буде надвеликою.

Формування резонансних струмів частотою ~ 40 кГц в ІСК, що має виготовлену з багатожильних ізольованих і скручених між собою мідних проводів типу "літцендрат" котушку індуктивністю ~ 25 мГн і добротністю ~ 270 та керамічний конденсатор ємністю $\sim 3,5$ нФ і добротністю > 1000 , забезпечує реалізацію в ІСК добротності $Q_{\text{ІСК}} \sim 260$ та відповідне відношення вихідної напруги ЕТС до вхідної без використання підвищувальних трансформаторів. У разі підключення такого ЕТС до джерела змінної напруги 220 В на виході ЕТС можна формувати напругу до 75 кВ, проте значним зміненням частоти струмів можливо реалізувати вихідну напругу до 40 кВ, як показано на рис. 1.

При цьому в електричних колах ЕТС будуть суттєво (в декілька разів) зменшені втрати електроенергії та її масо-габаритні характеристики. Виникає можливість створення зразків як мобільних (масою до 5 кг), так і автономних – з електроживленням від акумуляторів.

На рис. 1 представлено структурну схему силової частини експериментального зразку такої високовольтної ЕТС резонансного типу.

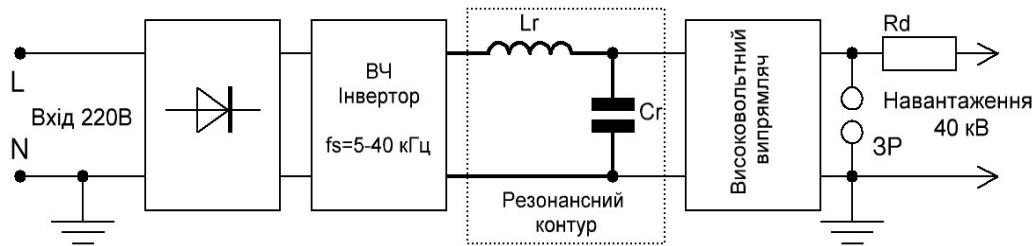


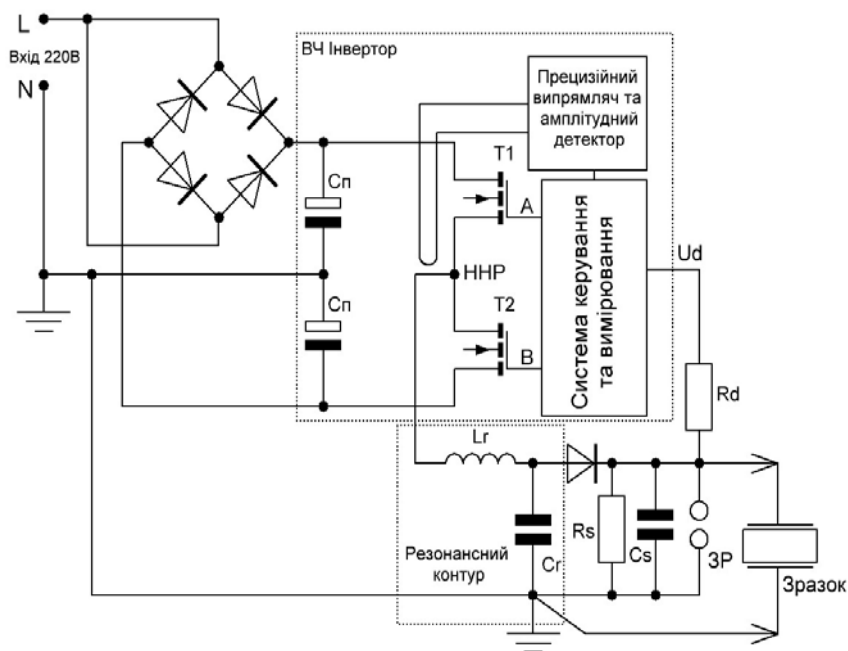
Рис. 1

Таку ЕТС можна підключати до джерела змінної напруги 220 В, яким може бути звичайна електромережа або автономна система електроживлення.

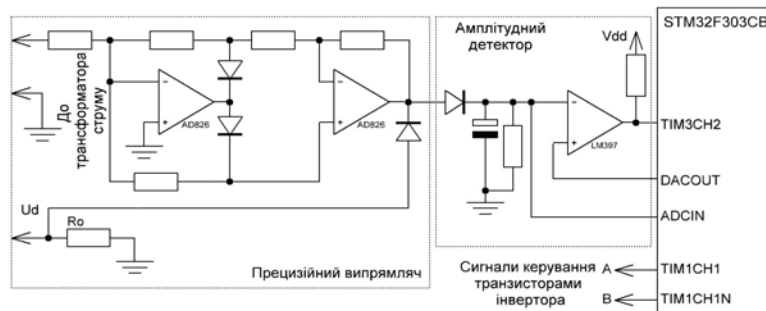
Силова частина ЕТС складається з:

- вхідного випрямляча, на виході якого відбувається подвоєння напруги;
- високочастотного напівмостового інвертора напруги, що формує напруги частотою 5 – 40 кГц;
- резонансний $L_r C_r$ контур;
- високовольтний випрямляч, на виході якого через захисний розрядник ЗР підключається навантаження (зразок ізоляції кабелю, що діагностується).

На рис. 2 показано детальну структурну схему силовій частині експериментального зразку ЕТС (рис. 2, а) і система керування режимами транзисторів інвертора цієї ЕТС (рис. 2, б)



а



б

Рис. 2

Така архітектура схеми зумовлена, по-перше, тим, що один з виходів інвертора має прямий електричний контакт з нейтраллю і заземленням. Тому задля забезпечення режимів роботи ЕТС можна заземлити як резонансний конденсатор C_r , так і навантаження (зразок ізоляції). По-друге, подвійна напруга на силових шинах інвертора дає змогу додатково збільшити максимальну вихідну напругу на виході інвертора (точка ННР) (незалежно від цілеспрямованого підвищення добротності ІСК контуру) та використати конденсатори подвоювача напруги як середню точку напівмосту інвертора.

Система керування інвертором (рис. 2, б) базується на мікроконтролері STM32F303CB. Він використовується для формування сигналів керування транзисторами T1 та T2 інвертора та вимірювання вихідної напруги та струму резонансного контуру.

Оскільки навантаженням ЕТС виступає ізоляція високовольтного кабелю, на схемі її відображено ємністю C_s відрізка кабелю, що діагностується, та опором витoku його ізоляції R_s .

Під час діагностування ізоляції кабелів різного класу напруги необхідно створювати різну вихідну напругу ЕТС. Тому розробка принципу регулювання вихідної напруги такої ЕТС є актуальною задачею.

Авторами проведено дослідження частотної залежності вихідної напруги резонансного послідовного LC контуру з метою її використання для стабілізації та регулювання вихідної напруги такої ЕТС під час діагностування високовольтної ізоляції кабелів різних класів напруги.

На рис. 3 наведено схему для імітаційного моделювання засобами LTSpice безтрансформаторного ЕТС резонансного типу, структурну схему якого показано на рис. 2, а.

Під час моделювання досліджувалися параметри резонансного кола, що відповідають реальним параметрам досліджуваних елементів ІСК: $L_r = 23,2$ мГн, $C_r = 3,47$ нФ, $R_L = 12,7$ Ом. Напруга живлення ЕТС була 20 В. Частота вихідної напруги змінювалася в діапазоні від 17,6 кГц до 18 кГц.

Використовуючи сучасні керамічні конденсатори і котушку, виготовлену з багатожильних ізольованих скручених мідних проводів типу "літцендрат", було отримано добротність резонансного кола ЕТС в діапазоні $Q = 100\text{--}260$ при добротності його елементів: $Q_L = 100\text{--}270$; $Q_C > 1000$.

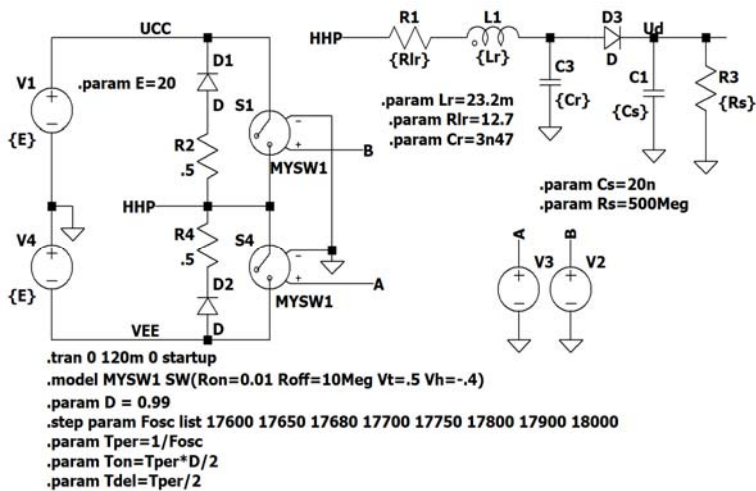


Рис. 3

На рис. 4 наведено результати імітаційного моделювання змінення у часі вихідної напруги ЕТС (напруги $V(u_d)$ на конденсаторі C_s), в залежності від частоти вихідної напруги (частоти переключення транзисторів інвертора T1 та T2).

Аналіз епюр на рис. 4 показує, що вихідну напругу ЕТС (напругу $V(u_d)$ на конденсаторі C_s) можна регулювати в широкому діапазоні, змінюючи її частоту. Так за порівняно незначного (порядку 2–3%) змінення частоти вихідної напруги (від 17,6 кГц до 18 кГц) – величина самої напруги ($V(u_d)$) регулюється в широкому діапазоні (від 5,3 кВ до 600 В, тобто змінюється на 883%). Тому в указаному діапазоні керуванням частотою можна змінити напругу майже на порядок. Таким чином можна створювати різну вихідну напругу ЕТС під час діагностування високовольтної ізоляції кабелів різних класів напруги.

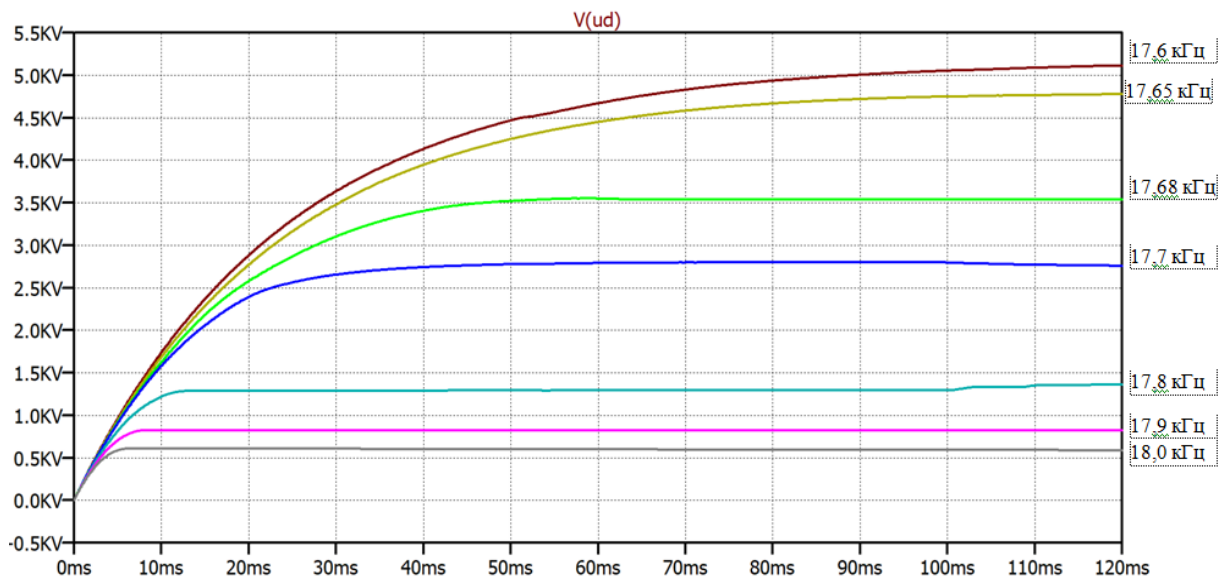


Рис. 4

Оскільки в системі реалізовано зворотній зв'язок по напрузі (через подільник R_d-R_o), то можна використовувати цифровий пропорційно інтегральний диференційний (ПІД) регулятор вихідної напруги частотним способом.

Висновки.

1. Розроблено нову наукову концепцію створення мобільних високовольтних безтрансформаторних електротехнічних систем резонансного типу на основі реалізації в них послідовного високодобротного індуктивно-ємнісного контуру та високочастотного резонансного синусоїдного струму, цілеспрямованим регулюванням частоти якого забезпечується реалізація максимальної добротності індуктивно-ємнісного контуру і максимальне підвищення величини змінної напруги на навантаженні такої електротехнічної системи.

Нова наукова концепція призначена для створення нових мобільних електротехнічних систем резонансного типу, здатних формувати напругу до 75 кВ для моніторингу технічного стану високовольтної ізоляції силових кабелів, потужних електричних машин та інших енергооб'єктів критичної інфраструктури України.

2. Значне збільшення частоти струму в індуктивно-ємнісному контурі забезпечує відповідне зменшення імпульсної електроенергії в навантаженні електротехнічних систем резонансного типу та підвищення швидкодії керування і стабілізації його режимів навіть у разі зменшення його електричного опору до нуля, характерному для пробою високовольтної електроізоляції енергооб'єктів критичної інфраструктури України.

3. Формування резонансних струмів частотою до 50 кГц в індуктивно-ємнісному контурі, що має виготовлену з багатожильних ізольованих і скручених між собою мідних проводів типу "літцендрат" котушку індуктивністю ~ 25 мГн і добротністю ~ 270 та керамічний конденсатор ємністю $\sim 3,5$ нФ і добротністю більше 1000, забезпечує реалізацію в індуктивно-ємнісному контурі добротності $Q_{\text{ІЕК}} \sim 260$ та відповідне відношення вихідної напруги електротехнічних систем до вхідної без використання підвищувальних трансформаторів. При підключенні електротехнічної системи до джерела змінної напруги 300 В на виході мобільної системи масою до 5 кг виникає напруга до 75 кВ. За необхідності така система може бути автономною – з електроживленням від акумуляторів.

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. Золотарев В.М., Щерба М.А., Гурин А.Г., Супруновская Н.И., Чопов Е.Ю., Обозный А.Л. Электротехнологический комплекс производства кабельных систем на напряжение до 400 кВ. К.: Про формат, 2017. 594 с.

2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова (зі змінами). СОУ-Н МЕНВ 40. 1-37471933-49:2011. К.: ДП НЕК Укренерго, 2017. 139 с.

3. Кубышин Б.Е., Миях А.Н. Индуктивно-емкостные устройства для стабилизации тока. *Автоматика и телемеханика*. 1959. Т. XX. № 5. С. 663-668.
4. Миях А.Н., Кубышин Б.Е., Волков И.В. Индуктивно-емкостные преобразователи источников напряжения в источники тока. К.: Наук. Думка, 1964. 304 с.
5. Миях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. К.: Наук. думка, 1974. 216 с.
6. Миях А.Н., Кубышин Б.Е., Хренов К.К., Эсибян Э.М., Волков И.В. Устройство для питания сварочной дуги током. Авт. свид. СССР № 146421. Б.И. 1962. № 8.
7. Миях А.Н., Волков И.В. Слободян Л.Р. Регулирование скорости привода постоянного тока с помощью индуктивно-емкостных преобразователей. *ДАН УССР*. 1967. № 7. С. 23-28.
8. Миях А.Н., Кубышин Б.Е., Волков И.В. Устройство для зарядки аккумуляторов. Авт. свид. СССР № 156986. Б.И. № 17. 1963.
9. Миях А.Н., Кубышин Б.Е., Волков И.В. Устройство для заряда накопительного конденсатора генератора мощных импульсов. Авт. свид. СССР № 169564. Б.И. 1965. № 7.
10. Волков И.В., Липковский К.А., Закревский С.И. Индуктивно-емкостные преобразователи при питании напряжением несинусоидальной формы. Устройства преобразовательной техники. К.: Наук. Думка. 1969.
11. Закревский С.И. Разработка и исследование автономных источников стабилизированного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Киев. 1971. 244 с.
12. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизации схем индуктивно-емкостных преобразователей. К.: Наук. Думка, 1981. 176 с.
13. Лившиц А.Л., Отто М.С. Импульсная электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1983. 352 с.
14. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1982. 400 с.
15. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. К.: Наук. Думка, 1982. 422 с.
16. Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications. Berlin: Springer-Verlag, 2006. Pp. 288–305.
17. Щерба А.А., Иващенко Д.С., Супруновская Н.И. Развитие метода разностных уравнений для анализа переходных процессов в цепях электроразрядных установок при стохастическом изменении сопротивления нагрузки. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 3. С. 3-11.
18. Ochir P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., 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>.
19. 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. DOI: <https://doi.org/1.4868330>.
20. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 3-11.
21. 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>.
22. Вінниченко Д.В. Вплив електричних параметрів високовольтних електророзрядних установок синтезу нановуглецю на їхню продуктивність і питомі енерговитрати. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 95-97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.095>.
23. Vinnychenko D., Nazarova N., Vinnychenko I. Transformerless high-voltage resonant charging systems for capacitive energy storage devices for electro-discharge technologies. 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>.
24. Вінниченко Д.В., Назарова Н.С., Вінниченко І.І. Дослідження характеристик високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 2. С. 17-21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.021>.
25. Sizonenko O.N., Grigoryev E.G., Zaichenko A.D., Pristash N.S., Torpakov A.S., Lipyan Y.V., Kovalenko A.A. Plasma methods of obtainment of multifunctional composite materials, dispersion-hardened by nanoparticles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 130(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/130/1/012048>.
26. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – An overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. Jan. 2001. Vol. 17. No 1. Pp. 14–22.
27. 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.
28. Shahsavarian T., Shahrtash S.M. Modelling of aged cavities for partial discharge in power cable insulation. *IET Sciences, Measurement and Technology*. Sep. 2015. Vol. 9. No 6. Pp. 661–670. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2014.0222>.

29. Eigner A., Rethmeier K. An overview on the current status of partial discharge measurements on AC high voltage cable accessories. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. Mar. 2016. Vol. 32. No 2. Pp. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2016.7414231>.
30. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. Condition monitoring of rotating electrical machines. Institution of Engineering and Technology: 2nd Revised edition, 2008. 304 p. DOI: <https://doi.org/10.1049/PBPO056E>.
31. Зозулін Ю.В., Антонов О.Є., 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.
32. Danikas M.G., Sarathi R. Electrical machine insulation: Traditional insulating material, nanocomposite polymers and the question of electrical trees. *Funktechnikplus J.* 2014. Vol. 1. Pp. 7-32.
33. Титко А.И., Васьковский Ю.Н. Научные основы, методы и средства диагностики асинхронных двигателей. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2015. 300 с.
34. Kazanivsky M. Lazer power supply based on multiphase resonance converters. International Conference on *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*. Lviv, Ukraine, 23-27 February 2010. Pp. 115-115.
35. 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. *IEEE 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>.
36. 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.
37. Warren V.G. Partial discharge testing: a progress report stator winding insulation thermal class. Iris Power, 2015.
38. Xu S., Shen W., Qian Q., Zhu J., Sun W., Li H. An efficiency optimization method for a high frequency quasi-ZVS controlled resonant flyback converter. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Anaheim, CA, USA, 17-21 March 2019. Pp. 2957-2961. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8722026>.
39. Nakao K., Ishida H., Nakao N., Kimura N. Application and verification of an electromagnetic field resonance type wireless power transfer method to mixing blade heated by induction heating. 19th International Conference on *Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*. Dubrovnik, Croatia, 04-06 October 2017. Pp. 159-164. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDPE.2017.8123273>.
40. Калантаров, П.Л., Цейтлин Л.А. Расчёт индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.

SCIENTIFIC CONCEPT FOR THE CREATION OF HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL SYSTEMS OF A RESONANCE TYPE WITH HIGH-SPEED CONTROL AND PARAMETRIC STABILIZATION OF LOAD MODES

A.A. Shcherba, D.V. Vynnychenko, N.I. Suprunovska
 Insitute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,
 Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
 E-mail: anat.shcherba@gmail.com , vdvvs@gmail.com, iednat1@gmail.com.

A new scientific concept has been developed for the creation of high-voltage electro-technical systems (ETS) of a resonant type based on the implementation in them of series high-quality inductive-capacitive circuits (ICC) and high-frequency (HF) resonant currents. This makes it possible to repeatedly increase the alternating voltage on the reactive elements of the ICC and on the load connected in parallel to one of the elements, and to ensure a significant decrease in the impulse energy of the ETS without changing their average power, as well as to increase the speed of control and parametric stabilization of the load modes of the ETS even with a rapid decrease in the electrical resistance of this load to almost zero, as in the case of electrical breakdown of its insulation. The generation of resonant currents with a frequency of up to 40 kHz in the ICC, which has a coil with an inductance of ~ 25 mH and a Q factor up to 270 (made of multi-core twisted copper wires of the " litzendraht " type) and a ceramic capacitor with a capacity of ~ 3.5 nF and a Q factor > 1000, ensures the realization of the Q_{ICC} up to 260 and the corresponding increase in the ratio of the ETS output voltage to the input voltage without the use of step-up transformers. When connecting such an ETS to a source of alternating voltage of 220 V, a voltage of up to 40 kV can be generated at the output of the ETS. A significant increase in the frequency of currents leads to a significant decrease in the mass-dimensional characteristics of ETS and the possibility of creating their samples mobile (weighing up to 5 kg), and if necessary, autonomous, in particular with power supply from batteries. The new scientific concept is aimed at creating a resonance-type ETS for safe and reliable monitoring and diagnostics of the technical condition of high-voltage insulation of power cables, powerful electric machines and other energy objects of the critical infrastructure of Ukraine. Such ETS can also be effectively used for charging to high voltages capacitive energy storage (CES) in technological installations for the production of electro-spark micro- and nano-powders with unique properties, as well as for high-voltage electro-hydro-pulse processing of various materials and environments. It has been established that the power of these ETS increases with a decrease in the ratio of the capacitances of the capacitors ICC and CES. References 40, figures 4.

Key words: electro-technical system, alternating current, inductive-capacitive circuit, series resonance, charge, voltage, discharge, Q factor, high frequency, impulse energy, litzendraht.

1. Zolotarev V.M., Shcherba M.A., Gurin A.G., Suprunovska N.I., Chopov Ye.Yu., Obozny A.L. Electrotechnological complex for the production of cable systems for voltages up to 400 kV. Kyiv: Pro format, 2017. 594 p. (Rus)
2. Design of cable lines with a voltage of up to 330 kV. Standard (with changes). SOU-N MEV 40. 1-37471933-49:2011. Kyiv: SE NEC Ukrenergo, 2017. 139 p. (Ukr)
3. Kubyshyn B.Ye., Milyah A.N. Inductive-capacitive devices for current stabilization. *Avtomatyka i telemekhanika*. 1959. Vol. XX. No 5. Pp. 663-668. (Rus)
4. Milyah A.N., Kubyshyn B.Ye., Volkov I.V. Inductive-capacitive converters of voltage sources to current sources. Kyiv: Naukova dumka, 1964. 304 p. (Rus)
5. Milyah A.N., Volkov I.V. Unchangeable current systems based on inductive-capacitive converters. Kyiv: Naukova dumka, 1974. 216 p. (Rus)
6. Milyah A.N., Kubyshyn B.Ye., Hrenov K.K., Esibian E.M., Volkov I.V. A device for feeding a welding arc with current. USSR Author's Certificate No 146421. Bulletin. 1962. No. 8. (Rus)
7. Milyah A.N., Volkov I.V. Slobodian L.R. DC Drive Speed Control Using Inductive-Capacitive Converters. *DAN USSR*. 1967. No 7. Pp. 23–28. (Rus)
8. Milyah A.N., Kubyshyn B.Ye., Volkov I.V. Battery charging device. USSR Author's Certificate No 156986. Bulletin. 1963. No 17. (Rus)
9. Milyah A.N., Kubyshyn B.Ye., Volkov I.V. Device for charging the storage capacitor of a high-power pulse generator. USSR Author's Certificate No. 169564. Bulletin. 1965. No 7. (Rus)
10. Volkov I.V., Lipkovsky K.A., Zakrevsky S.I. Inductive-capacitive converters when powered by non-sinusoidal voltage. Converter technology devices. Kyiv: Naukova dumka, 1969. (Rus)
11. Zakrevskii S.I. Development and research of autonomous sources of stabilized current based on inductive-capacitive converters. Ph.D. tech. sci. diss. Kiev. 1971. 244 p. (Rus)
12. Volkov I.V., Gubarevich V.N., Isakov V.N., Kaban V.P. Principles of construction and optimization of inductive-capacitive converter circuits. Kyiv: Naukova dumka, 1981. 176 p. (Rus)
13. Livshits A.L., Otto M.S. Pulse electrical engineering. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 352 p. (Rus)
14. Popilov L.Ya. Electrophysical and electrochemical processing of materials. Moskva: Mashinostroenie, 1982. 400 p. (Rus)
15. Pentegov I.V. Fundamentals of the theory of charging circuits of capacitive energy storage devices. Kyiv: Naukova Dumka, 1982. 422 p. (Rus)
16. Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications. Berlin: Springer-Verlag, 2006. Pp. 288–305.
17. Shcherba A.A., Ivashchenko D. S., Suprunovska N.I. Development of difference equations method for analysis of transient processes in the circuits of electro-discharge systems at stochastic changing of load resistance. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 3. Pp. 3–11. (Rus)
18. Ochin P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., 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> .
19. 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. DOI: <https://doi.org/1.4868330> .
20. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 4. Pp. 3–11. (Rus)
21. 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> .
22. Vinnychenko D.V. The influence of electrical parameters of high-voltage electric discharge units for the synthesis of nanocarbon on their productivity and specific energy consumption. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 4. Pp. 95–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.095> . (Ukr)
23. Vinnychenko D., Nazarova N., Vinnychenko I. Transformerless high-voltage resonant charging systems for capacitive energy storage devices for electro-discharge technologies. 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> .
24. 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. 17–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.021> . (Ukr)
25. Sizonenko O.N., Grigoryev E.G., Zaichenko A.D., Pristash N.S., Torpakov A.S., Lipyan Y.V., Kovalenko A.A. Plasma methods of obtainment of multifunctional composite materials, dispersion-hardened by nanoparticles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 130(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/130/1/012048> .

26. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – An overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. Jan. 2001. Vol. 17. No 1. Pp. 14–22.
27. 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.
28. Shahsavarian T., Shahrtash S.M. Modelling of aged cavities for partial discharge in power cable insulation. *IET Sciences, Measurement and Technology*. Sep. 2015. Vol. 9. No 6. Pp. 661–670. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2014.0222> .
29. Eigner A., Rethmeier K. An overview on the current status of partial discharge measurements on AC high voltage cable accessories. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. Mar. 2016. Vol. 32. No 2. Pp. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2016.7414231>.
30. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. Condition monitoring of rotating electrical machines. Institution of Engineering and Technology: 2nd Revised edition, 2008. 304 p. DOI: <https://doi.org/10.1049/PBPO056E>.
31. Zozulin Y.V., Antonov O.E., Bychik V.M., Borychevskiy A.M., Kobzar K.O., Livshits O.L., Rakogon V.G., Rogovy I.X., Khaymovich L.L., Cherednyk V.I. Creation of new types and modernization of existing turbine generators for thermal power stations. Kharkiv: PF Kolegium, 2011. 228 p. (Ukr)
32. Danikas M.G., Sarathi R. Electrical machine insulation: Traditional insulating material, nanocomposite polymers and the question of electrical trees. *Funktechnikplus J*. 2014. Vol. 1. Pp. 7-32.
33. 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)
34. Kazanivsky M. Lazer power supply based on multiphase resonance converters. International Conference on *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*. Lviv, Ukraine, 23-27 February 2010. Pp. 115-115.
35. 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. *IEEE 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>
36. 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)
37. Warren V.G. Partial discharge testing: a progress report stator winding insulation thermal class. Iris Power, 2015.
38. Xu S., Shen W., Qian Q., Zhu J., Sun W., Li H. An efficiency optimization method for a high frequency quasi-ZVS controlled resonant flyback converter. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Anaheim, CA, USA, 17-21 March 2019. Pp. 2957-2961. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8722026>
39. Nakao K., Ishida H., Nakao N., Kimura N. Application and verification of an electromagnetic field resonance type wireless power transfer method to mixing blade heated by induction heating. 19th International Conference on *Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*. Dubrovnik, Croatia, 04-06 October 2017. Pp. 159-164, DOI: <https://doi.org/10.1109/EDPE.2017.8123273>.
40. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. Calculation of inductances. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 488 p. (Rus)

Надійшла 04.12.2023
Остаточний варіант 27.03.2024