

Вплив паразитних ємностей на точність масштабного перетворення високовольтних подільників напруги

В роботі розглянуто вплив будови високовольтного плеча подільника напруги на його характеристики. Для забезпечення зменшення впливу паразитних ємностей конструктивних елементів на зосереджені елементи активної частини та на зовнішні об'єкти досліджено методи екранування зосереджених елементів. Математичним моделюванням визначено вплив співвідношення геометричних параметрів конструкційних елементів високовольтного плеча на похибку масштабного перетворення напруги в області високих частот. В результаті моделювання обрано спосіб екранування зосереджених елементів активної частини подільника напруги з використанням багатошарової ізоляції конденсаторного типу, яка забезпечує стабільність похибки масштабного перетворення напруги в широкому діапазоні частот. Запропоновані зміни в будові високовольтного плеча дозволяють перейти на модульну будову подільника напруги і перейти до його серійного виробництва. Бібл. 23, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: високовольтний подільник напруги, паразитні ємності, точність масштабного перетворення.

Постановка проблеми. Високовольтні подільники напруги є поширеними масштабними перетворювачами напруги, які застосовуються як у мікроелектроніці, так і у високовольтних випробувальних та дослідницьких лабораторіях. Проте, дані електротехнічні пристрої не використовуються масово в електроенергетиці, зокрема, в електроустановках високої напруги, оскільки їхня будова не дозволяє позбутися ряду недоліків, які ускладнюють їх інтеграцію у аналогові чи цифрові підстанції в якості широкосмугових масштабних перетворювачів високої напруги [1]. Наприклад, в лабораторних умовах отримують для високовольтних подільників напруги похибки масштабного перетворення напруги в широкому діапазоні частот порядку 0.1, однак при цьому будова такого подільника напруги є складною і не придатною до вітрових навантажень, опадів та перепадів температур. На відкритих розподільних пристроях наявність поблизу подільника напруги об'єктів, що знаходяться під іншим потенціалом (або заземлені) суттєво впливають на паразитні ємності його високовольтного плеча. Паразитні ємності на такі об'єкти суттєво впливають на точність масштабного перетворення напруги на високій частоті. Також на коефіцієнт масштабного перетворення подільника напруги впливають температурні залежності комплексних опорів зосереджених елементів високовольтного плеча. Крім того, виготовлення високовольтних подільників напруги під конкретні задачі замовника ускладнює створення уніфікованої системи масового виробництва такого обладнання. Це обмежує можливість суттєво покращити визначення показників якості електроенергії, безпеку та автоматизацію процесів на високовольтних об'єктах. З цих та інших причин високовольтні подільники напруги досі не знайшли застосування як масштабні перетворювачі високої напруги в широкому діапазоні частот. Вони не змогли замінити, навіть частково, існуючі електромагнітні трансформатори напруги на високовольтних підстанціях. Це стосується, зокрема, визначення показників якості електроенергії, окремі з яких суттєво спотворюються електромагнітними осердями трансформаторів.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Найпростіший за будовою високовольтний подільник напруги складається з двох послідовно з'єднаних ділянок кола зосереджених елементів: високовольтного та низьковольтного плечей. Кожне з плечей являє собою ділянку, що складається з одного або більше послідовно з'єднаних зосереджених елементів (будова низьковольтного плеча може бути суттєво різною, в залежності від призначення подільника напруги) [1, 2]. Принцип ді-

лення напруги полягає в тому, що повна напруга, яку необхідно пропорційно розподілити, прикладається до послідовно з'єднаних плечей подільника напруги і розподіляється між зосередженими елементами пропорційно їх комплексним опорам. Цей принцип розподілення напруги використовується як для функціонального розподілу напруги (наприклад, у високовольтних повітряних вимикачах на надвисокі напруги для ділення довгої електричної дуги на ряд коротких дуг з метою ефективнішого їх гасіння), так і з метою вимірювання високої напруги шляхом приєднання вимірювальних пристроїв паралельно до кола низьковольтного плеча.

Для вимірювання високої напруги високовольтне плече подільника напруги має складатися не тільки з ланки зосереджених елементів активної частини, а й з високовольтної ізоляції та арматури, яка утримує ці зосереджені елементи. На вимірювання постійної напруги високовольтна ізоляція та арматура практично не впливають, відповідно, для вимірювання високої постійної напруги достатньо забезпечити високовольтне та низьковольтне плечі подільника напруги якісними прецизійними зосередженими елементами (резисторами), які забезпечать необхідний коефіцієнт масштабного перетворення, у відповідності до формули:

$$K_d = \frac{U}{U_{LV}} = \frac{R_{HV} + R_{LV}}{R_{LV}} = 1 + \frac{R_{HV}}{R_{LV}}, \quad (1)$$

де U – вимірювана висока напруга; U_{LV} – напруга на низьковольтному плечі; R_{HV} – сумарний активний опір ділянки зосереджених елементів високовольтного плеча; R_{LV} – сумарний активний опір ділянки зосереджених елементів низьковольтного плеча.

Однак, якщо подільник напруги застосовується для вимірювання напруги, яка змінюється із часом (синусоїдна напруга, перехідні процеси тощо), будова плечей подільника напруги суттєво ускладнюється. В колах змінного струму, особливо, зі збільшенням частоти або швидкоплинності перехідних процесів, зростає вплив реактивних складових елементів електричних кіл [2–4]. Виникає необхідність враховувати не тільки розподіл напруги між зосередженими елементами плечей подільника напруги, а й по паразитних ємностях і індуктивностях, які є невід'ємними складовими будь-яких зосереджених елементів електричного кола, а також складовими конструкційних елементів його плечей. В сучасних високовольтних подільниках напруги, розрахованих на вимірювання змінної напруги і перехідних процесів (широкосмугові подільники напруги) будова високовольтної ізоляції та арматура утворюють складні системи паразитних ємностей на сусідні зосереджені елементи, на заземлені елементи конструкції та сусідні об'єкти, що пере-

бувають під іншим потенціалом. В сучасних конструкціях подільників напруги застосовується метод екранування зосереджених елементів високовольтного та низьковольтного плечей з метою зменшення впливу паразитних ємностей на розподіл напруги між різними ділянками загального електричного кола активної частини. Також використовуються великогабаритні ємнісні екрани, призначені для регулювання розподілу електричного поля. В роботах [4–10] запропоновані різноманітні конструкційні рішення будови високовольтного плеча подільника напруги, які дозволяють частково зменшувати вплив паразитних ємностей (до певного рівня частот вхідної напруги). Як правило, для цього використовуються розташовані паралельно екранувальні провідні диски, які між собою утворюють розподіл електричного поля, близький до однорідного, а між площинами цих дисків розташовують ділянки кола зосереджених елементів активної частини подільника напруги, поділяючи таким чином високовольтне коло на ряд екранованих секцій. Екранувальні диски та опорні ізолятори утворюють арматуру, яка утримує у певному просторовому положенні зосереджені елементи високовольтного плеча подільника напруги. Наслідком такої будови є поява додаткових паразитних ємностей (між екранувальними дисками), які утворюють високовольтне ємнісне (екранувальне) коло, яке паралельне до кола зосереджених елементів високовольтного плеча. Зосереджені елементи кола високовольтного плеча матимуть паразитні ємності на екрануючі диски. Чим більшими будуть різниці в розподілі потенціалів між зосередженими елементами та екранувальними дисками, тим більшими будуть паразитні ємнісні струми між зосередженими елементами та цими дисками (особливо, на високій частоті прикладеної напруги).

Для аналізу впливу будови високовольтного плеча подільника напруги на його частотні характеристики дослідники пропонують як методи прямих вимірювань [10–15] з використанням високоточних та еталонних вимірювальних засобів, так і аналітичні методи або чисельне моделювання [15–22], що дозволяють прогнозувати характеристики проєктованих подільників напруги або пояснювати фактичні виміряні параметри для подальшого удосконалення будови подільників напруги.

В усіх розглянутих публікаціях визнається суттєвим вплив паразитних ємностей як зосереджених елементів активної частини, так і конструкційних складових будови подільника напруги як на зовнішні об'єкти так і між собою. Проте, визнаючи значущість впливу паразитних ємностей на точність масштабного перетворення подільників напруги на високій частоті, у розглянутих публікаціях дослідники пропонують різні схеми та просторове розташування зосереджених елементів активної частини, не приділяючи значної уваги будові екранувальних ділянок високовольтного плеча (в основному, такі дослідження розглядають будову і просторове розташування високовольтних великогабаритних екранів). Оскільки будова високовольтного плеча подільника напруги має значний вплив на розподіл напруги по зосереджених елементах активної частини, важливим є пошук конструкційних рішень, які б дозволили поєднувати механічні та екранувальні функції в широкому діапазоні частот.

Метою роботи є аналіз будови високовольтного плеча подільника напруги та виявлення чинників, що впливають на точність масштабного перетворення напруги в широкому діапазоні частот при наявності в колі високовольтного плеча паразитних ємностей.

Аналіз будови високовольтного плеча подільника напруги. Для подолання описаних вище наслідків наявності паразитних ємностей між зосередженими елементами високовольтного плеча та поверхнями, що перебувають під іншим потенціалом, існують декілька варіантів будови високовольтного плеча. Крім розглянутого вище методу екранування секцій зосереджених елементів високовольтного плеча подільника напруги за допомогою провідних екранувальних дисків використовують паралельні кола зосереджених екранувальних елементів, які розташовують додатково між екранувальними дисками з метою збільшення провідності між ними і, як наслідок, зменшення впливу витоку ємнісних струмів з цих дисків на поверхні, що перебувають під іншим потенціалом. Застосовують як шунтування резисторами, так і шунтування конденсаторами або мішаним RC -з'єднанням екранувальних дисків. Зменшувати величину активних опорів екранувального кола можна лише до певних меж: при занадто малому загальному опорі екранувального кола високовольтного плеча подільника напруги по ньому протікатимуть значні струми і виділятиметься у вигляді тепла значна енергія, що впливатиме на стабільність характеристик кола. Крім створення надлишкового навантаження на джерело така енергія може викликати не тільки нагрів зосереджених елементів екранувального кола, а й елементів вимірювального кола, зменшуючи стабільність цих опорів.

На рис. 1 представлена спрощена схема заміщення високовольтного подільника напруги у якого низьковольтне плече представлено одним, а високовольтне – трьома послідовно з'єднаними високовольтними високоомними малоіндуктивними резисторами однакового номіналу ($R1 - R4$). Паразитні індуктивності цих резисторів представлені елементами $L1 - L4$. Висока напруга від джерела $V1$ прикладена до всього подільника напруги, а вимірюється на низьковольтному плечі вимірювачем U_{VN} , внутрішній опір якого при моделюванні розглядається як нескінченний. За відсутності паразитних ємностей та ідентичності резисторів $R1 - R4$ напруга на низьковольтному плечі мала б, у відповідності до (1), дорівнювати 25 % від вхідної напруги високовольтного джерела $V1$. Ємності $C1 - C4$ на рис. 1 є паразитними ємностями, які виникають між екранувальними дисками, що утворюють секції подільника напруги і паралельним екранувальним ємнісним колом. До цих ємностей послідовно також додано паразитні індуктивності $L5 - L8$, які відносяться до екранувального ємнісного кола, якщо в цьому колі між екранувальними дисками додатково встановлюються конденсатори для збільшення ємності в цьому колі. Паразитні ємності $C5 - C6$ виникають між екранувальними дисками та високовольтним електродом (як правило, ці ємності мають дуже незначні значення); паразитні ємності $C7 - C8$ виникають між екранувальними дисками та заземленими поверхнями і, як правило, мають значення до одиниць пікофарад (рідше бувають більшими). Паразитні ємності $C9 - C11$ виникають між зосередженими елементами вимірювального кола подільника напруги та екранувальними дисками екранувального кола. Схема 1 не враховує всіх паразитних ємностей і індуктивностей високовольтного подільника напруги і розглядає незначну кількість секцій, проте дозволяє розглянути принцип співвідношення між основними і паразитними характеристиками як зосереджених, так і конструкційних елементів у його складі.

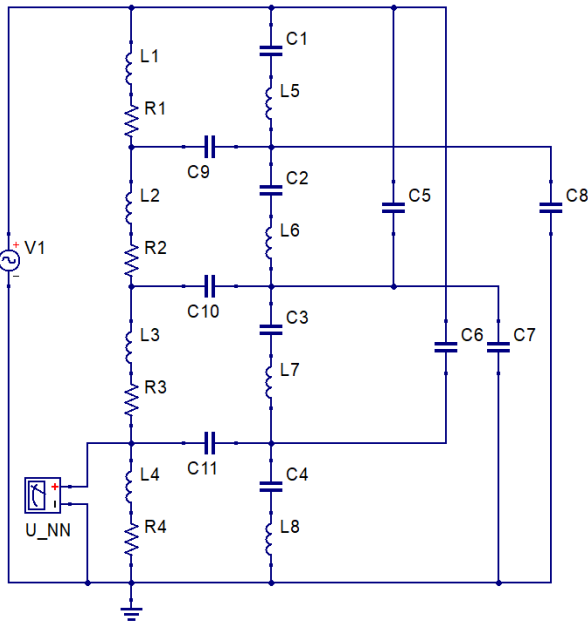


Рис. 1. Принципова схема заміщення подільника напруги з урахуванням паразитних ємностей та індуктивностей

Для чисельного оцінювання характеристик зосереджених та паразитних елементів схеми за рис. 1 розглянемо можливість використання малопотужних високовольтних резисторів в активній частині подільника напруги. Як правило, при використанні малопотужних резисторів, струм в активній частині обмежують до порядку 1 мА. Припустимо, що амплітуда прикладеної напруги джерела V1 становить 10 кВ. Відповідно, наближено можна оцінити загальний вхідний опір подільника напруги за законом Ома (нехтуючи незначними за величиною індуктивними опорами) як 10 МОм. Відповідно, резистори R1 – R4 матимуть номінальні опори 2.5 МОм. Паразитні ємності, які виникають між екранувальними дисками екранувальної частини кола подільника напруги можна оцінити наближено за формулою плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \pi \cdot (R_2^2 - R_1^2)}{d}, \quad (2)$$

де ϵ_0 – електрична стала; ϵ – відносна діелектрична проникність діелектрика (якщо діелектриком є повітря, наближено можна вважати $\epsilon = 1$); d – відстань між паралельно розташованими дисками; R_2 – зовнішній радіус екранувального диска; R_1 – радіус внутрішнього отвору в екранувальному диску (призначений для розташування вимірювального кола зосереджених елементів).

Згідно (2), якщо прийняти $R_1 = 3$ см, $R_2 = 10$ см, $d = 1$ см, одержуємо $C \approx 25$ пФ. Паразитні індуктивності резисторів L1 – L4 можна прийняти рівними 10 нГн (для малоіндуктивних резисторів). Паразитні ємності зосереджених елементів вимірювального кола C9 – C11 можна наближено прийняти рівними 1 пФ (ці ємності є незначними і залежать від габаритних розмірів резисторів). Паразитні індуктивності L5 – L8 можуть бути закорочені за відсутності шунтуючих конденсаторів між екранувальними дисками, або матимуть дуже незначне значення при використанні імпульсних конденсаторів (наприклад, типу РНЕ-450 або аналогічних), тому, в першому наближенні, ці індуктивності в схемі можна прийняти рівними 1 нГн. Паразитні ємності C5 – C6 можна визначити тільки шляхом математичного моделювання чисельними

методами задачі електростатики, з урахуванням конкретної геометрії екранувальних дисків. Це саме стосується і паразитних ємностей C7 – C8. Як правило, ємності на заземлені поверхні є кратно більшими за відповідні ємності на високовольтний електрод. Згідно виконаного математичного моделювання задачі електростатики в програмному пакеті FEMM для геометрії екранувальних дисків, використаної для розрахунків за (2), можна визначити наближено значення цих ємностей: $C5 \approx 3$ пФ; $C6 \approx 1.5$ пФ; $C8 \approx 5$ пФ; $C7 \approx 7$ пФ (якщо товщину екранувальних провідних дисків прийняти рівною 5 мм).

Математичне моделювання електричного кола за рис. 1 в програмному пакеті схемотехнічного моделювання QUCS в задачі синусоїдного змінного струму в діапазоні від 100 Гц до 1 МГц з дискретизацією в 5000 точок дає графік залежності напруги на низьковольтному плечі (рис. 2).

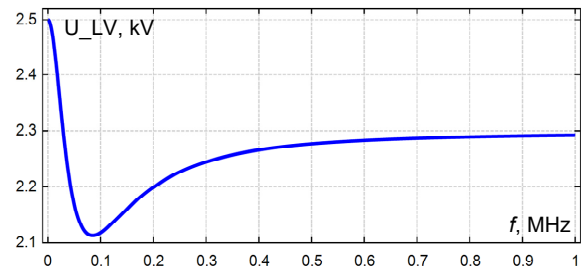


Рис. 2. Залежність напруги на низьковольтному плечі подільника напруги від частоти при ємностях в екранувальному колі 25 пФ

Даний графік показує максимальні розбіжності (в розглянутому діапазоні частоти f) вихідної напруги U_{LV} подільника напруги від номінальної (2.5 кВ) порядку 15 %, що є неприйнятним для масштабного перетворення високої напруги з метою визначення показників якості електроенергії. Якщо збільшити величину ємностей екранувального кола до 10 нФ, аналогічне моделювання в програмному пакеті QUCS дає графік залежності вихідної напруги, показаний на рис. 3.

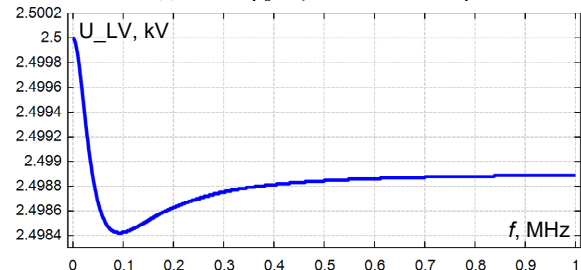


Рис. 3. Залежність напруги на низьковольтному плечі подільника напруги від частоти при ємностях в екранувальному колі 10 нФ

Аналізуючи графік за рис. 3 можна бачити, що максимальні відхилення вихідної напруги становлять менше за 0.1 % в діапазоні частоти f від 1 Гц до 1 МГц, що можна вважати прийнятним для використання такого подільника напруги при вимірюванні всіх показників якості електроенергії на високій напрузі. При розширенні діапазону вхідних частот до 50 МГц результат аналізу дає графік, зображений на рис. 4.

Розширений діапазон частот, в якому зберігається висока точність масштабного перетворення високої напруги є наслідком того, що ємності в екранувальному колі суттєво шунтують паразитні ємності екранувальних дисків, причому, паразитні провідності екранувального кола і паразитні провідності екранувальних

дисків на поверхні, що перебувають під іншим потенціалом, з частотою зростають пропорційно. Відповідно, на високих частотах входної напруги найбільшими чинниками, що впливають на точність масштабного перетворення напруги, залишаються паразитні індуктивності L1 – L4 та паразитні ємності C9 – C11.

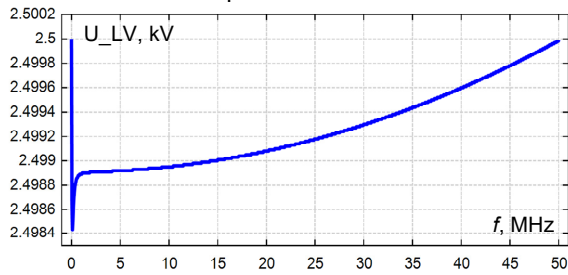


Рис. 4. Залежність напруги на низьковольтному плечі подільника напруги від частоти при ємностях в екранувальному колі 10 нФ в діапазоні від 100 Гц до 50 МГц

Насправді, якщо зазначені паразитні індуктивності залежать виключно від технології виробництва високовольтних прецизійних резисторів (або інших зосереджених елементів вимірювального кола), зазначені паразитні ємності є залежними від взаємного просторового розташування зосереджених елементів вимірювального кола та екранувальних дисків. На рис. 1 зосереджені елементи практично не мають паразитних ємностей на заземлені поверхні та поверхні, що перебувають під іншим потенціалом. Така ситуація можлива виключно в тому випадку, якщо значним є співвідношення між діаметрами екранувальних дисків та відстанями між ними по висоті, коли екранування практично виключає потрапляння зовнішніх електричних полів в область розташування зосереджених елементів вимірювального кола.

Якщо змоделювати математично і чисельно розрахувати розтікання струмів у вимірювальному та екранувальному колах високовольтного подільника напруги (в програмах, що використовують метод скінченних елементів) на частоті 1 МГц (форма фронту стандартного повного грозового імпульсу, який є найбільш швидкоплинним перехідним процесом, який визначається серед показників якості електроенергії, відповідає синусоїді частотою близько 250 кГц) для геометрії електродів та номінальних значень зосереджених елементів, згідно яких одержані дані моделювання в програмному пакеті QUCS за рис. 2 (без застосування шунтуючих конденсаторів), можна одержати результати, подібні зображенням на рис. 5.

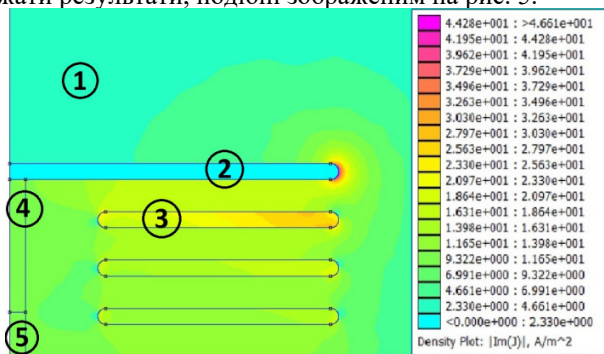


Рис. 5. Результат моделювання розподілу густини струмів у математичній моделі подільника напруги, виконані в програмному пакеті FEMM

Моделювання в програмному пакеті FEMM виконувалось у вісесиметричній системі координат за розв'язком рівняння, яке походить з системи рівнянь Максвелла:

$$-(\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon) \cdot \nabla^2 V = 0, \quad (3)$$

де σ – провідність середовища; ϵ – відносна діелектрична проникність середовища; ω – кутова частота струму; V – електричний потенціал.

На рис. 5 позначені: 1 – область повітря з відносною діелектричною проникністю $\epsilon = 1$; 2 – високовольтний електрод, на який подається синусоїдна напруга амплітудою 10 кВ і частотою 1 МГц; 3 – екранувальні диски; 4 – активний опір високовольтного плеча, модельований циліндром з геометрією та провідністю, що забезпечують його опір на постійній напрузі 7.5 МОм; 5 – активний опір низьковольтного плеча, модельований циліндром з геометрією та провідністю, що забезпечують його опір на постійній напрузі 2.5 МОм. Область розрахунків обмежувалась сферичною заземленою поверхнею радіусом, що в 10 разів перевищував зовнішній радіус екранувальних дисків. Внаслідок неоднакового розподілу потенціалів у вимірювальному колі (високовольтному і низьковольтному плечах) подільника напруги і вертикально вздовж торцевих поверхонь екранувальних дисків, між дисками і бічною поверхнею резисторів вимірювального кола утворюється різниця потенціалів, яка за наявності паразитних ємностей призводить до появи ємнісних струмів, що збільшуються з частотою прикладеної напруги, що можна бачити за кольоровим розподілом на рис. 5. Максимальні значення густини ємнісного струму відповідають заокругленому торцю високовольтного електроду і становлять близько 110 А/м². При цьому, інтегральні значення ємнісних струмів крізь бічну поверхню резистора і крізь горизонтальні поверхні екранувальних дисків відрізняються в десятки разів на частоті 1 МГц (струм крізь бічну поверхню резистора складає близько 20 мА; струм крізь горизонтальні поверхні екранувальних дисків зменшується зі зменшенням потенціалу диску і, усереднено, становить близько 400 мА). Наявність витoku ємнісних струмів крізь бічну поверхню резисторів вимірювального кола призводить до того, що струм, який заходить у це коло з високовольтного електроду не дорівнює струму, який виходить з резисторів низьковольтного плеча подільника напругу в заземлений електрод. При цьому, точки на бічній поверхні резисторів вимірювального кола, які відповідають за висотою найбільш наближеним до них точкам на поверхнях екранувальних дисків, мають більший потенціал для резистора, позначеного 4 за рис. 5, і менший потенціал для резистора, позначеного 5 за рис. 5. Внаслідок цього, крізь частину бічної поверхні резисторів вимірювального кола ємнісні струми витікають, а через якісь ділянки – втікають в резистори. При забезпеченні рівності потенціалів екранувальних дисків та відповідних їм точок на бічних поверхнях резисторів активної частини можна вирівняти кількісно струми, що втікають і витікають крізь бічні поверхні резисторів активної частини, фактично, позбуваючись впливу ємнісних струмів на процеси в активній частині подільника напруги.

Математичне моделювання. Обчислення в програмному пакеті FEMM запропонованої математичної моделі подільника напруги дозволяє одержати чисельні значення струмів на вході у резистор високовольтного плеча та на виході з резистора низьковольтного плеча інтегруванням густини струму через відповідні торцеві поверхні резисторів. Також результат моделювання дозволяє оцінювати електричний потенціал як на поверхнях екранувальних дисків, так і на бічних поверхнях резисторів активної частини.

Модель за рис. 5 побудована виходячи з зовнішніх радіусів високовольтного електрода та екранувальних дисків 100 мм. Якщо збільшувати зовнішні радіуси електродів і дисків, залишаючи відстань між ними незмінною, будуть збільшуватись ємності екранувального кола (між екранувальними дисками), а паразитні ємності екранувальних дисків на високовольтний електрод та на заземлені поверхні залишатимуться майже незмінними. Внаслідок цього, в схемі за рис. 1 ємності С1 – С4 зростатимуть, у відповідності до (2). При значних ємностях у екранувальному колі струм крізь цю гілку електричного кола буде призводити до майже рівномірного розподілу потенціалів між цими дисками, внаслідок чого торці екранувальних дисків, які наближені до бічних поверхонь резисторів вимірювального кола, матимуть потенціали, що близькі до потенціалів, розподілених по поверхнях резисторів вимірювального кола. Однаковий (або близький до однакового) розподіл потенціалів вздовж наближених поверхонь буде призводити до того, що крізь утворені цими поверхнями паразитні ємності протікатимуть незначні ємнісні струми (або струми, що витікають з бічної поверхні будуть близькими до струмів, що втікають в цю поверхню) внаслідок малої різниці потенціалів. Звісно, що за значних величин відношень зовнішніх радіусів екранувальних дисків до відстані між ними (R/d) паразитні ємності бічних поверхонь резисторів вимірювального кола на заземлені поверхні настільки малі, у порівнянні з ємностями між дисками екранувального кола, що ними можна нехтувати.

В табл. 1 наведено результати моделювання, при якому параметри моделі залишались незмінними, у відповідності до зазначених для рис. 5, крім зовнішніх радіусів високовольтного електрода та екранувальних дисків, які збільшувались. Похибка масштабного перетворення опосередковано визначалась через різницю струмів, які входять в активну частину вимірювального кола з торця резистора, та які виходять з нього, у відповідності до виразу:

$$\Delta = \frac{I_{HV} - I_{LV}}{I_{HV}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Таблиця 1

Результати моделювання впливу збільшення радіусів екранувальних дисків на величину паразитних ємнісних струмів у вимірювальному колі

R/d	I_{HV} , mA	I_{LV} , mA	Δ , %
10	1,456	1,189	18,342
20	1,386	1,25	9,763
30	1,36	1,272	6,45
40	1,348	1,284	4,759
50	1,341	1,288	3,976
60	1,336	1,293	3,233
70	1,333	1,297	2,712
80	1,33	1,3	2,276
90	1,329	1,301	2,137
100	1,328	1,301	2,065
200	1,322	1,303	1,403
300	1,319	1,303	1,158

В табл. 1 визначались струм на вході у високовольтне плече I_{HV} , струм на виході з низьковольтного плеча I_{LV} та різниця Δ між ними у відсотках.

Результати розрахунків, представлені в табл. 1 свідчать про те, що відсоток паразитних ємнісних струмів зменшується за експоненційною залежністю від кратності відношення зовнішніх радіусів екранувальних дисків до відстаней між ними. Проте, також можна бачити, що навіть за зовнішніх радіусів екранувальних дисків близь-

ко 3 м ємнісні струми все ще складають близько 1 % від загального струму, що протікає у вимірювальному колі. Однак, виготовлення таких секційованих конструкцій високовольтного подільника напруги є не тільки неприйнятним з масогабаритних показників, а й практично нездійсненним з точки зору механічної міцності. Крім того, оскільки екранувальні диски мають певну товщину, яка є співставною з відстанню між сусідніми дисками, торцеві ділянки дисків, які наближені до бічних поверхонь резисторів вимірювального кола, мають близький до однакового потенціал по товщині торців, в той час як бічна поверхня резистора, наближеного до внутрішніх торців екранувальних дисків, має розподіл потенціалу близький до лінійного, який змінюється вздовж висоти, що відповідає товщині диска. Внаслідок цього навіть нескінченне збільшення співвідношення R/d не призведе до зменшення витоку ємнісних струмів до нуля.

Просте конструкційне рішення стосовно високовольтного плеча подільника напруги (також це рішення може бути застосоване і до низьковольтного плеча подільника напруги) полягає в тому, щоб одночасно збільшувати співвідношення R/d та зменшувати товщину екранувальних дисків. Це рішення описане в [23]. Сутність рішення полягає в тому, щоб замість секціонування ділянок високовольтного плеча екранувальними дисками з газовою або рідинною ізоляцією між ними використовувати між екранувальними дисками ізоляцію конденсаторного типу з тонкими прошарками твердого (рідинного, газоподібного) діелектрику та тонкими шарами провідної фольги між ними. Така будова ізоляції високовольтного плеча подільника напруги практично унеможливило проникнення зовнішніх електричних полів в область розташування зосереджених елементів вимірювального кола подільника напруги, внаслідок чого такий подільник напруги стає мінімально чутливим до паразитних ємностей конструктивних складових високовольтного плеча на зовнішні об'єкти та на сусідні секції.

Ще одна перевага застосування конденсаторної ізоляції між екранувальними дисками полягає в тому, що зменшується площа поверхні електродів, на яких формуються заряди (площа торців електродів), що створюють паразитні ємності на зовнішні об'єкти та сусідні конструкційні елементи високовольтного плеча. Внаслідок цього, такі ємності зменшуються, а потенціал напруги, прикладеної до подільника, розподіляється більш лінійно по вертикалі вздовж торців екранувальних дисків та торців провідних обкладинок конденсаторної ізоляції (як ззовні, так і всередині, поблизу зосереджених елементів високовольтного плеча). Якщо ж необхідно збільшити ємність екранувального кола, в конденсаторній ізоляції легко передбачити наскрізні циліндричні отвори, в яких можна розташовувати зосереджені елементи екранувального кола (паралельно до зосереджених елементів вимірювального кола), які також будуть екранованими від впливу зовнішніх електричних полів.

Оскільки вимірювальне коло зосереджених елементів між двома сусідніми екранувальними дисками буде екранованим конденсаторною ізоляцією, розподіл потенціалів по внутрішніх торцях якої буде близьким до розподілу напруги вздовж, наприклад, резистивних елементів вимірювального кола, з'являється можливість уніфікувати окремі сегменти високовольтного плеча та створювати їх у вигляді окремо виготовлюваних блоків з електрично роз'єднаними вимірювальними та екранувальними колами. Такі модулі надалі можна з'єднувати у

високовольтну конструкцію, розраховану, практично, на будь-яку напругу, подібно до улаштування колонок конденсаторів у ємнісних трансформаторах напруги (наприклад, типу НДЕ). Низьковольтне плече таких модульних подільників напруги краще виконувати з вбудованим аналогово-цифровим перетворювачем для того, щоб позбутись електричного зв'язку між первинним і вторинним колами, а також для зручної інтеграції таких подільників напруги в цифрові системи керування підстанціями та енергооб'єктами (Smart Grid).

Перевірка математичної моделі. З метою перевірки зазначених вище припущень щодо впливу будови високовольтного плеча подільника напруги на його точність масштабного перетворення високої напруги математична модель за рис. 5 була змінена. В новій моделі (рис. 6), відстань між екранувальними дисками була збільшена та між ними була розташована ізоляція конденсаторного типу з мідними обкладинками товщиною 0,5 мм (дана товщина була обрана з міркувань зменшення обсягу скінченних елементів у задачі), в якості матеріалу діелектрику конденсаторної ізоляції обрано склотекстоліт товщиною 2 мм з відносно діелектричною проникністю 5.5.

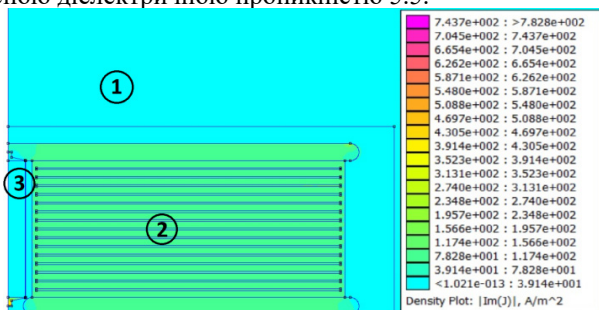


Рис. 6. Результат моделювання розподілу густини ємнісних струмів в модулі з конденсаторною ізоляцією високовольтного плеча подільника напруги на частоті 1 МГц:

- 1 – область повітря; 2 – область конденсаторної ізоляції;
- 3 – резистор активної частини

Також зосереджені елементи високовольтного плеча були представлені резисторами у формі циліндричних труб (товщина стінки 0,1 мм) з відводами, розташованими по одному між сусідніми екранувальними дисками (моделювались плівкові циліндричні резистори з біфілярною формою провідної частини на бічній поверхні). Провідність матеріалу резисторів обиралась такою, щоб забезпечити протікання по ньому постійного струму 1 МА.

На високовольтному електроді математичної моделі створено граничну умову потенціалу 10 кВ. Внаслідок обмеження наявних обчислювальних потужностей у авторів в розрахунку розглянуто лише 1 секцію подільника напруги (один модуль). Відстань від бічної поверхні резистора активної частини до внутрішнього торця конденсаторної ізоляції обиралась таким чином, щоб забезпечити найменшу різницю між струмом, який входить у вимірювальне коло, і струмом, який виходить з нього. Під час моделювання змінювався радіус напівсферичної заземленої поверхні, в центрі якої було модельовано високовольтне плече подільника напруги – від 3000 мм до 200 мм (в реальності, при вимірюванні високої напруги відстань від подільника напруги до заземлених об'єктів є набагато більшою найменшого значення діапазону). Струми на вході в резистор високовольтного плеча і струми на виході з резистора визначались інтегруванням густини струму вздовж відповідних ліній моделі за результатами чисельного розрахунку, у відповідності до (3).

Результатом моделювання є графік (рис. 7) залежності різниці струму Δ на вході і на виході високовольтного плеча подільника напруги, який визначає втрати у високовольтному плечі, у відповідності до виразу (4), і які змінюються зі зміною радіусу r заземленої поверхні навколо моделі.

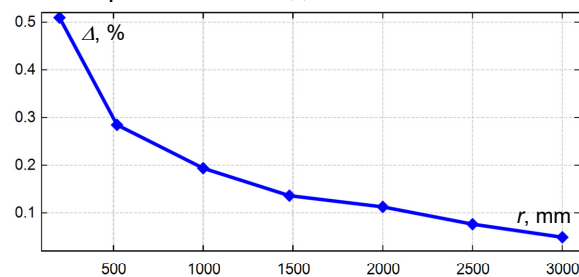


Рис. 7. Залежність різниці струмів у високовольтному плечі подільника напруги при зміні паразитних ємностей на заземлюваній поверхні (при зміні радіусу заземленої поверхні) для частоти струму 1 МГц

Аналіз результатів. Аналіз графіку за рис. 7 свідчить про повільно збільшувану похибку масштабного перетворення подільника напруги в діапазоні від 3000 мм до 200 мм радіусу заземлюваної напівсферичної поверхні навколо моделі. Такий діапазон можна вважати дуже розширеним діапазоном, що впливає на зміни паразитних ємностей, які виникають між екранувальними дисками або обкладинками конденсаторної ізоляції та заземленими поверхнями (на практиці заземлені поверхні не розташовані настільки близько до подільників напруги).

При зменшенні радіусу заземлюваної поверхні нерівномірність розподілу потенціалів вздовж внутрішніх торців обкладинок конденсаторної ізоляції змінюється повільно, а отже, незначно змінюються струми витоку з зосереджених елементів (резисторів вимірювального кола) активної частини крізь паразитні ємності на провідні поверхні екранувального кола. Слід зауважити, що різні ділянки бічних поверхонь зосереджених елементів (резисторів) активної частини можуть бути як поверхнями витоку паразитних ємнісних струмів, так і поверхнями, через які паразитні ємнісні струми втікають в ці поверхні з провідних поверхонь екранувального кола, які перебувають під більшим потенціалом. Інтегральний підсумок втікаючих і витікаючих струмів має наближатись до нуля за однакового розподілу потенціалів вздовж поверхні резистора вимірювального кола і вздовж внутрішніх торців конденсаторної ізоляції між екранувальними дисками. Прикладом такого розподілу ємнісних струмів можна вважати графік (рис. 8), на якому можна бачити розподіл густини струмів, що втікають в бічну поверхню резистора, і струмів, які з цієї поверхні витікають.

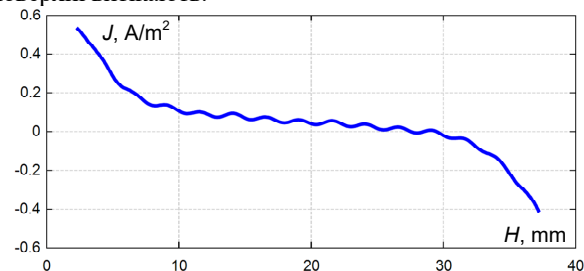


Рис. 8. Залежність густини ємнісного струму на бічній поверхні резистора від висоти розташування обкладинок конденсаторної ізоляції (частота струму – 1 МГц)

На рис. 8 можна бачити, що густина ємнісних струмів J змінюється нелінійно зі збільшенням координати H за висотою бічної поверхні резистора, а на висоті близько 25-30 мм змінює знак на протилежний. Це означає, що в нижній частині бічної поверхні резистора ємнісні струми втікають в цю поверхню, а в верхній – витікають (теоретично можна підібрати розташування резистора в моделі таким чином, щоб інтегрально ємнісні струми, що втікають і витікають з резистора, дорівнювали нулю). Хвиляста форма кривої залежності відповідає по координатах на екстремумах розташування по вертикалі торців обкладинок конденсаторної ізоляції. Відповідно, збільшення густини розташування обкладинок призводитиме до вирівнювання такої кривої.

Проте, конструкційні особливості будови секції високовольтного плеча подільника напруги з реальними зосередженими елементами (резисторами) ніколи не дають можливості урівняти такі паразитні струми, лише дозволяють зменшити різницю між ними до прийнятнього значення. Але важливішим є не зменшення до нуля такої різниці, а стабілізація такої різниці при зміні величин паразитних ємностей на заземлені поверхні та поверхні під іншим потенціалом навколо подільника напруги. Збільшення загальної ємності в екранувальному колі за рахунок розташування конденсаторів паралельно до конденсаторної ізоляції (наприклад, в циліндричних отворах конденсаторної ізоляції, з включенням між екранувальними дисками) дозволяє практично пропорційно зменшувати вплив зовнішніх паразитних ємностей на розподіл напруги по високовольтному плечу для більш широкого діапазону частот вхідної напруги. Тобто, для того, щоб у високовольтному плечі подільника напруги, яке складається з великої кількості сегментованих екранувальними дисками ділянок (однотипних модулів з конденсаторною ізоляцією та електрично від'єднаною ділянкою зосереджених елементів вимірювального кола) розподіл потенціалів на наближених до елементів вимірювального кола провідних поверхнях зберігався ще більш стабільним і рівномірним (і щоб позбутися необхідності електричного з'єднання вимірювального та екрануючого електричних кіл на кожному сегменті чи окремих ділянках, що властиво сучасним конструкційним рішенням, що застосовуються в подільниках напруги) необхідно збільшувати загальну ємність ділянок екранувального кола відповідних сегментів (модулів), збільшувати кількість прошарків конденсаторної ізоляції між екранувальними дисками. Оскільки таке збільшення ємності за рахунок геометричних властивостей конструктивних елементів модулів високовольтного плеча, або за рахунок властивостей відносної діелектричної проникності матеріалів мають свої межі, збільшувати ємність у ділянці екранувального кола можна тільки шляхом додавання зосереджених елементів ємнісного характеру (конденсаторів) паралельно до конденсаторної ізоляції. Також несуттєво (в кілька разів) можна збільшити ємність екранувального кола високовольтного плеча подільника напруги шляхом збільшення зовнішнього радіуса екранувальних дисків. Збільшення кількості обкладинок (зменшення товщини ізоляції між ними) незначно впливає на загальну ємність високовольтного плеча, проте суттєво впливає на рівномірність розподілу потенціалів поблизу зосереджених елементів вимірювального кола (що можна бачити порівнянням результатів табл. 1 та графіку за рис. 7). Також можна зменшувати вплив витоку ємнісних струмів на розподіл потенціалів по зосереджених елементах вимі-

рювального кола шляхом зменшення їх опору, проте це призводитиме до збільшення теплових втрат в активній частині, внаслідок чого ускладнюватиметься будова активної частини та погіршуватиметься стабільність характеристик подільника напруги.

Висновки.

1. Існуючі конструктивні особливості будови високовольтних подільників напруги не дозволяють їх використовувати на відкритих розподільних пристроях з метою визначення всіх показників якості електроенергії внаслідок складного розподілу паразитних ємностей та індуктивностей.

2. Розділення електричного кола високовольтного плеча подільника напруги на незалежні електричні гілки (вимірювальну та екранувальну) має сенс лише в тому випадку, коли сумарна провідність екранувальної гілки є набагато вищою і забезпечує розподіл потенціалів електричного поля вздовж вимірювальної гілки близький до рівномірного.

3. Шляхом математичного моделювання визначено залежність похибки масштабного перетворення високовольтного подільника напруги від геометричних співвідношень конструктивних елементів екранувального кола, що дозволяє варіювати будову високовольтного плеча подільника напруги для розширення діапазону частот вхідної напруги.

4. Аналіз запропонованої математичної моделі високовольтного подільника напруги доводить ефективність застосування в екранувальному колі високовольтного плеча подільника напруги ізоляції конденсаторного типу. При цьому, навіть на частоті 1 МГц вхідної напруги стабільність коефіцієнту масштабного перетворення прикладеної напруги забезпечується при суттєвих змінах паразитних ємностей конструктивних елементів на зовнішні об'єкти та між собою.

5. Застосування між екранувальними дисками високовольтного плеча ізоляції конденсаторного типу, дозволяє суттєво зменшити вплив на коефіцієнт масштабного перетворення напруги паразитних ємностей на заземлені поверхні конструкційних елементів, а крім того, дозволяє перейти на уніфіковану секційовану будову високовольтного плеча подільника напруги, внаслідок чого виготовлення подільників напруги може здійснюватися серійно.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Anokhin Y.L., Brzhezyskiy V.O., Haran Ya.O., Masliuchenko I.M., Protzenko O.P., Trotsenko Ye.O. Application of high voltage dividers for power quality indices measurement. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 6, pp. 53-59. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2017.6.08>.
2. Li D., Liu K., Lei M., Zhou F., Yue C., Yu J. Study on the ratio change measurement of 1000 kV HVDC divider based on improved DC voltage summation method. *High Voltage*, 2020, vol. 5, no. 2, pp. 202-208. doi: <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0127>.
3. Li D., Du B., Zhu K., Yu J., Liang S., Yue C. Optimization of DC Resistance Divider Up to 1200 kV Using Thermal and Electric Field Analysis. *Energy Engineering*, 2023, vol. 120, no. 11, pp. 2611-2628. doi: <https://doi.org/10.32604/ee.2023.028282>.
4. Xie S., Mu Z., Ding W., Wan Z., Su S., Zhang C., Zhang Y., Xia Y., Luo D. Development of Broadband Resistive-Capacitive Parallel-Connection Voltage Divider for Transient Voltage Monitoring. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 2, art. no. 451. doi: <https://doi.org/10.3390/en15020451>.
5. Zheng J., Li B., Zha K., Guo N., Wang L. Equipotential shielding voltage sensor for contact measurement of transient voltage in EHV/UHV power grids. *High Voltage*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 291-301. doi: <https://doi.org/10.1049/hve2.12016>.

6. Galliana F., Caria S.E., Roccatto P.E. Towards a traceable divider for composite voltage waveforms below 1 kV. *Electrical Engineering*, 2022, vol. 104, no. 2, pp. 1121-1130. doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01368-5>.
7. Kovacevic U.D., Stankovic K.D., Kartalovic N.M., Loncar B.B. Design of capacitive voltage divider for measuring ultrafast voltages. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, vol. 99, pp. 426-433. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.01.030>.
8. Thümmel T., Marx R., Weinheimer C. Precision high voltage divider for the KATRIN experiment. *New Journal of Physics*, 2009, vol. 11, no. 10, art. no. 103007. doi: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/10/103007>.
9. Shipu W., Wenlong P., Zhining Y., Kejie Z., Xixiu W. Study on the reliability of new kind of ± 1 100 Kv DC voltage divider under the action of impulse voltage. *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 16, pp. 2575-2579. doi: <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8815>.
10. Havunen J., Hällström J. Reference switching impulse voltage measuring system based on correcting the voltage divider response with software. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, vol. 70, pp. 1-8. art. no. 1006008. doi: <https://doi.org/10.1109/tim.2021.3063753>.
11. Luo Y., Guo B., Qian B., Xu L., Zhang F., Li F., Feng X. Method to Evaluate the Resistance-Capacitance Voltage Divider and Uncertainty Analysis. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 22, art. no. 7744. doi: <https://doi.org/10.3390/en14227744>.
12. Jiang H., Pischler O., Schichler U., Havunen J., Hällström J., Merev A., Dedeoglu S., Özer S., Meisner J., Passon S., Gerdinand F. Prequalification of capacitors for high-precision voltage dividers. *22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021)*, 2021, pp. 309-314. doi: <https://doi.org/10.1049/icp.2022.0031>.
13. Abdel Mageed H.M., Salah Eldeen R.S. Adapted Technique for Calibrating Voltage Dividers of AC High-Voltage Measuring Systems. *MAPAN*, 2020, vol. 35, no. 1, pp. 11-17. doi: <https://doi.org/10.1007/s12647-019-00334-8>.
14. Lee S.H., Yu K.M., Choi J.Y., Jang S.M. Low-Uncertainty Equality Between the Voltage-Dividing and Resistance Ratio of a DC Resistive High Voltage Divider. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2019, vol. 14, no. 4, pp. 1789-1795. doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-019-00157-2>.
15. Li Q., Wang L., Zhang S., Tang Y., Xu Y. Method to Determine the Ratio Error of DC High-Voltage Dividers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, vol. 61, no. 4, pp. 1072-1078. doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2178672>.
16. Hrbac R., Kolar V., Bartłomiejczyk M., Mlcak T., Orsag P., Vanc J. A development of a capacitive voltage divider for high voltage measurement as part of a combined current and voltage sensor. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2020, vol. 26, no. 4, pp. 25-31. doi: <https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.4.25888>.
17. Havunen J., Passon S., Hällström J., Meisner J., Schlüterbusch T.C. Empirical Characterization of Cable Effects on a Reference Lightning Impulse Voltage Divider. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, vol. 72, pp. 1-9. doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3276028>.
18. Li B., He Y., Wang L., Cao M., Fu Z., Zhang H. Calibration Method of a Wideband AC Resistance Voltage Divider Based on an Equivalent Model. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 16, art. no. 7181. doi: <https://doi.org/10.3390/s23167181>.
19. Pan Feng, Xiao Yong, Lin Guoying, Xiao Xia, Shuai Hang. Analysis of the influencing factors for the 500 kV DC voltage reference divider used for on-site calibration. *2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 2015, pp. 25-29. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2015.7494180>.
20. Boyko M.I., Syomkin S.O. Investigation of amplitude-temporal characteristics of a high-voltage resistive voltage divider. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 4, pp. 59-68. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.09>.
21. Brzhezitsky V.O., Haran Y.O., Trotsenko Y.O., Protsenko O.R., Derzhuk A.O., Dixit M.M. Ultimate effect of non-identity of resistive elements of high-voltage arm on frequency characteristics of broadband voltage divider (analytical research). *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 52-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.08>.
22. Brzhezitsky V.O., Haran Y.O., Derzhuk A.O., Protsenko O.R., Trotsenko Y.O., Dixit M.M. Ultimate effect of non-identity of

How to cite this article:

Haran Y.O., Trotsenko Y.O., Protsenko O.R., Dixit M.M. The impact of parasitic capacitances on the accuracy of scale transformation of high-voltage dividers. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 1, pp. 65-72. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.1.09>

capacitive elements of high-voltage arm on frequency characteristics of voltage divider (analytical research). *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 4, pp. 46-52. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.06>.

23. Haran Y.O., Trotsenko Y.O., Protsenko O.R. *High-voltage wide-band divider*. Patent UA, no. 155502, 2024.

Надійшла (Received) 01.06.2024
 Прийнята (Accepted) 22.08.2024
 Опублікована (Published) 02.01.2025

Гаран Ярослав Олександрович¹, к.т.н.,
 Троценко Євгеній Олександрович¹, к.т.н., доц.,
 Проценко Олександр Ростиславович¹, к.т.н., доц.,
 Dixit Mandar Madhukar², Assistant Professor.

¹ Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
 03056, Київ, пр. Берестейський, 37,
 e-mail: y.garan@kpi.ua (Corresponding Author)

² Vishwaniketan Institute of Management Entrepreneurship
 and Engineering Technology, India.

Y.O. Haran¹, Y.O. Trotsenko¹, O.R. Protsenko¹, M.M. Dixit²
¹ National Technical University of Ukraine
 «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
 37, Prospect Beresteyskiy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

² Vishwaniketan Institute of Management Entrepreneurship
 and Engineering Technology, India.

The impact of parasitic capacitances on the accuracy of scale transformation of high-voltage dividers.

Purpose. The aim of this work is the determination of the parasitic capacitance's influence on the accuracy of scale transformation of high-voltage dividers. Analyzing the possibilities of reducing such influence is a pressing **problem** for high voltage measurement, especially at high frequency range of input voltage. **Methodology.** Mathematical modeling of the voltage divider equivalent circuit, considering parasitic capacitances and inductances has been performed in the QUCS circuit simulator software under sinusoidal alternating current conditions in the range from 100 Hz to 1 MHz. Using the FEMM software, the finite element method was used to simulate the density distribution of capacitive currents in the module with capacitance graded insulation of the high-voltage arm of the voltage divider. **Results.** The results of the calculations show that the percentage of parasitic capacitive currents decreases exponentially depending on the ratio of the outer radii of the shielding disks to the distance between them. However, even with the outer radii of the shielding disks of about 3 m, capacitive currents still make up about 1 % of the total current flowing in the measuring circuit of the voltage divider. Instead of increasing outer radii, it is proposed to use high-voltage capacitance graded insulation between the shielding disks. As a result, a stable error of large-scale voltage transformation was obtained when the values of parasitic capacitances change, and it is proposed to manufacture the high-voltage arm of the voltage divider from the same type of high-voltage modules. **Originality.** The results of modeling the dependence of the accuracy of the voltage divider scale transformation on the ratio of the structural elements geometric parameters of its high-voltage arm were obtained. The solution has been proposed that involves changing the design of the high-voltage arm of the voltage divider, which significantly reduces the dependence of its scale transformation error on significant changes in the parasitic capacitances of the structure components on grounded surfaces. **Practical value.** The results of mathematical modeling of the characteristics of the voltage divider high-voltage arm make it possible to design, for the purpose of serial production, the same type of high-voltage modules for assembling on-site broadband voltage dividers for any nominal voltage, which will have the possibility of integration into Smart Grid systems. References 23, tables 1, figures 8.

Key words: high-voltage divider, parasitic capacitances, scale transformation accuracy.