

І.О. КОСТЮКОВ, Є.С. МОСКВІТИН

ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАЗИТНОЇ ІНДУКТИВНОСТІ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ЙОГО ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЄМНОСТІ

У цій роботі дається опис методики вимірювання, яка може бути використана на практиці для оцінки електричної ємності досліджуваного об'єкта із значною паразитною індуктивністю. Електрична ємність визначається як відношення середнього значення розрядного струму до середнього значення похідної за часом, взятої від напруги на невідомій ємності. Зменшення шкідливого впливу паразитної індуктивності на точність вимірювань досягається відповідним підбором тривалості проаналізованих сигналів. У запропонованому методі тривалість обмежена моментами часу, які відповідають максимальному значенню розрядного струму та завершенню перехідного процесу.

Ключові слова: аперіодичний розряд, паразитні параметри, точність вимірювань

И.А. КОСТЮКОВ, Е.С. МОСКВИТИН

УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

В этой работе дается описание методики измерения, которая может быть использована на практике для оценки емкости исследуемого объекта со значительной паразитной индуктивностью. Электрическая емкость определяется как отношение среднего значения разрядного тока к среднему значению производной по времени, взятой от напряжения на неизвестной емкости. Уменьшения вредного влияния паразитной индуктивности на точность измерений достигается соответствующим подбором длительности проанализированных сигналов. В предложенном методе длительность сигналов ограничена моментами времени, которые соответствуют максимальному значению тока разряда и завершению переходного процесса.

Ключевые слова: аперіодический разряд, паразитные параметры, точность измерений.

I. KOSTIUKOV, E. MOSKVITIN

THE DECREASING OF THE INFLUENCE OF PARASITIC INDUCTANCE OF TESTED OBJECT ON THE ACCURACY OF ITS ELECTRICAL CAPACITANCE MEASUREMENT

This paper gives a description of measurement technique which can be used in practice of carrying out estimation of electrical capacitance of tested object with substantial stray inductance. Electrical capacitance is determined as a ratio of mean value of discharge current to the mean value of time derivative, taken from voltage on unknown capacitance. The decreasing of deleterious impact of stray inductance on accuracy of measurements is achieved by proper selection of the duration of analyzed signals. In proposed technique the duration is limited by instants of time that correspond to the maximum value of discharge current and to the termination of transient. The accuracy of described method for electrical capacitance estimation is affected by noisy components of obtained oscillograms. This deleterious impact can be alleviated by smoothing of time dependence by applying of least square method. Another reason for lost of accuracy is associated with possible influence of skin-effect in conductive elements of discharge circuit, which can cause time dependence of resistance and inner inductance of conductive parts of tested object and discharge circuit. Described technique, however, is based on taking into consideration independent on time parameters of equivalent lamped discharge circuit. Nevertheless, the example of practical implementation has shown that described approach allows to partially mitigate the influence of stray inductance on carried out measurements of electrical capacitance, as the value of relative error turned out to be equal to 2.04%

Keywords: Parasitic parameters, overdamped discharge, accuracy of measurements.

Вступ. Проблема вимірювання електричної ємності є досить важливою для вирішення багатьох інженерних та медичних задач. Типовими прикладами таких задач є забезпечення контролю технічного стану ізоляції електротехнічного обладнання [1], моніторинг стану людського організму [2], вимірювання товщини рідких плівок [3], аналіз складу рідких речовин [4], оцінка електричних параметрів високовольтного обладнання [5].

У наш час широко відомі методи вимірювання електричної ємності, засновані на визначенні постійної часу розряду конденсаторів. Такий підхід до вимірювання ємності передбачає, що залежність напруги на невідомій ємності в процесі розряду може бути визначена наступним чином:

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

де U_0 - початкове значення напруги на досліджуваній ємності, τ - значення постійної часу розрядного ланцюга, t - час після початку перехідного процесу. У цьому випадку методи вимірювання ємності засновані на вимірюванні проміжку часу, для якого значення

напруги на невідомій ємності відрізняються від зарядного значення на величину, що визначається постійною часу розрядного ланцюга. Ця задача може бути вирішена із застосуванням різних технічних рішень. Одне з таких рішень наведено в [6], де наведено опис електричної схеми для вимірювання постійної часу за допомогою застосування компараторів напруги, JK тригера та логічних елементів. Альтернативний метод вимірювання постійної часу наведено в [7]. Зазначений метод заснований на застосуванні таймера 555, який містить RS тригер, компаратори напруги та транзисторний перемикач. Окрім згаданих методів, заснованих на вимірюванні постійної часу, можливе застосування методів вимірювання, заснованих на застосуванні фазових детекторів [8] - [11]. Численні методи вимірювань засновані на застосуванні мостів змінного струму, наприклад мостів Шерінга [12]. Вимірювання електричної ємності іноді може ускладнюватися паразитарними параметрами досліджуваного об'єкта. Одним із таких параметрів є паразитна індуктивність досліджуваного ємнісного об'єкта [13] - [16], яка, крім того, може залежати від частоти та амплітуди прикла-

© І.О. Костюков, Є.С. Москвітін, 2021

деної напруги. В деяких випадках сама електрична ємність може представляти паразитний параметр досліджуваного об'єкта [17] - [19]. Крім того, в деяких важливих для практичного застосування випадках, наприклад у разі випробування ізоляції в імпульсних конденсаторах високої напруги, наявність паразитної індуктивності може призвести до зміни падіння напруги на невідомій ємності та, відповідно, до спотворення результатів проведених вимірювань. Вплив паразитної індуктивності на точність вимірювань зазвичай стає більш чітким із збільшенням частоти прикладеної напруги. Наявність паразитної індуктивності досліджуваного об'єкта та розрядного ланцюга також може призвести до деякої неточності вимірювань, які проводились за допомогою застосування різних методів, заснованих на визначенні постійної часу. Така втрата точності зумовлена тим, що паразитна індуктивність може спричинити більш повільне зменшення напруги на невідомій ємності, ніж це зазвичай відбувається у випадку застосування виразу (1) для напруги на невідомій ємності. Внаслідок зміни значень падіння напруги на невідомій ємності, спричиненої наявністю паразитної індуктивності, більшість існуючих методів дозволяють визначати лише значення ефективної електричної ємності. У разі значної паразитної індуктивності такі значення можуть виявляти суттєві розбіжності зі значеннями точної електричної ємності, які визначається значенням діелектричної проникності діелектричного матеріалу та геометричними параметрами застосовуваних електродів. При практичному застосуванні зазначена невідповідність є перешкодою для отримання інформації про технічний стан електричної ізоляції. Отже, для практичних цілей переважно розробити методи вимірювань, які дозволяють частково зменшити або повністю виключити вплив паразитної індуктивності на точність проведених вимірювань електричної ємності.

Мета статті полягає в розробці методу вимірювання електричної ємності, заснованого на аналізі перехідних процесів в електричному ланцюзі, що виникають внаслідок аперіодичного розряду досліджуваної ємності, що дозволяє зменшити вплив паразитної індуктивності на виміряні значення електричної ємності.

Матеріали та методи. Запропонований метод зменшення впливу паразитної індуктивності на точність вимірювання електричної ємності базується на аналізі напруги на досліджуваній ємності в аперіодичному режимі розряду. У разі аперіодичного режиму розряду невідомої електричної ємності можна регулювати величину опору розрядного ланцюга до величини, при якій падіння напруги на індуктивності в момент часу, який відповідає максимальному значенню струму розряду і в подальші моменти перехідного процесу, буде зменшено до рівня, який не спричиняє істотного впливу на точність проведених вимірювань. У разі незначної паразитної індуктивності величину електричної ємності можна визначити як відношення деякого значення розрядного струму до відповідного значення попередньо диференційованої за часом напруги на невідомій ємності. Таке відношення можна визначити для максимального, середнього квадратич-

ного та середнього значень струму розряду та напруги. Отже, величину невідомої електричної ємності у випадку незначної паразитної індуктивності можна визначити як:

$$C = \frac{I_{cMAX}(t)}{MAX(\frac{dU_c(t)}{dt})} \quad (2)$$

$$C = \frac{I_{cRMS}(t)}{RMS(\frac{dU_c(t)}{dt})} \quad (3)$$

$$C = \frac{I_{cMEAN}(t)}{MEAN(\frac{dU_c(t)}{dt})} \quad (4)$$

де $I_{cMAX}(t)$, $I_{cRMS}(t)$ та $I_{cMEAN}(t)$ відповідно позначають максимальні, середньоквадратичні та середні значення розрядного струму, $U_c(t)$ позначає напругу на невідомій ємності. Однак наявність паразитної індуктивності істотно ускладнює безпосереднє застосування виразів (2)-(4) для вимірювання ємності. Зазначені труднощі можна пояснити, розглянувши еквівалентну схему досліджуваного об'єкта та розрядного ланцюга, представлену на рис. 1.

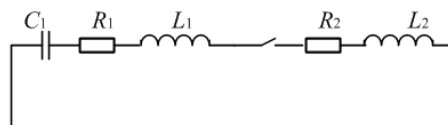


Рис. 1. Еквівалентна схема для розрядного ланцюга: C_1 - значення невідомої електричної ємності, R_1 - опір, спричинений втратами потужності в досліджуваному об'єкті, L_1 - значення паразитної індуктивності досліджуваного об'єкта, L_2 - значення індуктивності розрядного кола, R_2 - електричний опір, який використовується для регулювання режиму розряду і застосовується як перетворювач струму на напругу

Як видно з рис. 1, наявність паразитарних параметрів випробовуваного об'єкта L_1 та R_1 , впливає на напругу на невідомій ємності, а отже, визначає значення похідної за часом у (2)-(4). Тому значення напруги на невідомій ємності недоступне для прямих вимірювань. Однак на практиці можна виміряти величину напруги на виходах перетворювача струму в напругу. Припускаючи незначну індуктивність розрядного ланцюга L_2 , цю напругу можна представити як суму напруг на невідомій ємності, паразитній індуктивності та опорі досліджуваного об'єкта:

$$|U_{R2}(t)| = |-U_{C1}(t) - U_{R1}(t) - U_{L1}(t)| \quad (5)$$

де $U_{C1}(t)$, $U_{R1}(t)$ та $U_{L1}(t)$, відповідно, позначають значення падіння напруги на виміряній ємності, активному опорі досліджуваного об'єкта та паразитній індуктивності досліджуваного об'єкта. У цьому випадку необхідно розглянути два випадки, які відповідають різному співвідношенню значень R_2 і R_1 . Перший випадок відповідає незначному опору досліджуваного об'єкта. У цьому випадку можна припустити, що значення напруги на R_2 в кожен момент перехідного процесу дорівнює сумі напруг на виміряній ємності та паразитній індуктивності. У цьому випадку можна нехтувати значенням напруги на R_1 і значення напруги

ги на виході перетворювача струму в напругу U_{CONV1} можна записати як:

$$U_{CONV1} = |U_{R2}(t)| = |-U_{C1}(t) - U_{L1}(t)| \quad (6)$$

Другий випадок відповідає суттєвому значенню внутрішнього опору R_1 . У цьому випадку в необхідно провести вимірювання R_1 і зробити відповідну обробку отриманих осцилограм для того, щоб отримати масив даних, який визначається лише величиною падіння напруги на паразитній індуктивності та на досліджуваній ємності. У цьому випадку значення напруги на виході перетворювача струму в напругу U_{CONV2} можна записати як:

$$U_{CONV2} = |U_{R2}(t)| + |U_{R1}(t)| = |-U_{C1}(t) - U_{L1}(t)| \quad (7)$$

Оскільки падіння напруги на паразитній індуктивності пропорційне похідній за часом, розрахованій для розрядного струму, паразитна індуктивність може мати значний вплив на точність проведених вимірювань лише протягом досить обмеженого часу, після чого перебіг перехідного процесу в основному визначаються значеннями ємності C_1 та опором R_1, R_2 .

Значення напруги на паразитній індуктивності дорівнює нулю в той момент часу, коли струм розряду досягає свого максимального значення. Відповідним підбором опору R_2 можна досягти режиму розряду, коли напруга на опорі R_2 майже збігається із напругою на вимірюваній ємності. Отже, точність проведених вимірювань можна підвищити, обмежуючи тривалість проаналізованих сигналів моментами часу, які відповідають максимальному значенню розрядного струму та закінчення перехідного процесу, оскільки для цього періоду часу похідна за часом розрахована для розрядного струму і, відтак, падіння напруги на паразитній індуктивності може характеризуватися меншими значеннями, ніж відразу після початку процесу розряду.

Описані раніше особливості розрядних процесів проілюстровані на рис. 2 і рис. 3. Всі розрахунки проводились для величини ємності, що дорівнює $4,7 \cdot 10^{-6}$ Ф, значення паразитної індуктивності, що дорівнює $15 \cdot 10^{-3}$ Гн, і змінному значенні опору R_2 . Початкове значення напруги на вимірюваній ємності було встановлене рівним 10 В. Усі розрахунки проводились, використовуючи відомі вирази для розрядного струму та напруги на вимірюваній ємності [20]:

$$i(t) = -\frac{U_0}{L(\alpha_1 - \alpha_2)} (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}) \quad (7)$$

де U_0 початкове значення напруги на досліджуваній ємності а коефіцієнти α_1, α_2 можуть бути визначені із використанням наступних виразів [20]:

$$\alpha_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (8)$$

$$\alpha_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (9)$$

де R значення опору розрядного ланцюга, що включає в себе значення R_1 та R_2 . Напруга на досліджуваній ємності може бути визначена згідно із:

$$u_C(t) = -\frac{U_0}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_2 e^{\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{\alpha_2 t}) \quad (10)$$

Максимальне значення розрядного струму спостерігається в момент часу, що може бути визначений згідно із [20]:

$$t_m = \frac{\ln(\frac{\alpha_2}{\alpha_1})}{\alpha_1 - \alpha_2} \quad (11)$$

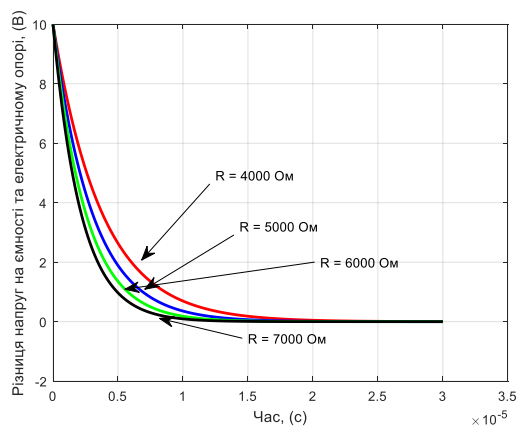


Рис. 2. Вплив опору розрядного ланцюга на різницю напруг на C_1 і R_2

З результатів розрахунків на рис. 2 та рис. 3 можна зробити висновок, що зменшення різниці напруг на вимірюваній ємності C_1 та опорі R_2 супроводжується поступовим зменшенням часу, що відповідає максимальному значенню розрядного струму.

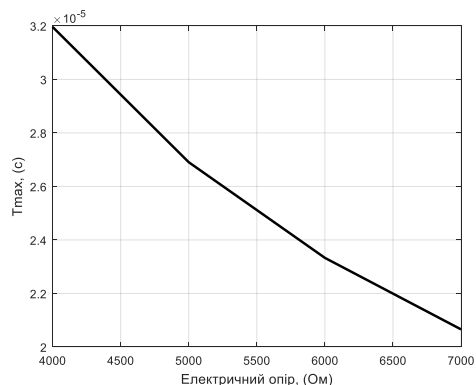


Рис. 3. Вплив опору розрядного ланцюга на момент часу, який відповідає максимальному значенню струму в режимі аперіодичного розряду

На рис. 4 представлені результати розрахунку електричної ємності, отримані за допомогою виразу (4). Зазначені результати були отримані при обробці кривих струму розряду і напруги, без будь-яких обмежень певними моментами часу і при припущенні, що значення напруги на невідомій ємності доступне для прямих вимірювань. Розрядний струм визначався згідно із (7), залежність напруги від досліджуваної ємності від часу визначали за допомогою (10).

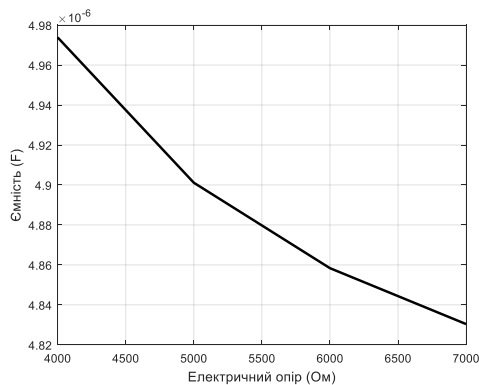


Рис. 4. Вплив опору розрядного кола на величину розрахункової електричної ємності

На рис. 5 представлений вплив опору розрядного ланцюга на точність оцінки ємності.

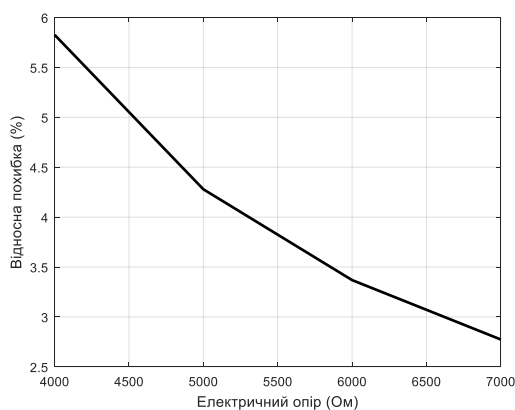


Рис. 5. Вплив опору розрядного ланцюга на точність оцінки електричної ємності.

На рис. 6 представлені подібні до рис. 4 результати. Однак у цьому випадку результати були отримані шляхом опрацювання кривих струму розряду та напруги, обмежених моментами часу, які відповідають максимальному значенню розрядного струму та закінченню перехідного процесу.

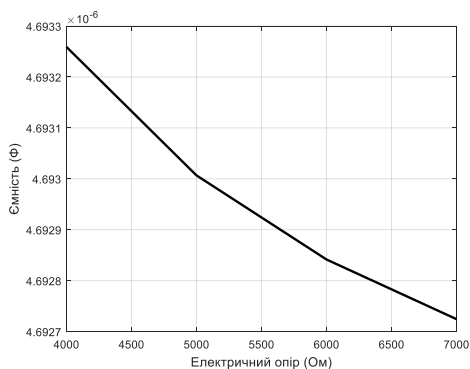


Рис. 6. Моделювання впливу опору розрядного кола на точність оцінки електричної ємності для обмежених у часі кривих струму та напруги

На рис. 7 представлені значення відносної похибки оцінювання ємності для даних на рис. 6.

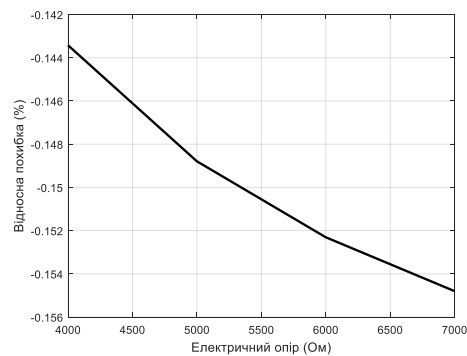
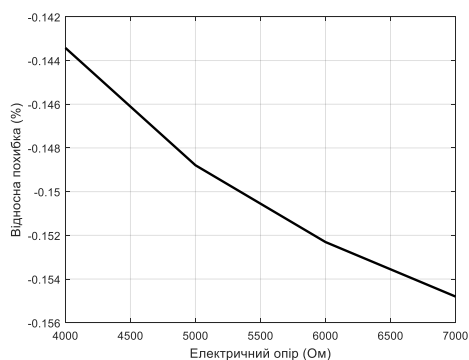
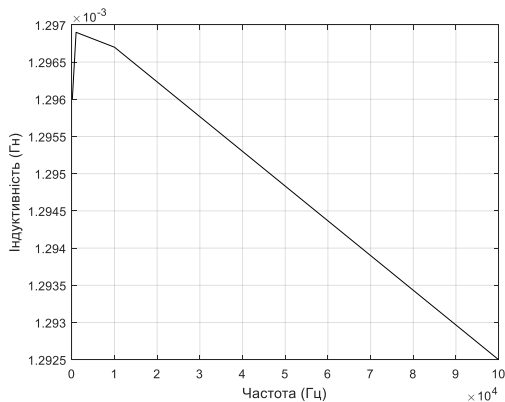
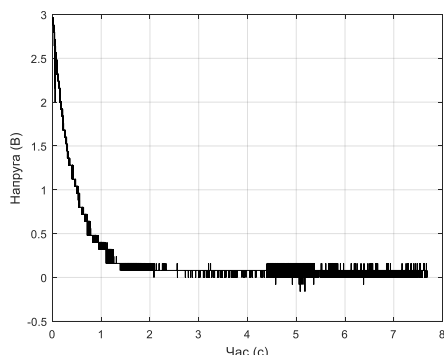


Рис. 7. Відносна похибка оцінки ємності для різних значень опору розрядного кола для обмежених у часі кривих струму та напруги

З даних на рис. 6 та рис. 7 можна зробити висновок, що обмеження опрацьованих даних моментами, що відповідають максимальному значенню струму розряду та завершенню перехідного процесу, призводить до підвищення точності оцінки електричної ємності. За результатами проведеного моделювання збільшення опору розрядного контуру дозволяє зменшити вплив паразитної індуктивності на точність проведених вимірювань. Отже, збільшення тривалості сигналів, спричинене збільшенням опору розрядного ланцюга, дозволяє зменшити негативний вплив паразитної індуктивності на точність проведених вимірювань, оскільки додатковий опір призводить до більш плавної форми кривої розрядного струму в період часу, що обмежений моментами які відповідають максимальному значенню розрядного струму та закінченню перехідного процесу, а отже, зменшенню падіння напруги на паразитній індуктивності досліджуваного об'єкта в цей період часу. Експериментальна реалізація описаного методу для оцінки електричної ємності була проведена шляхом аналізу процесів розряду, спричинених аперіодичним розрядом поліпропіленового конденсатора із ємністю 4,737 мкФ. Для зменшення можливого впливу втрат потужності на точність вимірювання ємності це значення електричної ємності було виміряне за значення частоти прикладеної напруги, що складало 100 Гц. Паразитна індуктивність досліджуваного об'єкта була імітована послідовним підключенням циліндричної котушки індуктивності до досліджуваного конденсатора. Значення опору R_2 було обрано рівним 97,93 кОм. На точність описаного методу, очевидно, впливає можлива частотна залежність параметрів еквівалентної схеми, описаної на рис. 1. Оскільки розглянутий режим розряду, зазвичай, може бути описаний досить широким спектром частот, на точність оцінки електричної ємності також можуть впливати часові залежності параметрів розрядного кола. Необхідно підкреслити, що обидва ці типи залежностей не були враховані в запропонованій методиці оцінки електричної ємності. На рис. 8-9 представлені частотні залежності індуктивності та опору котушки R_1 , які були представлені в еквівалентній схемі на рис. 1 при вимірюваннях електричної ємності.

Рис. 8. Частотна залежність R_1 Рис. 9. Частотна залежність L_1

На рис. 10 представлена залежність напруги на перетворювачі розрядного струму в напругу, який використовувався для оцінки електричної ємності.

Рис. 10. Залежність падіння напруги від часу R_2 обмежена моментом часу, що відповідає максимальному значенню струму в розрядному контурі.

Залежність падіння напруги на R_2 , що представлена на рис. 10, була опрацьована за раніше описаною методикою. Похідна за часом була визначена із застосуванням кінцевих різниць. За результатами проведеної обробки, яка проводилась без урахування опору R_1 , тобто застосовуючи підхід для оцінки електричної ємності, який можна виразити формулою (6), значення електричної ємності виявилось рівним 6,3408 мкФ. Після врахування величини електричного опору досліджуваного об'єкта R_1 згідно із виразом (7) величина розрахованої електричної ємності зросла до 6,3415 мкФ. Отже, ці два приклади практичного застосування описаної методики для оцінки електричної ємності показали досить значну розбіжність між оці-

неними значеннями ємності та точним значенням електричної ємності, яке дорівнювало 4,737 мкФ. Основна причина такої істотної втрати точності зумовлена тим, що на практиці при обробці цифрових осцилограм на точність вимірювань впливають шуми в отриманих осцилограмах, які можуть істотно спотворити отриману похідну за часом. Такий негативний вплив шумів, які чітко можна спостерігати на рис. 10, можна проілюструвати даними, представленими на рис. 11.

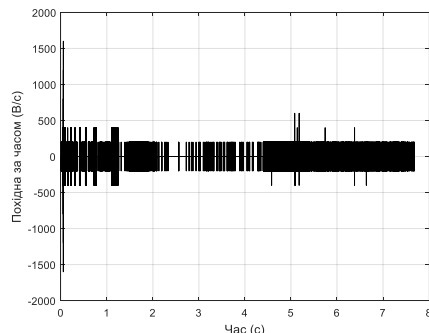


Рис. 11 Похідна за часом, отримана за допомогою кінцевих різниць, взятих від напруги на виході перетворювача струму в напругу, що представлена на рис. 10

Негативний вплив шумів на точність визначення похідної за часом можна усунути після згладжування падіння напруги на R_2 за методом найменших квадратів. У цьому випадку залежність напруги на R_2 від часу, представлена на рис.10, може бути виражена як:

$$U(t) = ae^{bt}, \quad (11)$$

де a дорівнює 2,904, а b дорівнює -2,13. Після такої обробки отриманих даних та застосування виразу (4) значення розрахункової електричної ємності виявилось рівним 4,7959 мкФ. У цьому випадку значення відносної похибки дорівнювало 2,04%.

Висновки. Зменшення впливу паразитної індуктивності досліджуваного об'єкта на точність проведених вимірювань досягається правильним підбором тривалості проаналізованих сигналів, які представлені часовими залежностями розрядного струму та напруги на ємності. Ця тривалість повинна бути обмежена моментом часу, який відповідає максимальному значенню розрядного струму, і моментом часу, який відповідає завершенню перехідних процесів. Такий підбір даних вимірювань дозволяє зменшити вплив паразитної індуктивності на точність вимірювань, оскільки найбільш значний вплив паразитної індуктивності, зазвичай, спостерігається в проміжок часу від початку перехідного періоду до моменту часу, який відповідає максимальному значенню розрядного струму. На точність описаного методу оцінки електричної ємності впливають шумові компоненти отриманих осцилограм. Цей негативний вплив можна зменшити, згладжуючи сигнали, із застосуванням методу найменших квадратів.

Список літератури

- 1 Kornhuber, J., Markalous, S., Muhr, M., Strehl, T., Sumereder, C. (2009). Comparison of methods for the dissipation factor measurement at practical examples. In Proceedings of the 16th International

- Symposium on High Voltage Engineering, 24-28 August 2009 (pp. 144). Cape Town, South Africa.
- 2 Atika Arshad, Ruman Tasnim, Zahirul Alam, A.H.M., Sheroz Khan, Low value capacitance measurement system for the application of monitoring human body. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016. Vol. 11, No. 1, P. 327-330.
 - 3 Ziqiang Cui, Chengyi Yang, Benyuan Sun, Huaxiang Wang. Liquid film thickness estimation using electrical capacitance tomography. *Measurement Science Review*, 2014. Vol. 14, No. 1, P. 8-15.
 - 4 Zubair Muhammad, Tong Boon Tang, A high resolution capacitive sensing system for the measurement of water content in crude oil. *Sensors*, 2014. Vol. 14. P. 11351-11361.
 - 5 Filipovich-Grichich, B., Filipovich-Grichich, D., Gabrich, P. Estimation of load capacitance and stray inductance in lightning impulse voltage test circuits. *Electric Power Systems Research*, 2015. Vol. 119, 439-446.
 - 6 Arcue, H., Mijarez, O.D., Estevanot, L.A. A wide range time constant measuring technique. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1974. Vol. 23, No. 1, P. 49-52.
 - 7 Rathore, T.S. A novel backlash circuit and scheme for capacitance measurement. *IETE Technical Review*, 1984. No. 1, P. 110.
 - 8 Roj, J., Cichy, A. (). Method of measurement of capacitance and dielectric loss factor using artificial neural networks. *Measurement Science Review*, 2015. Vol. 15, No. 3, P. 127-131.
 - 9 Raven, M.S., Raven, D. New approaches to the direct measurement of capacitance. *Electrocomponent Science and Technology*, 1977. No. 4, P. 37-42.
 - 10 Cichy, A. Methods of synthesis of quasi-balanced circuits for measuring of impedance components. *Elektronika ir Electrotechnika*, 2016. Vol. 22. No. 2, P. 38-42.
 - 11 Skorkowski, A., Cichy, A. (2009). Virtual capacitance meter based on impedance modulus measurement. In Proceedings of the XIX IMECO World Congress Fundamental and Applied Metrology, 6-11 September 2009 (pp. 648-651). Lisbon, Portugal.
 - 12 Bera, S.C., Chattopadhyay, S. A modified Shering bridge for measurement of the dielectric parameters of a material and the capacitance of a capacitive transducer. *Measurement*, 2003. Vol. 33, P. 3-7.
 - 13 Ingalls, M., Kent, G. Monolithic capacitors as transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-35 1987. No. 11, P. 964-970.
 - 14 Siami, S., Daude, N., Joubert, Ch., Merle, P. (1998). Minimization of the stray inductance in metalized capacitors: Connections and winding geometry dependence. *The European Physical Journal Applied Physics*, 4, 37-43.
 - 15 Joubert, Ch., Beroual, A., Rojat, G. (1994). Magnetic field and current distribution in metalized capacitors. *Journal of Applied Physics*, 4, 37-43.
 - 16 Wong, C.S. (1986). Effect of stray inductance on capacitive voltage divider. *Journal of Applied Physics*, 59, 673-675.
 - 17 Massarini, A., Kazimierczuk, M.K. (1997). Self-capacitance of inductors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12 (4), 671-676.
 - 18 Dalessandro, A., Fabiana da Silveira Cavalcante, Kolar, J.V. (2007). Self-capacitance of high-voltage transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22 (5), 2081-2092.
 - 19 Mariscotti, A. (2011). Measuring the stray capacitance of solenoids with a transmitting and a receiving coil. *Metrology and Measurement Systems*, 18 (1), 47-56.
 - 20 Nejman, L.R., Demirchjan, K.S. (1967). *Theoretical foundations of electrical engineering*. Energiia. (Rus).
- ment at practical examples. In Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, 24-28 August 2009 (pp. 144). Cape Town, South Africa.
- 2 Atika Arshad, Ruman Tasnim, Zahirul Alam, A.H.M., Sheroz Khan, Low value capacitance measurement system for the application of monitoring human body. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016. Vol. 11, No. 1, P. 327-330.
 - 3 Ziqiang Cui, Chengyi Yang, Benyuan Sun, Huaxiang Wang. Liquid film thickness estimation using electrical capacitance tomography. *Measurement Science Review*, 2014. Vol. 14, No. 1, P. 8-15.
 - 4 Zubair Muhammad, Tong Boon Tang, A high resolution capacitive sensing system for the measurement of water content in crude oil. *Sensors*, 2014. Vol. 14. P. 11351-11361.
 - 5 Filipovich-Grichich, B., Filipovich-Grichich, D., Gabrich, P. Estimation of load capacitance and stray inductance in lightning impulse voltage test circuits. *Electric Power Systems Research*, 2015. Vol. 119, 439-446.
 - 6 Arcue, H., Mijarez, O.D., Estevanot, L.A. A wide range time constant measuring technique. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1974. Vol. 23, No. 1, P. 49-52.
 - 7 Rathore, T.S. A novel backlash circuit and scheme for capacitance measurement. *IETE Technical Review*, 1984. No. 1, P. 110.
 - 8 Roj, J., Cichy, A. (). Method of measurement of capacitance and dielectric loss factor using artificial neural networks. *Measurement Science Review*, 2015. Vol. 15, No. 3, P. 127-131.
 - 9 Raven, M.S., Raven, D. New approaches to the direct measurement of capacitance. *Electrocomponent Science and Technology*, 1977. No. 4, P. 37-42.
 - 10 Cichy, A. Methods of synthesis of quasi-balanced circuits for measuring of impedance components. *Elektronika ir Electrotechnika*, 2016. Vol. 22. No. 2, P. 38-42.
 - 11 Skorkowski, A., Cichy, A. (2009). Virtual capacitance meter based on impedance modulus measurement. In Proceedings of the XIX IMECO World Congress Fundamental and Applied Metrology, 6-11 September 2009 (pp. 648-651). Lisbon, Portugal.
 - 12 Bera, S.C., Chattopadhyay, S. A modified Shering bridge for measurement of the dielectric parameters of a material and the capacitance of a capacitive transducer. *Measurement*, 2003. Vol. 33, P. 3-7.
 - 13 Ingalls, M., Kent, G. Monolithic capacitors as transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-35 1987. No. 11, P. 964-970.
 - 14 Siami, S., Daude, N., Joubert, Ch., Merle, P. (1998). Minimization of the stray inductance in metalized capacitors: Connections and winding geometry dependence. *The European Physical Journal Applied Physics*, 4, 37-43.
 - 15 Joubert, Ch., Beroual, A., Rojat, G. (1994). Magnetic field and current distribution in metalized capacitors. *Journal of Applied Physics*, 4, 37-43.
 - 16 Wong, C.S. (1986). Effect of stray inductance on capacitive voltage divider. *Journal of Applied Physics*, 59, 673-675.
 - 17 Massarini, A., Kazimierczuk, M.K. (1997). Self-capacitance of inductors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12 (4), 671-676.
 - 18 Dalessandro, A., Fabiana da Silveira Cavalcante, Kolar, J.V. (2007). Self-capacitance of high-voltage transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22 (5), 2081-2092.
 - 19 Mariscotti, A. (2011). Measuring the stray capacitance of solenoids with a transmitting and a receiving coil. *Metrology and Measurement Systems*, 18 (1), 47-56.
 - 20 Nejman, L.R., Demirchjan, K.S. (1967). *Theoretical foundations of electrical engineering*. Energiia. (Rus).

References (transliterated)

- 1 Kornhuber, J., Markalous, S., Muhr, M., Strehl, T., Sumereder, C. (2009). Comparison of methods for the dissipation factor measure-

Поступила (received) 01.06.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюков Іван Олександрович (Костюков Иван Александрович, Kostjukov Ivan Aleksandrovich) – кандидат технічних наук, доцент кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ» м. Харків; e-mail iakostiukow@gmail.com

Москвітін Євген Сергійович (Москвитин Евгений Сергеевич, Moskvitin Evgenij Sergeevich) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ» м. Харків.