

Корисна модель належить до електротехніки, зокрема до двополюсних пристроїв заміщення лінійного електричного кола синусоїдного струму, що складається з незалежних джерел синусоїдної напруги однакової частоти, резисторів, котушок індуктивності й конденсаторів, та може бути використаний для дослідження енергетичних властивостей первісного електричного кола за його спрощеною двополюсною моделлю, наприклад, для оптимізації параметрів навантаження з метою досягнення максимального ККД первісного електричного кола.

Далі в тексті заявки наступні терміни будуть мати наведені значення згідно з [1].

Пристрій (еквівалентне джерело напруги) Тевенена - двополюсник, яким, відповідно до однойменної теореми про еквівалентний генератор, можна замінити складне лінійне електричне коло зі збереженням його зовнішньої вольт-амперної характеристики. Його використовують для розрахунку та моделювання струму й напруги навантаження, приєднаного до двох зазначених полюсів, як в колах постійного, так і синусоїдного струму.

Комплексне діюче значення електрорушійної сили (ЕРС), напруги або струму - комплексне число, модуль якого дорівнює діючому (вимірюваному) значенню, а аргумент - початковій фазі відповідних синусоїдних ЕРС, напруги або струму.

Комплексний опір елемента або гілки - комплексне число, що дорівнює відношенню комплексних діючих значень напруги та струму елемента або гілки. Комплексний опір гілки, що складається з послідовно з'єднаних резистора з електричним опором R , котушки з індуктивністю L та конденсатора з ємністю C , на круговій частоті ω має вигляд $\bar{Z} = R + jX$, дійсна частина якого називається активним опором, а уявна частина $X = \omega L - 1/\omega C$ - реактивним опором. Існує взаємно однозначна відповідність між комплексним опором гілки та R , L , C - параметрами фізичних елементів, що утворюють цю гілку при своєму послідовному з'єднанні.

Комплексна провідність гілки - комплексне число, обернене до комплексного опору гілки.

Комплексна потужність - комплексне число, що дорівнює добутку комплексного діючого значення напруги на комплексно спряжене діюче значення струму, причому дійсна частина комплексної потужності дорівнює активній потужності, а уявна частина - реактивній потужності.

Відомий пристрій Тевенена заміщення лінійного активного електричного кола постійного струму відносно двох полюсів [1], що містить джерело постійної напруги, приєднане до двох зазначених полюсів через послідовно увімкнений резистор, причому величина ЕРС джерела дорівнює напрузі електричного кола постійного струму між двома полюсами в режимі їх розриву, а величина опору послідовно увімкненого резистора дорівнює відношенню зазначеної напруги розриву до струму електричного кола постійного струму між двома полюсами в режимі їх замикання. Цей пристрій може бути використаний для розрахунку чи моделювання струму та напруги навантаження первісного електричного кола, увімкненого між двома зазначеними полюсами.

Недоліком такого двополюсного пристрою заміщення є незадовільне відображення енергетичних властивостей первісного кола, зокрема в режимі розриву вихідних полюсів ККД пристрою заміщення Тевенена дорівнює 100 %, в той час як для первісного кола ця величина є нульовою через потужність навантаження, що дорівнює нулеві, та наявність внутрішніх втрат енергії, що не відображає пристрій заміщення Тевенена.

Відомий пристрій заміщення лінійного активного електричного кола постійного струму відносно двох полюсів [2], що містить джерело постійної напруги, приєднане до двох зазначених полюсів через послідовно увімкнений резистор та шунтоване паралельно увімкненим резистором, причому величина ЕРС джерела дорівнює напрузі електричного кола постійного струму між двома полюсами в режимі їх розриву, величина опору послідовно увімкненого резистора дорівнює відношенню зазначеної напруги розриву до струму електричного кола постійного струму між двома полюсами в режимі їх замикання, а величина опору паралельно увімкненого резистора дорівнює відношенню квадрата напруги розриву до сумарної потужності джерел електричного кола постійного струму в режимі розриву полюсів. Наявність паралельно увімкненого резистора в цьому пристрої заміщення дозволила адекватно відтворювати потужність втрат первісного кола, зокрема, в режимі розриву вихідних полюсів.

Недоліком цього пристрою заміщення є те, що він призначений для лінійних електричних кіл постійного струму з лінійною залежністю сумарної потужності від струму навантаження, приєднаного до двох зазначених полюсів, причому коефіцієнтом пропорційності цієї залежності є величина ЕРС ідеального джерела, що не дозволяє моделювати лінійні активні електричні кола постійного струму з іншим коефіцієнтом пропорційності зазначеної залежності, що, зокрема, має місце за наявності залежних джерел напруги.

Відомий пристрій заміщення лінійного активного електричного кола постійного струму відносно двох полюсів [3], що містить джерело постійної напруги, приєднане до двох зазначених полюсів через послідовно увімкнений резистор та шунтоване паралельно увімкненим резистором, причому величина ЕРС джерела дорівнює напрузі електричного кола постійного струму між двома полюсами в режимі їх розриву, величина опору послідовно увімкненого резистора дорівнює відношенню зазначеної напруги розриву до струму електричного кола постійного струму між двома полюсами в режимі їх замикання, а

величина опору паралельно увімкненого резистора дорівнює відношенню квадрата напруги розриву до сумарної потужності джерел електричного кола постійного струму в режимі розриву полюсів, а також залежне джерело струму, кероване струмом навантаження, вихідні затискачі якого приєднані до джерела постійної напруги, а коефіцієнт передачі залежного джерела струму забезпечує лінійну залежність сумарної потужності від струму навантаження з коефіцієнтом пропорційності, притаманним первісному колу, зокрема, за наявності в ньому залежних джерел напруги.

Недоліком цього пристрою заміщення є те, що він призначений виключно для лінійних електричних кіл постійного струму, і не може бути застосований у лінійних електричних колах синусоїдного струму, енергетичні властивості яких визначає як активна, так і реактивна потужність. Остання виникає через протікання синусоїдних струмів через реактивні елементи, відповідники яких відсутні у даному пристрої заміщення.

Найближчим аналогом є пристрій заміщення лінійного активного електричного кола синусоїдного струму відносно двох полюсів, зображений на рис. 7 [4], який містить незалежне джерело синусоїдної напруги, величина ЕРС якого E дорівнює напрузі первісного електричного кола синусоїдного струму між двома полюсами в режимі їх розриву, а саме незалежне джерело напруги приєднане до двох зазначених полюсів через послідовно увімкнений перший активно-реактивний опір, комплексна величина $R+jX$ якого дорівнює еквівалентному комплексному опору первісного електричного кола синусоїдного струму відносно двох зазначених полюсів при видалених внутрішніх джерелах, при цьому паралельно до незалежного джерела синусоїдної напруги увімкнені другий активно-реактивний опір, комплексну величину якого вибирають за умови рівності комплексних потужностей пристрою заміщення та первісного електричного кола в режимі розриву полюсів, та вихідні затискачі залежного джерела струму, керуючі затискачі якого увімкнені в коло першого активно-реактивного опору, а коефіцієнт передачі забезпечує лінійні залежності активної та реактивної потужностей пристрою заміщення від струму навантаження з коефіцієнтами пропорційності, притаманними первісному колу, для виконання чого комплексний коефіцієнт передачі $\bar{k}_j$ залежного джерела струму, керованого струмом, має задовольняти умову:

$$\bar{k}_j^* = \Delta \tilde{S} \times \bar{Z}_{ab}^* / E^2 - 1, (1)$$

де $*$ знак комплексного спряження;

$\Delta \tilde{S}$ - різниця комплексних потужностей усіх джерел первісного електричного кола синусоїдного струму в режимах замикання та розриву полюсів;

$\bar{Z}_{ab} = R + jX$ - еквівалентний комплексний опір первісного електричного кола синусоїдного струму відносно двох зазначених полюсів при видалених внутрішніх джерелах.

Недоліком найближчого аналога є те, що він є комплексною еквівалентною схемою первісного лінійного активного електричного кола синусоїдного струму, яку застосовують для спрощення розрахунків в комплексному методі аналізу таких кіл шляхом оперування з комплексними числами [1]. І, якщо комплексним опорам гілок електричного кола синусоїдного струму та напругам джерел є відповідники у вигляді фізичних елементів та їх моделей, то модель залежного джерела струму з комплексним коефіцієнтом передачі відсутня у стандартних програмах симуляції електричних кіл. Це не дозволяє моделювати зазначений пристрій заміщення в часовій області для безпосереднього вимірювання таких його енергетичних характеристик, як активна й реактивна потужність, коефіцієнт потужності, тощо.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення пристрою заміщення лінійного активного електричного кола синусоїдного струму відносно двох полюсів шляхом внесення структурних змін, в результаті яких лінійні залежності активної та реактивної потужностей пристрою заміщення від струму навантаження з коефіцієнтами пропорційності, притаманними первісному колу, будуть забезпечуватися залежними джерелами струму з коефіцієнтами передачі, які виражаються дійсними числами, що, відповідно, дозволить моделювати зазначений пристрій заміщення в часовій області для безпосереднього вимірювання його енергетичних характеристик, еквівалентних аналогічним характеристикам первісного електричного кола синусоїдного струму.

Поставлену задачу вирішують тим, що в пристрої заміщення лінійного активного електричного кола синусоїдного струму відносно двох полюсів, який містить незалежне джерело синусоїдної напруги, величина електрорушійної сили E якого дорівнює напрузі первісного електричного кола синусоїдного струму між двома полюсами в режимі їх розриву, а саме незалежне джерело напруги приєднане до двох зазначених полюсів через послідовно увімкнений перший активно-реактивний опір, комплексна величина $R+jX$ якого дорівнює еквівалентному комплексному опору первісного електричного кола синусоїдного струму відносно двох зазначених полюсів при видалених внутрішніх джерелах, при цьому паралельно до незалежного джерела синусоїдної напруги увімкнені другий активно-реактивний опір, комплексну величину якого вибирають за умови рівності комплексних потужностей пристрою заміщення та первісного електричного кола в режимі розриву полюсів, та вихідні затискачі залежного джерела струму, керуючі затискачі якого увімкнені в коло першого

активно-реактивного опору, а коефіцієнт передачі забезпечує лінійні залежності активної та реактивної потужностей пристрою заміщення від струму навантаження з коефіцієнтами пропорційності, притаманними первісному колу, згідно з корисною моделлю, залежне джерело струму кероване напругою активної частини першого активно-реактивного опору та уведене друге залежне джерело струму, кероване напругою реактивної частини першого активно-реактивного опору, вихідні затискачі якого також приєднані паралельно незалежному джерелу синусоїдної напруги, причому коефіцієнти передачі G_1 та G_2 , відповідно, згаданих першим та другим залежними джерелами струму, є дійсними числами, такими, що добуток $G_1 R$ дорівнює дійсній частині, а добуток $G_2 X$ дорівнює взятій з протилежним знаком уявній частині комплексного виразу:

$$\Delta \tilde{S} \times (R - jX) / E^2 - 1,$$

де $\Delta \tilde{S}$ є різницею комплексних потужностей усіх джерел первісного електричного кола синусоїдного струму в режимах замикання та розриву полюсів, причому від'ємна величина кожного зі згаданих коефіцієнтів передачі відповідає однаковій полярності залежного та незалежного джерел, а додатна величина відповідає різній полярності цих джерел.

Для обґрунтування можливості реалізації лінійних залежностей активної та реактивної потужностей пристрою заміщення від струму навантаження з коефіцієнтами пропорційності, притаманними первісному колу, за допомогою залежних джерел струму з коефіцієнтами передачі у вигляді дійсних чисел, наведемо вираз для сумарного комплексного діючого значення струму залежних джерел запропонованого пристрою заміщення, приєднаних до незалежного джерела напруги

$$\dot{I}_E = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = G_1 \dot{V}_R + G_2 \dot{V}_X = G_1 R \dot{I}_0 + G_2 j X \dot{I}_0 = (G_1 R + j G_2 X) \dot{I}_0, \quad (2)$$

де $\dot{V}_R = R \dot{I}_0$, $\dot{V}_X = j X \dot{I}_0$ - комплексні діючі значення напруг, відповідно, активної та реактивної частин першого активно-реактивного опору, комплексна величина якого $R + jX$;

$\dot{I}_0$ - комплексне діюче значення струму зовнішнього навантаження, приєданого до зазначених двох полюсів, що замикається через перший активно-реактивний опір запропонованого пристрою заміщення та незалежне джерело напруги.

З (2) випливає, що спільна дія залежних джерел струму, керованих зазначеними напругами, забезпечує еквівалентний комплексний коефіцієнт передачі за струмом

$$\bar{k}_J = \dot{I}_E / \dot{I}_0 = G_1 R + j G_2 X. \quad (3)$$

Як показано в [4], величина цього коефіцієнта має задовольняти умові (1) для забезпечення лінійних залежностей активної та реактивної потужностей пристрою заміщення від струму навантаження з коефіцієнтами пропорційності, притаманними первісному колу. Прирівнявши комплексно спряжений вираз правої частини (3) до правої частини (1), отримаємо комплексне рівняння:

$$G_1 R - j G_2 X = \Delta \tilde{S} \times (R - jX) / E^2 - 1, \quad (4)$$

з якого випливає, що коефіцієнти передачі G_1 та G_2 залежних джерел струму, уведених в пристрої заміщення, є дійсними числами, такими, що добуток $G_1 R$ дорівнює дійсній частині, а добуток $G_2 X$ дорівнює взятій з протилежним знаком уявній частині комплексного виразу в правій частині (4).

При цьому від'ємна величина кожного з дійсних коефіцієнтів передачі G_1 та G_2 відповідає зменшенню споживаного струму незалежного джерела напруги, для реалізації чого залежне та незалежне джерела мають з'єднувати з однаковою полярністю, а за додатної величини зазначеного коефіцієнта необхідно встановити різну полярність з'єднання цих джерел.

Таким чином, застосування в двополюсному пристрої заміщення лінійного активного електричного кола синусоїдного струму [4] залежного джерела струму, керованого напругою, та введення другого залежного джерела струму, керованого напругою, з зазначеним способом увімкнення їх керуючих та вихідних електродів забезпечує енергетичну еквівалентність цього пристрою заміщення первісному електричному колу синусоїдного струму за умови (4) для дійсних значень коефіцієнтів передачі залежних джерел, що дозволяє моделювати зазначений пристрій заміщення в часовій області.

Суть корисної моделі пояснюють графічні матеріали, де представлені:

на Фіг. 1 - загальна схема запропонованого двополюсного пристрою заміщення лінійного активного електричного кола синусоїдного струму відносно двох полюсів;

на Фіг. 2 - схема, яка є прикладом моделювання в часовій області запропонованого двополюсного пристрою заміщення відносно двох полюсів в програмному середовищі Multisim для відтворення вольт-амперної характеристики та енергетичних властивостей первісного лінійного активного електричного кола синусоїдного струму, представленого на рис. 8 [4].

Пристрій заміщення згідно схеми на Фіг. 1 містить незалежне джерело синусоїдної напруги, величина ЕРС якого E дорівнює напрузі первісного електричного кола синусоїдного струму між двома полюсами a та b в режимі їх розриву, а саме незалежне джерело напруги приєднане до двох зазначених полюсів через послідовно увімкнений перший активно-реактивний опір Z_1 , комплексна величина $R + jX$

якого дорівнює еквівалентному комплексному опору $\bar{Z}_{ab}$ первісного електричного кола синусоїдного струму відносно двох зазначених полюсів при видалених внутрішніх джерелах, при цьому паралельно до незалежного джерела синусоїдної напруги увімкнені другий активно-реактивний опір Z_2 , комплексну величину $\bar{Z}_2$ якого вибирають за умови рівності комплексних потужностей пристрою заміщення та первісного електричного кола в режимі розриву полюсів ab, та вихідні затискачі залежного джерела струму J_1 , керуючі затискачі якого увімкнені в коло першого активно-реактивного опору, а коефіцієнт передачі забезпечує лінійні залежності активної та реактивної потужностей пристрою заміщення від струму навантаження I_0 з коефіцієнтами пропорційності, притаманними первісному колу. Запропоновано керувати залежним джерелом струму J_1 напругою VR активної частини першого активно-реактивного опору та увести друге залежне джерело струму J_2 , кероване напругою V_X реактивної частини першого активно-реактивного опору, вихідні затискачі якого також приєднані паралельно незалежному джерелу синусоїдної напруги. Коефіцієнти передачі G_1 та G_2 , відповідно згаданих першим та другим залежних джерел струму, є дійсними числами, такими, що добуток $G_1 R$ дорівнює дійсній частині, а добуток $G_2 X$ дорівнює взятій з протилежним знаком уявній частині комплексного виразу:

$$\Delta \tilde{S} \times (R - jX) / E^2 - 1,$$

де $\Delta \tilde{S}$ є різницею комплексних потужностей усіх джерел первісного електричного кола синусоїдного струму в режимах замикання та розриву полюсів ab, причому від'ємна величина кожного зі згаданих коефіцієнтів передачі G_1 та G_2 відповідає однаковій полярності залежного та незалежного джерел, а додатна величина відповідає різній полярності цих джерел. В схемі на Фіг. 1 показана різна полярність паралельного з'єднання незалежного джерела E та залежних джерел J_1 та J_2 при їх паралельному з'єднанні, що відповідає додатним величинам G_1 та G_2 . Навантаження двополюсного пристрою заміщення, через яке замикається струм I_0 послідовно увімкненого активно-реактивного опору Z_1 , на схемі Фіг. 1 умовно не показане, оскільки воно не входить до складу заявленого пристрою.

Динамічний стан роботи пристрою заміщення характеризується незмінністю зв'язків між його елементами та сталістю їх параметрів.

Додавання зовнішніх вимірювальних пристроїв дозволить в процесі моделювання пристрою заміщення в часовій області по завершенні перехідних процесів безпосередньо вимірювати його енергетичні та вольт-амперні характеристики, еквівалентні аналогічним характеристикам первісного електричного кола синусоїдного струму.

В схемі комп'ютерної моделі заявленого пристрою заміщення, зображений на Фіг. 2, незалежне джерело синусоїдної напруги з частотою 50 Hz позначене V2. Воно приєднане до двох вихідних полюсів, між якими підключений вольтметр U2, через послідовно увімкнений перший активно-реактивний опір, реалізований елементами R1, L2. При цьому паралельно до джерела V2 увімкнені другий активно-реактивний опір, реалізований елементами R2, C1 та вихідні затискачі залежного джерела струму I1, керуючі затискачі якого увімкнені в коло першого активно-реактивного опору. Запропоновано керувати цим залежним джерелом струму напругою активної частини R1 першого активно-реактивного опору та увести друге залежне джерело струму I2, кероване напругою реактивної частини L2 першого активно-реактивного опору, вихідні затискачі якого також приєднані паралельно незалежному джерелу V2. Активно-індуктивне навантаження пристрою заміщення реалізоване послідовним ланцюгом $R4=4,8\Omega$ і $L1=11,459\text{mH}$ та повністю ідентичне навантаженню первісного кола. Величину струму навантаження контролює амперметр U1, а енергетичні характеристики пристрою заміщення відображає ватметр XWM1, приєднаний до єдиного незалежного джерела напруги V2.

Для розрахунку не визначених параметрів елементів схеми, наведеної на Фіг. 2, використаємо наступні параметри комплексної схеми заміщення, зображеної на рис. 7 [4], що еквівалентна первісному колу за комплексною вольт-амперною характеристикою та комплексною потужністю:

$$\dot{E}_{ab} = 40e^{j\arctg(4/3)}\text{В} - \text{комплексне діюче значення ЕРС джерела еквівалентного генератора}$$

Тевенена, модуль якого за властивістю теореми про еквівалентний генератор в комплексній області [1] дорівнює вимірюваній напрузі первісного електричного кола синусоїдного струму між двома полюсами в режимі їх розриву;

$\bar{Z}_{ab} = R + jX = 15,2 + j114\Omega$ - еквівалентний комплексний опір первісного електричного кола синусоїдного струму відносно двох зазначених полюсів при видалених внутрішніх джерелах;

$\bar{Y}_B = 0,2 + j0,1\text{См}$ - комплексна провідність $\bar{Y}_B$ активно-реактивного опору Барбі, що встановлюється паралельно джерелу еквівалентного генератора Тевенена, а величина якої вибрана з умови рівності комплексних потужностей пристрою заміщення та первісного електричного кола в режимі розриву полюсів;

$\bar{k}_J^* = -128 - j0,96$ - комплексно спряжене значення коефіцієнта передачі залежного джерела струму, керованого струмом, що забезпечує лінійні залежності активної та реактивної потужностей пристрою заміщення від струму навантаження з коефіцієнтами пропорційності, притаманними первісному колу.

Загальна методика визначення цих параметрів для лінійних електричних кіл синусоїдного струму довільної складності, утворених незалежними джерелами синусоїдної напруги однакової частоти та активно-реактивними опорами наведена в [4].

Розраховуємо параметри запропонованого пристрою заміщення:

- оскільки величина ЕРС незалежного джерела синусоїдної напруги E дорівнює напрузі первісного електричного кола синусоїдного струму між двома полюсами в режимі їх розриву, то вона дорівнює модулю комплексного діючого значення ЕРС джерела еквівалентного генератора Тевенена:

$$E = |\dot{E}_{ab}| = 40\text{В};$$

- розділивши параметри активної та реактивної частин першого активно-реактивного опору ($R=15,2\text{ Ом}$, $X=11,4\text{ Ом}$), визначаємо параметри елементів, що його відтворюють на Фіг. 2:

$$R_1=15,2\Omega; L_2=11,4/2\times 50\pi=36,287\text{ мГн};$$

- оскільки точки приєднання другого активно-реактивного опору та елемента Барбі збігаються, а їх параметри визначаються з однакової умови рівності комплексних потужностей пристрою заміщення та первісного електричного кола в режимі розриву полюсів, то другий комплексний опір $\bar{Z}_2$ та комплексна провідність $\bar{Y}_B$ є взаємно оберненими величинами, тому

$$\bar{Z}_2 = \frac{1}{\bar{Y}_B} = \frac{1}{0,2 + j0,1} = \frac{10 \times (2 - j)}{5} = 4 - j2; R_2=4\Omega; C_1 = \frac{1}{2 \times 100\pi} = 159155\text{ мФ};$$

- коефіцієнти передачі G_1 та G_2 уведених залежних джерел струму знаходимо з умови, що добуток $G_1 R$ дорівнює дійсній частині, а добуток $G_2 X$ дорівнює взятій з протилежним знаком уявній частині правої частини комплексного виразу (1), що розрахована в [4]:

$$G_1 = \frac{\text{Re}(\bar{k}_J^*)}{R} = \frac{-128}{15,2} = -0,08421; G_2 = \frac{\text{Im}(\bar{k}_J^*)}{X} = \frac{-0,96}{11,4} = -0,08421.$$

Отримані коефіцієнти передачі G_1 та G_2 є дійсними числами, причому від'ємна величина коефіцієнта G_1 відповідає зменшенню споживаного струму незалежного джерела напруги й паралельному з'єднанню цього залежного та незалежного джерел з однаковою полярністю, а додатна величина коефіцієнта G_2 свідчить про необхідність паралельного з'єднання цього залежного та незалежного джерел з різною полярністю, що і реалізовано в схемі на Фіг. 2.

Проаналізуємо представлені на Фіг. 2 показання віртуальних вимірювальних приладів, отримані в результаті моделювання в часовій області пристрою заміщення з запропонованою структурою та розрахованими параметрами. Виміряні величини струму та напруги навантаження $U_H=9,6\text{В}$; $I_H=1,6\text{А}$ відповідають повному опору навантаження $Z_H = \sqrt{4,8^2 + 3,6^2} = 6\text{ Ом}$ та зовнішній вольт-амперній характеристиці первісного кола. Показання ватметра XWM1 для активної потужності та коефіцієнта потужності $P=342,524\text{ Вт}$; $\text{pf}=0,84149$ відрізняються від розрахованих в [4] величин $P=342,528\text{ Вт}$; $\cos\varphi=0,8415$ та виміряних у первісному колі $P=342,531\text{ Вт}$; $\text{pf}=0,84151$ в межах відносних похибок $0,02\%$ та $0,003\%$ відповідно, що свідчить про відтворення енергетичних властивостей первісного кола запропонованим пристроєм заміщення в межах похибки, зумовленої округленням параметрів елементів.

Таким чином, заявлений пристрій заміщення лінійного активного електричного кола синусоїдного струму відносно двох полюсів дозволяє досягти нового технічного результату - забезпечити лінійні залежності активної та реактивної потужностей пристрою заміщення від струму навантаження з коефіцієнтами пропорційності, притаманними первісному колу, при дійсних значеннях коефіцієнтів передачі уведених залежних джерел струму, керованими напругами першого активно-реактивного опору, що дозволяє моделювати зазначений пристрій заміщення в часовій області з безпосереднім вимірюванням його енергетичних та вольт-амперних характеристик, еквівалентних аналогічним характеристикам первісного електричного кола синусоїдного струму.

Джерела інформації:

1. Основи теорії кіл: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. Ч. 1 / Ю.О. Коваль, Л.В. Гринченко, І.О. Милютченко, О.І. Рибін / За заг. редакцією В.М. Шокало та В.І. Правди. Компанія СМІТ, 2008. - 432 с.

2. Barbi I. Unified Power Conservative Equivalent Circuit for DC Networks. IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 178230–178237. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3027489>.

3. Патент України на корисну модель UA 146620. МПК H02M 3/00, H02M 3/02 (2006.01). Пристрій для заміщення лінійного активного електричного кола постійного струму відносно двох полюсів / Артеменко М.Ю., Петров Д.О., Кутафін Ю.В.; заявл. 13.11.2020; опубл. 04.03.2021. – Бюл. № 9. <https://ukrpatent.org/uk/articles/bulletin-ip>

4. Артеменко, М.Ю., et al. "ДВОПОЛЮСНА ЗАСТУПНА СХЕМА ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ, ЕКВІВАЛЕНТНА ЗА КОМПЛЕКСНОЮ ПОТУЖНІСТЮ". Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, вип. 72, Грудень 2025, с. 062, <https://prc.ied.org.ua/index.php/proceedings/article/view/418>.

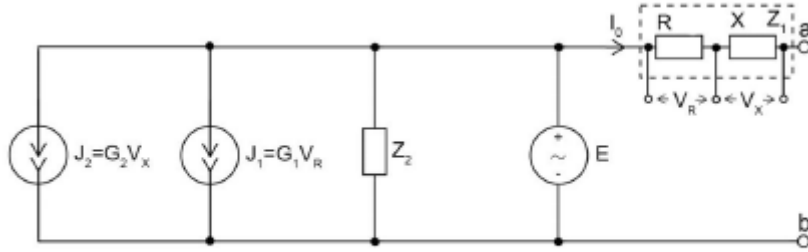


Fig. 1

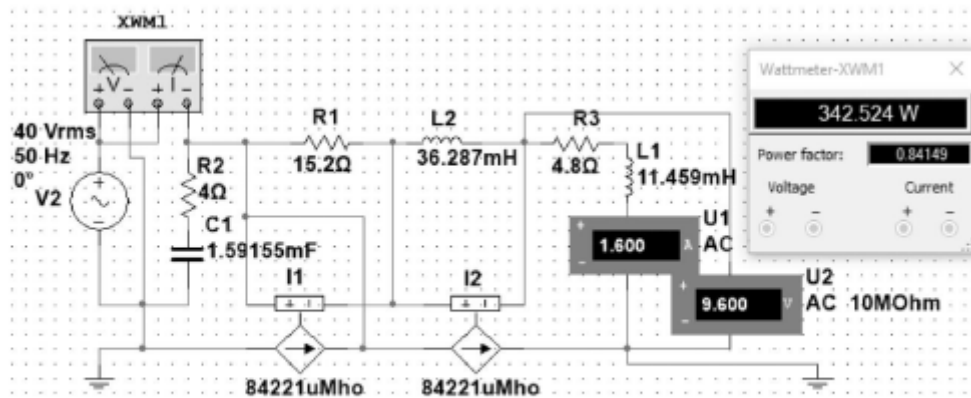


Fig. 2