

О.Є. РУБАНЕНКО, Є.А. БОНДАРЕНКО, І.О. ГУНЬКО, А.М. КОВАЛЬ
Вінницький національний технічний університет

ВПЛИВ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ТЕХНІЧНИЙ СТАН ОБЛАДНАННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

В статті досліджуються перехідні процеси під час увімкнення-вимкнення електричного обладнання розподільних міських електричних мереж, наприклад фотовольтаїчних електричних станцій (ФЕС), в локальних електричних системах. Наведені результати досліджень впливу ФЕС з інверторами PCS-9563 та RC фільтрами, що містять в кожній фазі конденсатор ємністю 300 мкФ та котушку індуктивністю 0,1 мГн, на струми в обмотках високої напруги вимірювальних трансформаторів напруги та доведено, що під час комутаційних перенапруг, викликаних почерговим увімкненням або вимкненням декількох інверторів ФЕС, можуть зростати струми в обмотках високої напруги цих трансформаторів, а у кабельних муфт може збільшуватись струм через опір ізоляції. Аналіз результатів застосування швидкого перетворення Фур'є під час дослідження графіку зміни струму в високовольтній обмотці свідчить про те, що в струмі цієї обмотки серед найбільш впливових на графік присутня не лише гармоніка промислової частоти 50 Гц, а й інші гармоніки, наприклад, гармоніки з частотами 150, 300 та 450 Гц. Такі перенапруги можуть викликати спрацьовування розрядників та зменшення їх комутаційного ресурсу. Показано, що використання методів математичного моделювання, методів теорії електричних кіл та програмного пакету Wolfram Mathematica дозволяє отримати математичні моделі процесів зміни струмів та напруг в обладнанні локальних електричних систем з розподіленими джерелами енергії (РДЕ). Звертається увага на те, що складність математичних виразів струмів та напруг в обладнанні локальних електричних систем з РДЕ, отриманих з використанням програмного пакету Wolfram Mathematica, погіршує їх сприйняття, розуміння та аналіз, тому доцільнішим є використання в дослідженні комп'ютерних моделей, створених в програмному забезпеченні PS CAD, Matlab Simulink і т. н.

Ключові слова: розподільні електричні мережі, відновлювані джерела енергії, пошкоджуваність електричного обладнання, трансформатор напруги, кабельна лінія, операторний метод розрахунку.

A. RUBANENKO, E. BONDARENKO, I. HUNKO, A. KOVAL
Vinnytsia National Technical University

INFLUENCE OF RENEWABLE SOURCES OF ENERGY ON THE TECHNICAL CONDITION OF EQUIPMENT OF DISTRIBUTION NETWORKS

The transient processes has been researched in the article during the switching on and switching-off of electrical equipment (EE), for instance, of photovoltaic power plants (PPP), in the local electrical systems (LES). Were shown results of PPP impact studies with inverters PCS-9563 and RC filters, which are contained in each phase are capacitor with a capacity of 300 μ F and an inductor of 0,1 mH, on the currents in the high voltage winding of measuring transformers of voltage, and it is proved that during switching overvoltage, caused by the switching ON or OFF of several PPP inverters, the currents in high voltage windings of these transformers may grow, while in the cable couplings can increase the current due to insulation resistance. The analysis of the results of using the fast transform of Fourier during the study of the curve of change of current in a high-voltage winding indicates that in the current of this winding, among the most of influential on the graph, there are not only harmonics of an industrial frequency of 50 Hz, but also other harmonics, for example, harmonics, with frequencies 150, 300 and 450 Hz. Such overvoltages can cause operations of arresters and reduce their switching resources. It is shown that the use of methods of mathematical modelling, methods of the theory of electric circuits and software package of Wolfram Mathematica allows to obtain mathematical models of processes of change of currents and voltages in the equipment of local electrical systems with renewable sources of energy (RSE). Attention is drawn to the fact that the complexity of mathematical expressions of currents and voltages in the equipment of local electrical systems with RSE, which have been obtained using the software package of Wolfram Mathematica worsens their perception and understanding and their analysis, therefore, more expedient using the research computer models created in the software providing by PS CAD, Matlab Simulink, etc.

Key words: distribution electric networks, renewable energy sources, damage to electrical equipment, voltage transformer, cable line, operator calculation method.

Вступ

Ознакою сьогодення є все ширше використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [1, 5], які розглядаються як один із найбільш перспективних шляхів вирішення зростаючих проблем енергозабезпечення. Часто такі риси ВДЕ, як екологічна чистота та невичерпна ресурсна база, стають визначальними їх перевагами в умовах зростаючих темпів забруднення довкілля та швидкого зменшення ресурсів органічного палива.

Забезпечення енергетичної незалежності та вступ України до Євросоюзу – два найважливіших стратегічних завдання розвитку сучасної України. Одна з умов успішного вирішення обох завдань – максимальне збільшення в стратегічному балансі частки енергії, виробленої за рахунок власних енергетичних ресурсів, серед яких і використання ВДЕ, таких, наприклад, як сонячні електричні станції (СЕС) [5]. Україна має великий потенціал різних ВДЕ.

Використання ВДЕ у відповідності до потреб в електроенергії привертає увагу з точки зору вирішення проблеми дефіциту електричної енергії, особливо для споживачів, надійність електропостачання яких потребує покращення, наприклад, розташованих у віддалених та важкодоступних районах [12, 14].

Також відомо, що в Україні існують проблеми зумовлені використанням традиційних джерел

енергії. Причинами цього є застарілі технології виробництва та експлуатації, вичерпання ресурсу електричного обладнання (ЕО) підприємств електроенергетичної галузі, що разом з низькою ефективністю використання палива призводить до значних обсягів шкідливих викидів. Втрати електричної енергії під час транспортування, розподілу та використання електроенергії і тепла, а також монопольна залежність енергетичної галузі від імпорту енергоносіїв, ще більш ускладнюють ситуацію на енергетичному ринку України. Проте, збільшення обсягів генерування розподіленими джерелами енергії (РДЕ) без врахування особливостей їх роботи в електричних мережах може призводити до погіршення якості електричної енергії [1, 15] та потребує оцінювання надійності роботи локальних систем з розосередженою генерацією [17].

Мета і задачі роботи

За таких умов метою досліджень є аналіз впливу відновлюваних джерел енергії на технічний стан ЕО. Відповідно до мети автори розв'язували наступні задачі: дослідити струми в обмотках високої напруги вимірювальних трансформаторів напруги, гармонійні складові у напругах 6–35 кВ особливо під час під час комутаційних перенапруг, викликаних почерговим увімкненням або вимкненням декількох інверторів фотовольтаїчних електричних станцій (ФЕС) [18]; проаналізувати струми через опір ізоляції кабельних муфт, зумовлені появою в фазних напругах гармонійних складових значення перенапруг та можливість спрацьовування розрядників під час увімкнення та вимкнення РДЕ; дослідити доцільність використання методів математичного моделювання, а саме програмного пакету Wolfram Mathematica та програмного забезпечення PS CAD для дослідження процесів в ЕО ЛЕС.

Аналіз попередніх досліджень

Так в роботі [3] звертається увага на пошкоджуваність високовольтних силових трансформаторів з причини погіршення технічного стану високовольтних вводів. Експлуатація трансформаторів та оптимальне керування їх РПН ускладнюються в умовах, коли трансформатор відпрацював понад 25 років використав свій паспортний ресурс. Враховуючи пошкоджуваність високовольтних вводів, в статті [3] стверджується те, що оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем (ЕЕС) може бути забезпечено підвищенням надійності високовольтних вводів. Дослідженням показників якості електричної енергії в ЛЕС присвячені роботи як багатьох вітчизняних, так й іноземних вчених [6]. Всі вони акцентують увагу на тому, що напруга у вузлах ЛЕС під час експлуатації може бути меншою або більшою граничних допустимих значень. Гармонійні складові струмів і напруг в розподільних електричних мережах можуть мати понад нормовані відхилення.

Однак більшість вітчизняних дослідників розглядає ФЕС як джерела електричної енергії, що генерується з метою продажу її в ДП «Енергоринок» [4, 18]. Тому, з метою зменшення втрат електричної потужності під час транспортування електроенергії генерованої ФЕС, в дослідженнях розглядаються розподільні електричні мережі 6+10 кВ [2]. Водночас, іноземні дослідники додатково розглядають і мережі 0,4 кВ, в яких ФЕС, в першу чергу, задовольняють потреби в електроенергії їх власників, і лише надлишок електроенергії передається від ФЕС в ЛЕС та часто споживається найближчими до ФЕС споживачами. За таких умов декілька інверторів ФЕС різних власників можуть бути приєднані до однієї ЛЕС в різних вузлах 0,4 кВ.

Враховуючи складність проведення досліджень показників якості електричної енергії в ЛЕС з декількома різнотипними РДЕ, що зумовлено відсутністю декількох РДЕ в одній ЛЕС, пропонуємо здійснити такі дослідження з використанням математичних та комп'ютерних моделей.

Результати досліджень, свідчать про те, що, поряд з іншими, в ЛЕС часто пошкоджуються вимірювальні трансформатори напруги 6–10 кВ, кабельні муфти, розрядники, тощо. В оглядах відмов [3] згадуються пошкодження трансформаторів напруги, електродвигунів, комплектних розподільних пристроїв зовнішньої установки (КРУН), нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН) і вентильних розрядників. Однією з причин таких пошкоджень можуть бути внутрішні перенапруги.

Також відомо те, що в електричних мережах 3–35 кВ з ізолюваною нейтраллю відбуваються перехідні процеси, які негативно позначаються на роботі вимірювальних трансформаторів напруги (ТН). Саме з цієї причини середній термін служби ТН в деяких випадках не перевищує 3–5 років для таких класів напруг. До цих перехідних процесів можна віднести процеси під час: ферорезонансних перенапруг; комутаційних перенапруг; зміщення нейтралі; наявності постійної складової магнітного потоку в ТН при автоколивальних процесах в мережі.

В [3] зазначається те, що непоодинокі пошкодження ЕО в мережах з ізолюваною нейтраллю (6+35 кВ) викликані ферорезонансом тому, що це явище викликає перенапруги або надструми, на вплив яких обладнання не розраховане і від яких воно не завжди якісно захищене.

Крім того, ферорезонанс виникає частіше, ніж інші види впливів. Він особливо небезпечний тим, що може існувати тривалий час.

Феромагнітними елементами в електричних мережах є силові трансформатори, дугогасильні реактори, вимірювальні трансформатори струму і напруги, електродвигуни, тобто все апарати, в яких є котушка з феромагнітним (сталевим) осердям. Особливістю котушки з феромагнітним сердечником є нелінійна залежність струму від напруги (потoku). У звичайних умовах в такому колі немає умов для збудження резонансу, тобто незатухаючих коливань.

Однак, при впливах на феромагнітний елемент, що призводять до насичення сердечника, відбувається плавна зміна індуктивності цього елемента, що створює можливість виникнення резонансу між

індуктивністю і ємністю.

Підставою для такого висновку є відсутність компенсуючих пристроїв у мережі, де необхідна їх експлуатація згідно з вимогами Правил технічної експлуатації, за наявності дугового замикання або просто будь-якого однофазного замикання на «землю» на початковій стадії розвитку пошкодження. Настільки спрощений підхід не дозволяє виявити справжні причини пошкоджень ЕО, а отже, розробити ефективні заходи щодо запобігання подібним випадкам. У ряді випадків пошкодження електричного обладнання пояснюються внутрішніми перенапругами в умовах, коли взагалі неможливо їх виникнення, наприклад, коли події починаються з міжфазного короткого замикання (КЗ). Однак, розвиток таких пошкоджень супроводжується перекриттям великих повітряних проміжків. Розглядаються пошкодження не тільки в комплектних розподільних пристроїв, де всі ізоляційні проміжки скорочені, а й пошкодження в закритому розподільному устаткуванні звичайного виконання з досить великими ізоляційними відстанями, що створює враження впливу перенапруг великої кратності. Насправді перекриття таких великих повітряних проміжків викликано впливом струму міжфазного КЗ, наприклад, на дефектні контактні з'єднання.

Отже необхідно боротися з причинами пошкодження ЕО міських [8] та сільських [9] електричних мереж, ЕО електротехнічних мереж систем електропостачання споживачів [7, 10], а не з наслідками. Такими причинами, серед багатьох інших, можуть бути перехідні процеси під час увімкнення – вимкнення ЕО розподільних міських електричних мереж, наприклад, ФЕС в ЛЕС.

В роботах [11–13, 15] доведено, що в розподільних електричних мережах, наприклад, 10 кВ виникають перенапруги. За певних умов в цих мережах під час резонансу струмів протікають надструми.

Отже доцільним є розглянути можливість, наприклад, інверторів ФЕС впливати на таку зміну параметрів розподільної мережі, за якої у вузлах мережі виникають перенапруги, а у вітках – протікають надструми.

В умовах експлуатації застарілого ЕО розподільних електричних мереж ЛЕС варто очікувати зростання його пошкоджуваності. В роботах різних авторів зазначається, що під час експлуатації таких РДЕ, як ФЕС [18], мають місце тимчасові погіршення показників якості електричної енергії [16], які також здатні викликати пошкодження ЕО.

Матеріали та методи дослідження.

Розглянемо моделі розподільних електричних мереж з пошкоджуваним високовольтним ЕО. В якості прикладу дослідимо вплив гармонійних складових напруги технічний стан високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги та муфт кабельних ліній.

Відомо, що кабельні лінії (КЛ) мають більшу ємність ізоляції ніж повітряні лінії електропередач. Велика ємність ізоляції особливо у кабельних муфт.

Для КЛ 10 кВ з ємністю в 0,0016 мкФ при збільшенні частоти до 300 Гц, струм в ізоляції КЛ становитиме 10,56 А, при гранично допустимому значенні – 300 мкА, а отже це може призвести до передчасного пошкодження ізоляції КЛ.

Результати досліджень свідчать про те, що зростання частоти (порядку) гармонійних складових в напрузі фаз кабельних ліній, викликає збільшення сили струму, що протікає через ізоляцію КЛ.

В якості РДЕ розглянемо ФЕС з інверторами PCS-9563, які використовуються на ФЕС, що приєднані до мереж ПАТ «Вінницяобленерго».

З метою зменшення впливу вищих гармонік у вихідних колах інверторів можуть бути встановлені RC фільтри: в кожній фазі – конденсатор ємністю 300 мкФ та котушка індуктивністю 0,1 мГн, розрахована на робочий струм $I_{роб} = 917$ А (потужність інвертора 500 кВт).

Розглянемо процеси зміни струму в первинній обмотці вимірювального трансформатора напруги та напруги на первинній обмотці цього трансформатора. Для цього на рис. 1 наведена заступна схема однієї фази мережі 10 кВ з приєднаними до неї RC фільтром інвертора ФЕС, джерелом змінної напруги (ФЕС), джерелом напруги у центрі живлення розподільної мережі, однофазним трансформатором напруги та лініями електропередач.

На заступній схемі мережі з РДЕ (рис. 1) показані: активний опір R_1 та індуктивність L_1 силового трансформатора 110/10 кВ приведені до шин 10 кВ до яких приєднаний вимірювальний трансформатор напруги 10 кВ. Активний опір R_2 та індуктивність L_2 – параметри обмотки високої напруги вимірювального трансформатора напруги, активний опір R_3 та індуктивність L_3 – параметри вітки намагнічування на заступній схемі вимірювального трансформатора напруги, активний опір R_4 та індуктивність L_4 – параметри вторинної обмотки разом з опором навантаження на заступній схемі вимірювального трансформатора напруги, активний опір R_5 , ємність C_6 відносно землі та індуктивність L_5 лінії електропередач від шин підстанції до якої приєднаний трансформатор напруги до шин підстанції до якої приєднаний силовий трансформатор 10/0,4 кВ. Параметри заступної схеми цього трансформатора представлені активним опором R_7 та індуктивністю L_7 – обмотки високої напруги цього трансформатора, активним опором R_8 та індуктивністю L_8 – параметрами вітки намагнічування на заступній схемі трансформатора, активним опором R_9 та індуктивністю L_9 – обмотки низької напруги приведені до високовольтної сторони. Також на схемі показані активний опір C_{10} та індуктивність L_{11} – параметри фільтра інвертора ФЕС. Активний опір фільтра не враховується тому, що його значення значно менше ніж індуктивний опір дроселя L_{11} . U_1 та U_2 – напруги джерел електрорушійних сил (ЕРС) центра живлення та ФЕС (ці параметри приведені до сторони 10 кВ).

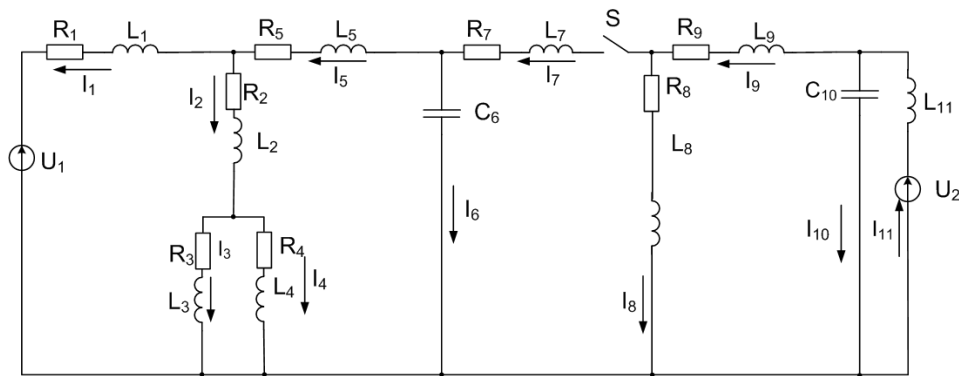


Рис. 1. Заступна схема мережі з РДЕ

Для схеми, наведеної на рис. 1, надаємо схему в операторній формі (рис. 2), враховуючи незалежні початкові умови.

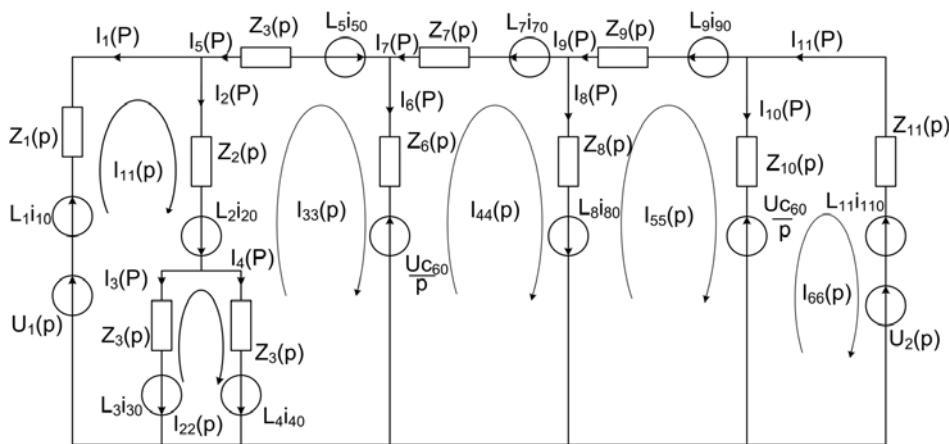


Рис. 2. Розрахункова схема в операторній формі запису

Розглянемо режим увімкнення ключа S в момент часу $t=0$ секунд, у який крива напруг $u_1(t)=u_2(t)=U_m \cdot \sin(\omega t)$ переходить через 0. В такому випадку незалежна початкова умова є дійсним числом, яке є результатом множення уявної частини комплексного числа відповідного струму (чи відповідної напруги) на $\sqrt{2}$.

Наприклад, миттєве значення струму:

$$i_1(t) = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \psi_{i1}), \tag{1}$$

де I_1 – діюче значення струму; ψ_{i1} – початкова фаза цього струму.

В момент часу $t = 0_+$:

$$i_1(0_+) = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\psi_{i1}) = \text{Im}(I_1) \cdot \sqrt{2}. \tag{2}$$

З метою спрощення розрахунків в заступній схемі не враховані нелінійні властивості кіл параметрів трансформаторів, які враховані в роботах [4, 15], що викликає похибку в кількісних результатах математичного моделювання, однак дозволяє здійснювати якісний аналіз процесів в досліджуваних колах заступної та розрахункової схем.

Незалежні початкові умови визначаються з розрахунку усталеного режиму роботи схеми до комутації, виконаного символічним методом, а саме: струми в індуктивностях $L_1 \div L_5, L_7 \div L_9$, напруги на ємностях $C_6 \div C_{10}$.

З метою дослідження змін струму в обмотці високої напруги вимірювального трансформатора напруги перехідного процесу, який виникає під час підключення ФЕС до мережі ЛЕС розрахунок виконуємо методом контурних струмів в операторній формі відповідно до схеми, показаної на рис. 2.

Джерела ЕРС $U_1(s)$ та $U_2(s)$ це операторні зображення синусоїдних функцій $u_1(t)$ та $u_2(t)$:

$$U_1(s) = [U_{m1} \cdot \omega] / (s^2 + \omega^2) \text{ та } U_2(s) = [U_{m2} \cdot \omega] / (s^2 + \omega^2).$$

Система рівнянь в операторній формі:

$$\begin{cases}
 I_{11} \cdot ((L_1 \cdot s + R_1) + (L_2 \cdot s + R_2) + (L_3 \cdot s + R_3)) - I_{22} \cdot (L_3 \cdot s + R_3) - I_{33} \cdot (L_2 \cdot s + R_2) = \\
 = U_1 + L_1 \cdot I_{10} + L_2 \cdot I_{20} + L_3 \cdot I_{30} \\
 I_{22} \cdot ((L_3 \cdot s + R_3) + (L_4 \cdot s + R_4)) - I_{11} \cdot (L_3 \cdot s + R_3) - I_{33} \cdot (L_4 \cdot s + R_4) = L_4 \cdot I_{40} - L_3 \cdot I_{30} \\
 I_{33} \cdot ((L_2 \cdot s + R_2) + (1/(C_6 \cdot s))) + (L_4 \cdot s + R_4) + (L_5 \cdot s + R_5)) - I_{11} \cdot (L_2 \cdot s + R_2) - \\
 - I_{22} \cdot (L_4 \cdot s + R_4) - I_{44} \cdot (1/(C_6 \cdot s)) = -L_4 \cdot I_{40} - L_2 \cdot I_{20} + L_5 \cdot I_{50} - (U_{C6}/s) \\
 I_{44} \cdot ((1/(C_6 \cdot s)) + (L_7 \cdot s + R_7) + (L_8 \cdot s + R_8)) - I_{33} \cdot (1/(C_6 \cdot s)) - I_{44} \cdot (L_8 \cdot s + R_8) = \\
 = (U_{C6}/s) \cdot L_7 \cdot I_{70} + L_8 \cdot I_{80} \\
 I_{55} \cdot ((L_8 \cdot s + R_8) + (L_9 \cdot s + R_9) + (1/(C_{10} \cdot s))) - I_{44} \cdot (L_8 \cdot s + R_8) - I_{66} \cdot (1/(C_{10} \cdot s)) = \\
 = -(U_{C10}/s) \cdot L_8 \cdot I_{80} - L_9 \cdot I_{90} \\
 I_{66} \cdot ((1/(C_{10} \cdot s)) + (L_{11} \cdot s)) - I_{55} \cdot (1/(C_{10} \cdot s)) = (U_{C10}/s) \cdot L_{11} \cdot I_{110} - U_2
 \end{cases} \tag{3}$$

де s – оператор Лапласа.

Результатом розв'язування системи рівнянь (3) з використанням пакету Wolfram Mathematica, є контурні струми, які в операторній формі запису мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 I_{11}(s) = & -((-R_4 - L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_{62} \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + \\
 & + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s)) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1) + ((- \\
 & - R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) - (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot \\
 & \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot ((I_{70} \cdot L_7 \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot U_{C6}/s)/(C_6 \cdot s) + (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) \cdot (I_{20} \cdot L_2 + I_{40} \\
 & \cdot L_4 \cdot I_{50} \cdot L_5 + U_{C6}/s))) / (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot \\
 & (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))) - (-(-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (- \\
 & - R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + \\
 & (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))); \\
 I_{22}(s) = & -(I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1) / ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) + ((-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot (-(-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot \\
 & (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))) \cdot (- \\
 & - I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1) + ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \\
 & \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot ((I_{70} \cdot L_7 \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot \\
 & U_{C6}/s)/(C_6 \cdot s) + (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) \cdot (I_{20} \cdot L_2 + I_{40} \cdot L_4 \cdot I_{50} \cdot L_5 + U_{C6}/s))) / (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot \\
 & (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))) - (-(-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (- \\
 & - R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (- \\
 & - 1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))); \\
 I_{33} = & -(I_{10} \cdot L_1 \cdot R_3 + I_{20} \cdot L_2 \cdot R_3 + I_{40} \cdot L_4 \cdot R_3 + I_{10} \cdot L_1 \cdot R_4 + I_{20} \cdot L_2 \cdot R_4 + I_{30} \cdot L_3 \cdot R_4 + I_{10} \cdot L_1 \cdot L_3 \cdot s + I_{20} \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot s + I_{10} \cdot L_1 \cdot L_4 \cdot s + I_{20} \cdot L_2 \cdot \\
 & \cdot L_4 \cdot s + I_{30} \cdot L_3 \cdot L_4 \cdot s + I_{40} \cdot L_4 \cdot L_3 \cdot L_4 \cdot s + R_3 \cdot U_1 + R_4 \cdot U_1 + L_3 \cdot s \cdot U_1 + L_4 \cdot s \cdot U_1) / (R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4 + R_3 \cdot R_4 + L_3 \cdot R_2 \cdot s + L_4 \cdot R_2 \cdot s + L_2 \cdot R_3 \cdot s + L_4 \cdot R_3 \cdot s + \\
 & + L_1 \cdot R_4 \cdot s + L_3 \cdot R_4 \cdot s + L_2 \cdot L_3 \cdot s^2 + L_2 \cdot L_4 \cdot s^2 + L_3 \cdot L_4 \cdot s^2) + (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) / (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot ((R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_3 \cdot L_3 \cdot \\
 & \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) / ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s))) \cdot (- \\
 & - ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot \\
 & \cdot s) + L_7 \cdot s))) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1) + ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) + (-R_4 \cdot \\
 & - L_4 \cdot s) \cdot ((I_{70} \cdot L_7 \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot U_{C6}/s)/(C_6 \cdot s) + (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) \cdot (I_{20} \cdot L_2 + I_{40} \cdot L_4 \cdot I_{50} \cdot L_5 + U_{C6}/s))) / (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot \\
 & \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))) - (-(-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot \\
 & (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))); \\
 I_{44} = & -(I_{30} \cdot L_3 + I_{40} \cdot L_4) / (C_6 \cdot s \cdot (R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s)) + ((-R_3 \cdot R_4 \cdot L_3 \cdot s \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot \\
 & - L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1)) / ((R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2) \cdot ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot \\
 & \cdot s + L_4 \cdot s)) - (C_6 \cdot (I_{70} \cdot L_7 \cdot s \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot s \cdot U_{C6})) / (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2) + ((R_3 + L_3 \cdot s) / (R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2)) - ((-R_3 \cdot R_4 \cdot L_3 \cdot s \cdot \\
 & \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) / ((R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2)) \cdot ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot \\
 & \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot (-(-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + \\
 & + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot \\
 & - I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1) + ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot \\
 & \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot ((I_{70} \cdot L_7 \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot U_{C6}/s)/(C_6 \cdot s) + (R_7 + 1/(C_6 \cdot \\
 & \cdot s) + L_7 \cdot s) \cdot (I_{20} \cdot L_2 + I_{40} \cdot L_4 \cdot I_{50} \cdot L_5 + U_{C6}/s))) / (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot \\
 & - L_4 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + \\
 & + L_7 \cdot s))) - (-(-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))); \\
 I_{55} = & -(I_{30} \cdot L_3 + I_{40} \cdot L_4) \cdot (R_8 + L_8 \cdot s) \cdot (1 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot s^2) / ((R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2) \cdot \\
 & (R_8 + R_9 + L_{11} \cdot s + L_8 \cdot s + L_9 \cdot s + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_8 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_9 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_8 \cdot s^3 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_9 \cdot s^3)) - ((R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (R_8 + L_8 \cdot s) \cdot \\
 & (1 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot s^2) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1)) / ((R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2) \cdot \\
 & \cdot (R_8 + R_9 + L_{11} \cdot s + L_8 \cdot s + L_9 \cdot s + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_8 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_9 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_8 \cdot s^3 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_9 \cdot s^3)) \cdot ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) - (I_{11} \cdot L_{11} + I_{80} \cdot L_8 + I_{90} \cdot L_9 + C_{10} \cdot I_{80} \cdot L_{11} \cdot L_8 \cdot s^2 + C_{10} \cdot I_{90} \cdot L_{11} \cdot L_9 \cdot s^2 + U_2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot s \cdot U_{C10}) / (R_8 + R_9 + L_{11} \cdot s + L_8 \cdot s + L_9 \\
 & + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_8 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_9 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_8 \cdot s^3 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_9 \cdot s^3) + (C_6 \cdot (1/(C_{10} \cdot s) + L_{11} \cdot s) \cdot (-R_8 \cdot L_8 \cdot s) \cdot (I_{70} \cdot L_7 \cdot s \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot s \cdot \\
 & U_{C6})) / ((1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2) \cdot (-1/(C_{10} \cdot s^2)) + (1/(C_{10} \cdot s) + L_{11} \cdot s) \cdot (R_8 + R_9 + 1/(C_{10} \cdot s) + L_8 \cdot s + L_9 \cdot s)) - (R_8 + L_8 \cdot s) \cdot (1 + C_{10} \cdot L_{11} \\
 & \cdot s^2) \cdot (R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_4 + R_3 \cdot R_4 + L_3 \cdot R_1 \cdot s + L_4 \cdot R_1 \cdot s + L_3 \cdot R_2 \cdot s + L_4 \cdot R_2 \cdot s + L_1 \cdot R_3 \cdot s + L_2 \cdot R_3 \cdot s + L_4 \cdot R_3 \cdot s + L_1 \cdot R_4 \cdot s + L_2 \cdot R_4 \cdot s + L_3 \cdot R_4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & s+L_1 L_3 s^2+L_2 L_3 s^2+L_1 L_4 s^2+L_2 L_4 s^2+L_3 L_4 s^2) \cdot (-((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + \\
 & (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) \cdot (-((I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-R_2-L_2 s) + (-R_4-L_4 s) \cdot (-I_{10} L_1-I_{20} L_2-I_{30} \\
 & L_3-U_1)) + ((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot (-((I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + \\
 & (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s)) + (-R_4-L_4 s) \cdot ((I_{70} L_7-I_{80} L_8-U_{c6}/s)/(C_6 s)+(R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) \\
 & (I_{20} L_2+I_{40} L_4-I_{50} L_5+U_{c6}/s))))/((R_2 R_3+R_2 R_4+R_3 R_4+L_3 R_2 s+L_4 R_2 s+L_2 R_3 s+L_4 R_3 s+L_2 R_4 s+L_3 R_4 s+L_2 L_3 s^2+L_2 L_4 \\
 & s^2+L_3 L_4 s^2) (1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+C_{10} L_{11} L_9 s^3) \cdot \\
 & (((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot ((-R_2-L_2 s) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (-R_3-L_3 s) \cdot (- \\
 & 1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) - (-R_2-L_2 s) \cdot (-R_3-L_3 s) \cdot + (R_1+R_2+R_3+L_1 \\
 & s+L_2 s+L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s)) \cdot ((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+ \\
 & 1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))))); \\
 & I_{66} = ((-I_{30} L_3+I_{40} L_4) \cdot (-R_8-L_8 s)) / ((R_4+L_4 s) (1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) \cdot (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} \\
 & R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+C_{10} L_{11} L_9 s^3)) - ((R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (R_8+L_8 s) \cdot (-I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-R_2-L_2 s) + (-R_4-L_4 s) \cdot (-I_{10} L_1- \\
 & I_{20} L_2-I_{30} L_3-U_1)) / ((R_4+L_4 s) \cdot (1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) \cdot (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+ \\
 & C_{10} L_{11} L_9 s^3) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot ((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) - (C_{10} (I_{110} L_{11} s+U_2-U_{c10})) / \\
 & (1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) \cdot (I_{110} L_{11} s+I_{80} L_8+I_{90} L_9+C_{10} I_{80} L_{11} L_8 s^2+C_{10} I_{90} L_{11} L_9 s^2+U_2+C_{10} L_{11} s U_{c10}) / (C_{10} s (1/(C_{10} s)+L_{11} s) \cdot \\
 & (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+C_{10} L_{11} L_9 s^3)) + (C_6 (-R_8-L_8 s) \cdot (I_{70} L_7 s-I_{80} L_8 s - \\
 & U_{c6})) / ((1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) \cdot (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+C_{10} L_{11} L_9 s^3)) - ((R_8+L_8 \\
 & s) \cdot (R_1 R_3+R_2 R_3+R_1 R_4+R_2 R_4+R_3 R_4+L_3 R_1 s+L_4 R_1 s+L_3 R_2 s+L_4 R_2 s+L_1 R_3 s+L_2 R_3 s+L_4 R_3 s+L_1 R_4 s+L_2 R_4 s+L_3 R_4 \\
 & s+L_1 L_3 s^2+L_2 L_3 s^2+L_1 L_4 s^2+L_2 L_4 s^2+L_3 L_4 s^2) \cdot (-((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + \\
 & (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) \cdot (-I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-R_2-L_2 s) + (-R_4-L_4 s) \cdot (-I_{10} L_1-I_{20} L_2-I_{30} \\
 & L_3-U_1)) + ((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot (-I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 \\
 & s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s)) + (-R_4-L_4 s) \cdot ((I_{70} L_7-I_{80} L_8-U_{c6}/s)/(C_6 s)+(R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) \cdot (I_{20} L_2+I_{40} L_4-I_{50} \\
 & L_5+U_{c6}/s)))) / ((R_2 R_3+R_2 R_4+R_3 R_4+L_3 R_2 s+L_4 R_2 s+L_2 R_3 s+L_4 R_3 s+L_2 R_4 s+L_3 R_4 s+L_2 L_3 s^2+L_2 L_4 s^2+L_3 L_4 s^2) \cdot \\
 & (1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) \cdot (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+C_{10} L_{11} L_9 s^3) \cdot (((-R_3-L_3 s) \cdot (- \\
 & R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot ((-R_2-L_2 s) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (-R_3-L_3 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + \\
 & (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) - (-R_2-L_2 s) \cdot (-R_3-L_3 s) \cdot (R_1+R_2+R_3+L_1 s+L_2 s+L_3 s) \cdot (-R_4- \\
 & L_4 s) \cdot ((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 \\
 & s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))))).
 \end{aligned}$$

З використанням пакету Wolfram Mathematica визначаємо струм у первинній обмотці трансформатора напруги в операторній формі запису:

$$\begin{aligned}
 & I_2(s) = I_{11}(s) - I_{33}(s); \tag{4} \\
 & I_2(s) = I_{11}(s) = -((-R_4 - L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s) + L_2 s+L_4 s+L_5 \\
 & s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) \cdot (-((I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-R_2-L_2 s) + (-R_4-L_4 s) \cdot (-I_{10} L_1-I_{20} L_2-I_{30} L_3-U_1)) + ((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \\
 & \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot (-((I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s)) + (-R_4-L_4 s) \cdot \\
 & ((I_{70} L_7-I_{80} L_8-U_{c6}/s)/(C_6 s) + (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) \cdot (I_{20} L_2+I_{40} L_4-I_{50} L_5+U_{c6}/s)))) / (((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot \\
 & (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot ((-R_2-L_2 s) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (-R_3-L_3 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 \\
 & s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) - (-R_2-L_2 s) \cdot (-R_3-L_3 s) + (R_1+R_2+R_3+L_1 s+L_2 s+L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot ((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 \\
 & s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s)))) - (I_{10} L_1 R_3+I_{20} L_2 \\
 & R_3+I_{40} L_4 R_3+I_{10} L_1 R_4+I_{20} L_2 R_4+I_{30} L_3 R_4+I_{10} L_1 L_3 s+I_{20} L_2 L_3 s+I_{10} L_1 L_4 s+I_{20} L_2 L_4 s+I_{30} L_3 L_4 s+I_{40} L_4 L_3 s+R_3 U_1+R_4 \\
 & U_1+L_3 s U_1+L_4 s U_1)/(R_2 R_3+R_2 R_4+R_3 R_4+L_3 R_2 s+L_4 R_2 s+L_2 R_3 s+L_4 R_3 s+L_2 R_4 s+L_3 R_4 s+L_2 L_3 s^2+L_2 L_4 s^2+L_3 L_4 s^2)+(((\\
 & -R_3-L_3 s)/(-R_4-L_4 s)-((R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-R_2-L_2 s) - (R_3-L_3 s)+(R_1+R_2+R_3+L_1 s+L_2 s+L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s)))/((-R_4-L_4 s) \cdot ((-R_3-L_3 s) \cdot \\
 & (-R_4-L_4 s) \cdot (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)))) \cdot (-((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 \\
 & s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) \cdot (-I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-R_2-L_2 s) + (-R_4-L_4 s) \cdot (-I_{10} L_1-I_{20} L_2-I_{30} L_3- \\
 & U_1)) + ((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot (-I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot \\
 & (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s)) + (-R_4-L_4 s) \cdot ((I_{70} L_7-I_{80} L_8-U_{c6}/s)/(C_6 s)+(R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) \cdot (I_{20} L_2+I_{40} L_4-I_{50} L_5+U_{c6}/s))))/(((R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot \\
 & (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot ((-R_2-L_2 s) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (-R_3-L_3 s) \cdot (1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot \\
 & (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) - (-R_2-L_2 s) \cdot (-R_3-L_3 s) + (R_1+R_2+R_3+L_1 s+L_2 s+L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot ((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - \\
 & (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))))).
 \end{aligned}$$

Звертаючи увагу на складність отриманих рівнянь, подальші розрахунки здійснюємо з урахуванням параметрів схеми:

активні опори у вітках схеми:

$$\begin{aligned}
 & R_1=2.52 \text{ Ом}; R_2=1800 \text{ Ом}; R_3=3420 \text{ Ом}; R_4=207000 \text{ Ом}; R_5=1.26 \text{ Ом}; R_7=1.28 \text{ Ом}; R_8=7482 \text{ Ом}; \\
 & R_9=3.28 \text{ Ом};
 \end{aligned}$$

індуктивності у вітках схеми:

$$\begin{aligned}
 & L_1=0.0736 \text{ Ом}; L_2=10.032 \text{ Гн}; L_3=56.70 \text{ Гн}; L_4=10.032 \text{ Гн}; L_5=0.00 \text{ Гн}; L_7=0.001 \text{ Гн}; L_8=23.83 \text{ Гн}; \\
 & L_9=0.01 \text{ Гн}; L_{11}=0.36 \text{ Гн};
 \end{aligned}$$

ємності у вітках схеми:

$$C_6=10^{-10} \text{ Ф}; C_{10}=8.335 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}.$$

З метою визначення струмів у індуктивних вітках схеми та напруг на конденсаторах в момент замикання контактів перемикача S у відповідності до законів комутації пропонується згорнути схему так, як це показано на рис. 3.

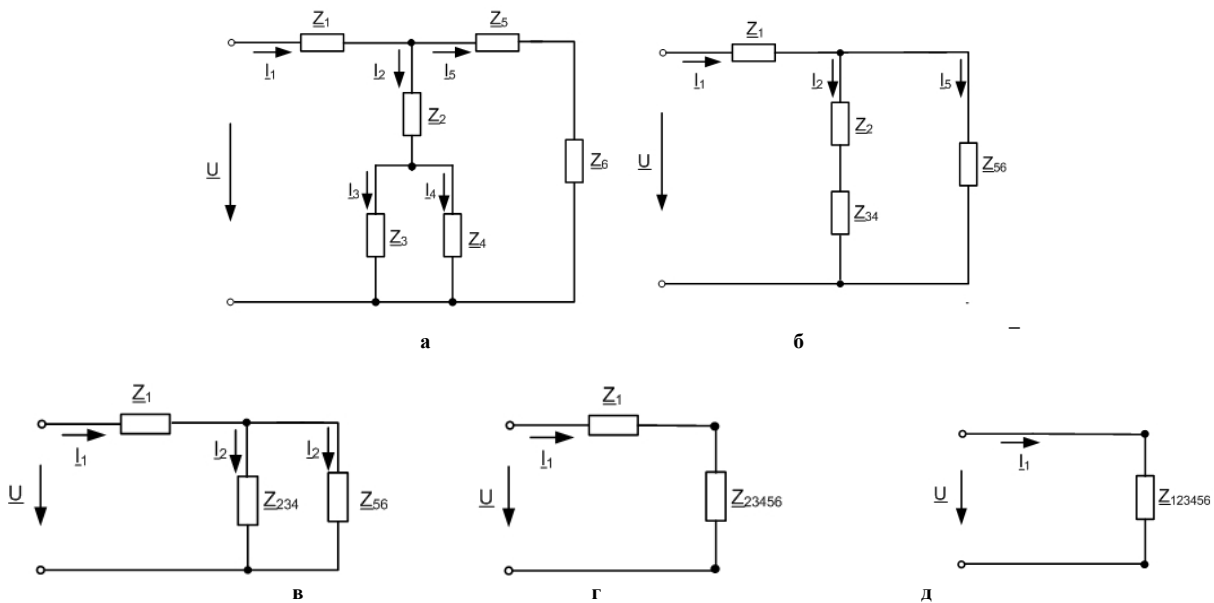


Рис. 3. Варіанти заступних схем під час послідовних перетворень схеми рис. 1

Відповідно до рис. 3 комплексні опори віток знаходяться за виразами:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1 = 2.52 + j \cdot 314 \cdot 0.0736 = 2.52 + j23.122, \text{ Ом}, \\
 Z_2 &= R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2 = 1800 + j \cdot 314 \cdot 10.032 = 1800 + j3151.646, \text{ Ом}, \\
 Z_3 &= R_3 + j \cdot \omega \cdot L_3 = 3420 + j \cdot 314 \cdot 56.7 = 3420 + j17812.83, \text{ Ом}, \\
 Z_4 &= R_4 + j \cdot \omega \cdot L_4 = 207000 + j \cdot 314 \cdot 10.032 = 2.07 \cdot 10^5 + j3151.646, \text{ Ом}, \\
 Z_5 &= R_5 + j \cdot \omega \cdot L_5 = 1.26 + j \cdot 314 \cdot 0.0024 = 1.26 + j0.754, \text{ Ом}, \\
 Z_6 &= -j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_6} = -j \cdot \frac{1}{314 \cdot 10^{-10}} = -j3.183 \cdot 10^7, \text{ Ом}, \\
 Z_7 &= R_7 + j \cdot \omega \cdot L_7 = 1.28 + j \cdot 314 \cdot 0.001 = 1.28 + j0.314, \text{ Ом}, \\
 Z_8 &= R_8 + j \cdot \omega \cdot L_8 = 7482 + j \cdot 314 \cdot 23.83 = 7482 + j7486.415, \text{ Ом}, \\
 Z_9 &= R_9 + j \cdot \omega \cdot L_9 = 3.28 + j \cdot 314 \cdot 0.01 = 3.28 + j3.142, \text{ Ом}, \\
 Z_{10} &= -j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_{10}} = -j \cdot \frac{1}{314 \cdot 1.667 \cdot 10^{-7}} = -j19094.774, \text{ Ом}, \\
 Z_{11} &= j \cdot \omega \cdot L_{11} = j \cdot 314 \cdot 0.36 = j113.097, \text{ Ом}, \\
 Z_{56} &= Z_5 + Z_6 = 1.26 + j0.754 - j3.183 \cdot 10^7 \approx 1.26 - j3.183 \cdot 10^7, \text{ Ом}, \\
 Z_{34} &= \frac{Z_3 \cdot Z_4}{Z_3 + Z_4} = \frac{(3420 + j17812.83) \cdot (2.07 \cdot 10^5 + j3151.646)}{3420 + j17812.83 + 2.07 \cdot 10^5 + j3151.646} = \\
 &= 4800.938 + j17096.214, \text{ Ом}, \\
 Z_{234} &= Z_2 + Z_{34} = 1800 + j3151.646 + 4800.938 + j17096.214 = \\
 &= 6600.938 + j20247.86, \text{ Ом}, \\
 Z_{23456} &= \frac{Z_{234} \cdot Z_{56}}{Z_{234} + Z_{56}} = \frac{(6600.938 + j20247.86) \cdot (1.26 - j3.183 \cdot 10^7)}{6600.938 + j20247.86 + 1.26 - j3.183 \cdot 10^7} = \\
 &= 6609.344 + j20259.376, \text{ Ом}, \\
 Z_{123456} &= Z_1 + Z_{23456} = 2.52 + j23.122 + 6609.344 + j20259.376 = \\
 &= 6611.864 + j20282.498, \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

Подальші розрахунки здійснюємо за наступних початкових умов:

струми в індуктивних елементах схеми у відповідності до першого закону комутації при $t=0$ секунд:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= U/Z_{123456} = 0.084 - 0.257 \cdot i, \quad I_1(0+) = I_{10} = -0.257 \text{ А}; \\
 U_{234} &= U_{234}/Z_{234} = 5767.342 - 1.291 \cdot i, \quad I_2(0+) = I_{20} = -0.257 \text{ А}; \\
 I_2 &= U_{234}/Z_{234} = 0.084 - 0.257 \cdot i, \quad I_2(0+) = I_{20} = -0.257 \text{ А}; \quad i \text{ т. п.} \\
 I_3(0+) &= I_{30} = -0.258 \text{ А}, \quad I_4(0+) = I_{40} = 0.001 \text{ А}; \quad I_5(0+) = I_{50} = 0 \text{ А}; \quad I_7(0+) = I_{70} = 0 \text{ А}; \quad I_8(0+) = I_8(0+) = I_{80} = -0.387 \text{ А}; \\
 I_9(0+) &= I_{90} = -0.387 \text{ А}; \quad I_{11}(0+) = I_{110} = -0.236 \text{ А},
 \end{aligned}$$

напруги на ємнісних елементах заступної схеми у відповідності до другого закону комутації:

$$U_{C6(0+)} = U_{c6} = -1.291 \text{ В}; \quad U_{C10(0+)} = U_{c10} = -43.192 \text{ В}.$$

Струм у первинній обмотці трансформатора напруги в операторній формі запису з врахуванням початкових умов:

$$I_2 = - \left\{ \frac{\left(\begin{aligned} &8.36447 \cdot 10^{44} + 2.16396 \cdot 10^{43} S + 1.38235 \cdot 10^{41} S^2 - 8.26273 \cdot 10^{37} S^3 - \\ &- 7.94195 \cdot 10^{35} S^4 - 2.13715 \cdot 10^{32} S^5 - 2.12433 \cdot 10^{28} S^6 - 9.1229 \cdot 10^{23} S^7 - \\ &1.42876 \cdot 10^{19} S^8 + 43267.4 S^9 + 1.75442 \cdot 10^{-9} S^{10} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} &(207000 + 10.032S)(98596 + S^2)(1.0876 \cdot 10^9 + 1.40023 \cdot 10^7 S + 1238.27S^2) \\ &\left(\begin{aligned} &1.13851 \cdot 10^{25} + 3.20509 \cdot 10^{23} S + 2.26043 \cdot 10^{21} S^2 + 3.062 \cdot 10^{17} S^3 + 9.56713 \cdot 10^{12} S^4 \\ &+ 31414.7 S^5 + 0.944215 \cdot S^6 \end{aligned} \right) \end{aligned} \right)} + \right. \\ \left. + \left(\begin{aligned} &- (1.0867 \cdot 10^9 + 1.40023 \cdot 10^7 S + 1238.27 S^2) \\ &- 1(207000 + 10.032S) \left(\begin{aligned} &- ((1 \cdot 10^{10} (9.22221 + 1.291/S)) / S) - \\ &1(-2.56819 - 1.291/S) \left(\begin{aligned} &7483.28 + \\ &1 \cdot 10^{10} / S + 23.831s - 1 \end{aligned} \right) (7482. + \\ &+ 23.83S) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) \right) + \right. \\ \left. + 14.6386(10^{20} / S^2 - 1)(208801. + 1 \cdot 10^{10} / S + 20.0664S) \right. \\ \left. \left(\begin{aligned} &7483.28 + 1 \cdot 10^{10} / S + 23.831s - 1 \end{aligned} \right) (7482. + 23.83S) \right) \right) \\ + 1 \left(\begin{aligned} &- 14.6386(1800 + 10.032S) - 1(207000 + 10.032s) (17.2257 - 2.5638 \cdot 10^6) / \left(\begin{aligned} &98596 + \\ &+ S^2 \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) \\ - 1(207000 + 10.032S) \left(\begin{aligned} &0 + 1(207000 + 10.032S) \left(\begin{aligned} &7483.28 + 1 \cdot 10^{10} / S + 23.831s - 1 \end{aligned} \right) \cdot \\ &7482. + 23.83S \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) - \\ - 1((210420 + 66.732S) \left(\begin{aligned} &1 \cdot 10^{20} / S^2 - 1(208801. + 1 \cdot 10^{10} / S + 20.0664S) \cdot \\ &(7483.28 + 1 \cdot 10^{10} / S + 23.831S - 1(7482. + 23.83S)) \end{aligned} \right)) / \\ \left(\begin{aligned} &3.20509 \cdot 10^{23} + 1.13851 \cdot 10^{25} / S + 2.26043 \cdot 10^{21} S + 3.062 \cdot 10^{17} S^2 \\ &+ 9.56713 \cdot 10^{12} S^3 + 31414.7 S^4 + 0.944215 S^5 \end{aligned} \right), \text{ A.} \end{aligned} \quad (5)$$

Після зворотного перетворення Лапласа математична модель струму $i_2(t)$ записується у вигляді наступного виразу:

$$I_2 = -239,213 \cdot e^{-20634t} + 239,213 \cdot e^{-20633,9t} - 6,82362 \cdot e^{-11229,8t} + 7,16698 \cdot e^{-11228,5t} - \\ - 4,50157 \cdot e^{-78,2618t} + 3,90903 \cdot e^{-78,488t} + 0,4989 \cdot e^{-65,32t} + \\ + 0,04 \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot t - 55,845^\circ) + e^{-632,223t} 0,237 \cdot 2 \cdot \sin(3,18309 \cdot 10^6 \cdot t - 90,136^\circ), \text{ A.}$$

Запропонована математична модель дає можливість досліджувати процес зміни струму в первинній обмотці вимірювального трансформатора напруги в часі, графік якого наведений на рис. 4

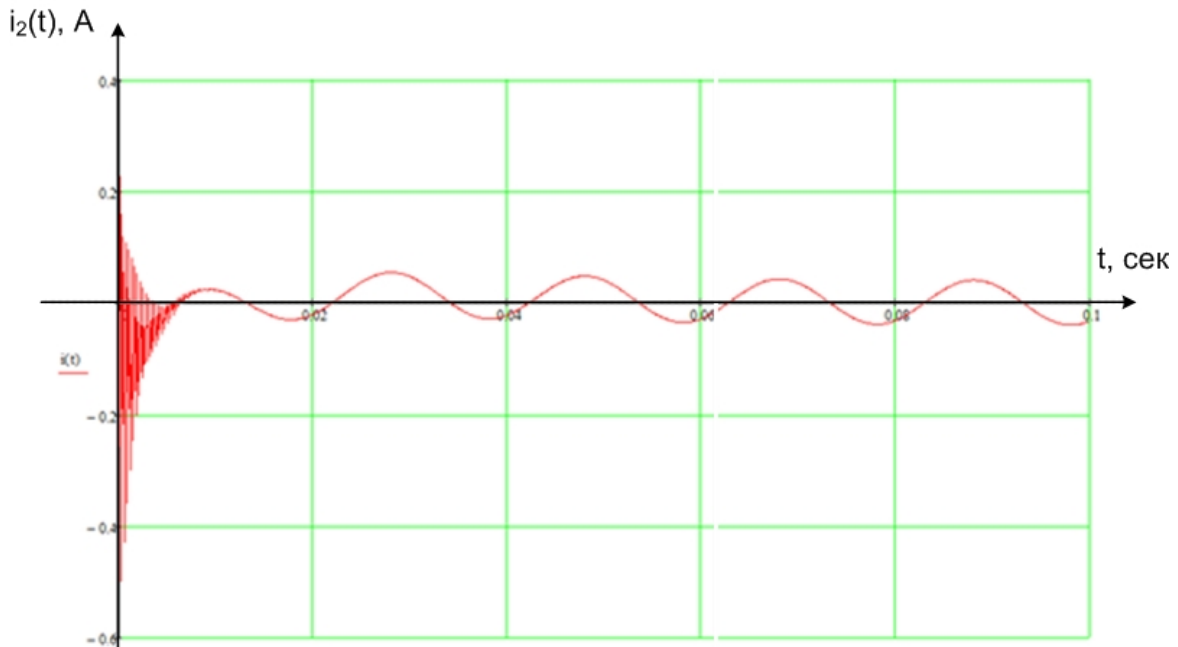


Рис. 4. Графік процесу зміни струму в первинній обмотці вимірювального трансформатора напруги в часі

Обговорення результатів

Отже, під час увімкнення ФЕС в розподільній мережі виникають високочастотні коливання (рис. 4). Просте перетворення Фур'є рівняння, яке описує графік, що показаний на рис. 4 свідчить про те, що в струмі $I_2(t)$ (рис. 4) присутні гармоніки, окрім промислової частоти 50 Гц, ще інші, досить впливові на графік гармоніки, частотами 150, 300 та 450 Гц.

Амплітудне значення високочастотних коливань струму в первинній обмотці вимірювального трансформатора напруги значно перевищує амплітудне значення струму в первинній обмотці в усталеному

режимі. Варто очікувати, що це призведе до значних перенапруг.

Громіздкість розрахунків свідчить про доцільність подальшого створення комп'ютерних моделей розподільних мереж з ФЕС, які дозволяють зменшити похибку моделювання за рахунок моделювання режимів у трифазних мережах та за рахунок використання вже розроблених комп'ютерних моделей вимірювальних та силових трансформаторів, які враховують нелінійні їх параметри. Таким загальнодоступним програмним забезпеченням є PS CAD, Matlab Simulink і т. п. [16]. Використаний авторами, під час досліджень, пакет PS CAD, маючи якісні комп'ютерні програмні моделі електричної мережі, фотовольтаїчних електричних станцій, ліній електропередач, силових трансформаторів і т. п., дозволяє швидко створювати та досліджувати комп'ютерні моделі ЛЕС.

Висновки

Результати дослідження струмів в обмотках високої напруги вимірювальних трансформаторів напруги свідчать про те, що зменшення частоти гармонійних складових у напругах 6–35 кВ особливо під час ферорезонансів та під час комутаційних перенапруг, викликаних почерговим увімкненням або вимкненням декількох інверторів ФЕС, призводить до значного зростання струмів у обмотках високої напруги цих трансформаторів та до перегріву і теплового пошкодження ізоляції.

У кабельних муфт поява в фазних напругах гармонійних складових 150, 300, 450 Гц призводить до зростання ємнісного струму, перегріву та пошкодження кабельних муфт. Перенапруги викликають не поодинокі спрацьовування розрядників та зменшення їх комутаційного ресурсу.

Використання методів математичного моделювання, методів теорії електричних кіл та програмного пакету Wolfram Mathematica або інших подібних до нього, які застосовуються під час сучасних наукових досліджень, дозволяє отримати математичні моделі процесів зміни струмів та напруг в обладнанні локальних електричних систем з РДЕ.

Складність математичних виразів струмів та напруг в обладнанні локальних електричних систем з РДЕ отриманих з використанням програмного пакету Wolfram Mathematica, або інших подібних до нього, ускладнює їх сприйняття, розуміння та аналіз, тому доцільнішим є використання в дослідженнях комп'ютерних моделей створених в програмному забезпеченні PS CAD, Matlab Simulink і т. п.

Література

1. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І.О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. □ 2015. □ № 2. – С. 134□145. □ ISSN 2307-5732.
2. Лежнюк П. Д. Вплив ВДЕ на втрати активної потужності в ЛЕС / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко, І.О. Гунько // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2015. □ № 3 (92). □ С. 84□90.
3. Лежнюк П.Д. Забезпечення оптимального керування нормальними режимами БЕС шляхом підвищення надійності високовольтних вводів / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Гірництво. - 2014. - № 25. - С. 92□100.
4. Лежнюк П.Д. Автоматизація роботи розосереджених джерел електроенергії в локальній електричній системі на основі концепції SMART Grid / П.Д. Лежнюк, О.В. Нікітєвич, О. А. Ковальчук, В.В. Кулик // Праці Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України : збірник наукових праць. Спеціальний випуск. – 2013. – С. 136–143. – ISSN 1727-9895.
5. Будівництво промислових СЕС [Електронний ресурс] / Інжинірингова компанія // Нові енергетичні технології. – Режим доступу : <http://iknet.com.ua/uk/presentation/full/ses>.
6. Timbus A. Evaluation of current controllers for distributed power generation system / A. Timbus, M. Lisser, R. Teodorescu, P. Rodriguez, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on power electronics. – 2009. – № 3. – P. 654□664. □ DOI: 10.1109/TPEL.2009.2012527.
7. Рекомендации по организации учета и анализа отключений в воздушных электрических сетях напряжением 0,38-20 кВ. – М. : ОРГРЭС, 1994. – 20 с.
8. Миловидов С. С. Надежность городских кабельных сетей [Електронний ресурс] / С. С. Миловидов, Д. Е. Павликов // Новости электротехники. – 2011. – № 2 (68) – С. 1□3. – Режим доступу : <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/68/07.php>.
9. Красников В. И. Аварийные режимы сельских электрических сетей напряжение 0,38 кВ / В. И. Красников // Повышение качества электрификации сельскохозяйственного производства и его электроснабжения. Труды МИИСП. – М., 1981. – С. 63□65.
11. Виноградов А.В. Анализ повреждаемости электрооборудования электротехнических сетей и обоснования мероприятий по повышению надёжности электроснабжения потребителей [Электронный ресурс] / А. В. Виноградов, Р. А. Пєрьков // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. □ 2015 □ № 12 (55).□ С. 12□21. – ISSN 2227-9407. – Режим доступу : <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz>.
12. Vachirasricirikul S. Design of Robust Control and Monitoring System for Microgrid Stabilization / S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, T. Chaiyatham // 6th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. – 2009. – С. 21–25. – DOI:

10.1109/ECTICON.2009.5136966.

13. Hartono B. Review of Microgrid Technology / B. Hartono, R. Setiabudy // International Conference on QiR. – 2013. – С. 127–132. – DOI: 10.1109/QiR.2013.6632550.

14. Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces / S. Cobreces, E. J. Bueno, D. Pizarro, F. J. Rodriguez, F. Huerta // IEEE transaction on instrumentation and measurement. – № 9. – 2009. – С. 3112–3121. – DOI: 10.1109/TIM.2009.2016883.

15. Peng F. Z. Control and protection of power electronics interfaced distributed generation systems in a customer-driven microgrid [Електронний ресурс] / F. Z. Peng, Y. W. Li, L. M. Tolbert // IEEE. □ 2009. – Режим доступу : <https://pdfs.semanticscholar.org/b96a/0a2c.pdf>.

16. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids a general approach toward standardization / J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. de Vicuña, M. Castilla // IEEE transactions on industrial electronics. □ 2011. □ № 1. □ С. 158–172. – DOI: 10.1109/TIE.2010.2066534.

17. Дерев'яно Д.Г. Аналіз впливу сонячних електростанцій на показники якості електричної енергії [Електронний ресурс] / Д.Г. Дерев'яно, В.В. Мирошніченко // Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ : зб. тез доповідей – 2013. – С. 439–445. – Режим доступу : <http://en.iee.kpi.ua/files/2013/konference2013.pdf>

18. Дерев'яно Д.Г. Особливості оцінки стійкості та надійності роботи локальних систем з розосередженою генерацією / Д.Г. Дерев'яно // Гірництво. – 2012. – № 21. – С. 28–32. – ISSN 2079-5688

19. Кравчук С. В. Узгодження графіків генерування фотоелектричних станцій та навантаження локальних електричних систем / С. В. Кравчук [та ін.] // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ "ХПІ", 2018. – № 9 (1285). – С. 44–50.

References

1. Lezhniuk P.D. Vplyv inverteriv SES na pokaznyky yakosti elektrychnoi enerhii v LES / P. D. Lezhniuk, O. Ye. Rubanenko, I.O. Hunko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky. □ 2015. □ № 2. – С. 134–145. □ ISSN 2307-5732.

2. Lezhniuk P. D. Vplyv VDE na vtraty aktyvnoi potuzhnosti v LES / P. D. Lezhniuk, O. O. Rubanenko, I.O. Hunko // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. – 2015. □ № 3 (92). □ С. 84–90.

3. Lezhniuk P.D. Zabezpechennia optymalnoho keruvannia normalnymy rezhymamy EES shliakhom pidvyshchennia nadiinosti vysokovoltynykh vvodiv / P. D. Lezhniuk, I. O. Hunko // Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho uni-versytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya: Hirnyctvo. - 2014. - № 25. - С. 92–100.

4. Lezhniuk P.D. Avtomatyzatsiia roboty rozoseredzhenykh dzherel elektroenerhii v lokalnii elektrychnii systemi na osnovi kontseptsii SMART Grid / P.D. Lezhniuk, O.V. Nikitorovych, O. A. Kovalchuk, V.V. Kulyk // Pra-tsi Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy : zbirnyk naukovykh prats. Spetsialnyi vypusk. – 2013. – С. 136–143. – ISSN 1727-9895.

5. Budivnytstvo promyslovykh SES [Elektronnyi resurs] / Inzhynirynhova kompaniia // Novi enerhetychni tekhnologii. – Rezhym dostupu : <http://iknet.com.ua/uk/presentation/full/ses>.

6. Timbus A. Evaluation of current controllers for distributed power generation system / A. Timbus, M. Lissner, R. Teodorescu, P. Rodriguez, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on power electronics. – 2009. – № 3. – С. 654–664. □ DOI: 10.1109/TPEL.2009.2012527.

7. Rekomendatsyy po orhanyzatsyy ucheta y analiza otkliucheny v vozdushnykh elektrycheskykh setiakh na-priazhenyem 0,38-20 kV. – М. : ORHRЭС, 1994. – 20 s.

8. Mylovydov S. S. Nadezhnost horodskyykh kabelnykh setei [Elektronnyi resurs] / S. S. Mylovydov, D.E. Pavlykov // Novosti elektrotekhniki. – 2011. – № 2 (68) – С. 1–3. – Rezhym dostupu : <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/68/07.php>.

9. Krasnykov V. Y. Avariynye rezhymy selskykh elektrycheskykh setei napriazhenye 0,38 kV / V. Y. Kra-snykov // Povyshenye kachestva elektryfikatsyy selskokhoziaistvennoho proyzvodstva y cho elektrosnabzheniya. Tруды МЫУСР. – М., 1981. – С. 63–65.

10. Vynohradov A.V. Analiz povrezhdaemosti elektrooborudovaniya elektrotekhnicheskyykh setei y obos-novaniya meropriyatiy po povysheniyu nadezhnosti elektrosnabzheniya potrebytelei [Elektronnyi resurs] / A.V. Vynohradov, R. A. Perkov // Vestnyk Nyzhehorodskoho hosudarstvennoi ynzhenerno-ekonomicheskoyi yns-tytut. □ 2015 □ № 12 (55). □ С. 12–21. – ISSN 2227-9407. – Rezhym dostupu : <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz>.

11. Vachirasricirikul S. Design of Robust Control and Monitoring System for Microgrid Stabilization / S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, T. Chaiyatham // 6th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. – 2009. – С. 21–25. – DOI: 10.1109/ECTICON.2009.5136966.

12. Hartono B. Review of Microgrid Technology / B. Hartono, R. Setiabudy // International Conference on QiR. – 2013. – С. 127–132. – DOI: 10.1109/QiR.2013.6632550.

13. Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces / S. Cobreces, E.J. Bueno, D. Pizarro, F. J. Rodriguez, F. Huerta // IEEE transaction on instrumentation and measurement. – № 9. – 2009. – С. 3112–3121. – DOI: 10.1109/TIM.2009.2016883.

14. Peng F. Z. Control and protection of power electronics interfaced distributed generation systems in a cus-tomer-driven microgrid [Elektronnyi resurs] / F. Z. Peng, Y. W. Li, L. M. Tolbert // IEEE. □ 2009. – Rezhym dostu-pu : <https://pdfs.semanticscholar.org/b96a/0a2c.pdf>.

15. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids a general approach toward standardiza-tion / J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. de Vicuña, M. Castilla // IEEE transactions on industrial electronics. □ 2011. □ № 1. □ С. 158–172. – DOI: 10.1109/TIE.2010.2066534.

16. Derevianko D.H. Analiz vplyvu soniachnykh elektrostansii na pokaznyky yakosti elektrychnoi enerhii [Elektronnyi resurs] / D.H. Derevianko, V.V. Myroshnychenko // Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna. Naukovi pratsi NTUU «KPI», ІЕЕ : зб. тез доповідей – 2013. – С. 439–445. – Rezhym dostupu : <http://en.iee.kpi.ua/files/2013/konference2013.pdf>

17. Derevianko D.H. Osoblyvosti otsinky stiikosti ta nadiinosti roboty lokalnykh system z rozosere-dzhenoiu heneratsiieiu / D.H. Derevianko // Hirnyctvo. – 2012. – № 21. – С. 28–32. – ISSN 2079-5688

18. Kravchuk S. V. Uzghodzhennia hrafikiv heneruvannia fotoelektrychnykh stantsii ta navantazhennia lokal-nykh elektrychnykh system / S. V. Kravchuk [ta in.] // Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI" : zб. nauk. pr. Ser.: Novi rishen-nia v suchasnykh tekhnolohiiakh. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – № 9 (1285). – С. 44–50.

Рецензія/Peer review : 7.09.2018 р.

Надрукована/Printed :20.11.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кутін В.М.