

А. Ф. ЖАРКІН, чл.-кор. НАНУ, докт. техн. наук, заст. дир. з н.р., Інститут електродинаміки НАНУ, Київ;
А. Г. ПАЗЄЄВ, канд. техн. наук., ст. наук. співр., Інститут електродинаміки НАНУ, Київ;
В. О. НОВСЬКИЙ, докт. техн. наук, пров. наук. співр., Інститут електродинаміки НАНУ, Київ;
Д. О. МАЛАХАТКА, інж. 1-ї кат., Інститут електродинаміки НАНУ, Київ.

ЯКІСТЬ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ТРИФАЗНИХ АКТИВНИХ КОРЕКТОРІВ КОЕФІЦІЄНТУ ПОТУЖНОСТІ

Вступ. Одним з напрямків побудови систем електроживлення (СЕЖ) автономних об'єктів та відповідальних споживачів відносно великої потужності є комбінований принцип. За ним живлення окремих пристроїв електронної апаратури здійснюється від низки джерел вторинного електроживлення (ДВЕЖ), які самі живляться від стабільної проміжної мережі постійної напруги. Таку мережу створює спільний для всієї системи вхідний трифазний перетворювач (ВТП). Як зазначено у літературі [1 – 4], до переваг таких систем можна віднести можливість значного підвищення надійності за умови побудови за модульним принципом та введенням незначного резервування та широкі можливості нарощування потужності шляхом підключення додаткових модулів. Крім того, при використанні в якості ВТП трифазних активних коректорів коефіцієнту потужності (АККП), що побудовані на основі однофазних модулів АККП, можливе забезпечення як підвищеної надійності, так і найжорсткіших норм сучасних стандартів по забезпеченню ЕМС напівпровідникових перетворювачів з мережею живлення.

Розглянемо спрощену структурну схему СЕЖ, яку наведено на рис. 1. Живлення СЕЖ здійснюється від первинного джерела електроенергії, в якості якого можуть виступати автономний генератор або мережа напруги загального використання (на схемі представлені трьома джерелами ЕРС E_a, E_b, E_c , що утворюють трифазну систему, та еквівалентними опорами $Z_a - Z_0$). До первинного джерела безпосередньо підключені однофазні ($Z_1 - Z_3$) та трифазне ($Z_4 - Z_6$) навантаження і ВТП з системою зворотного зв'язку (СЗЗ). Всі навантаження живляться від ДВЕЖ з вихідними напругами $U_1 - U_n$, необхідного рівня та форми. ДВЕЖ в свою чергу підключені до проміжної мережі постійної стабілізованої напруги $U_{пром}$, що утворюється ВТП.

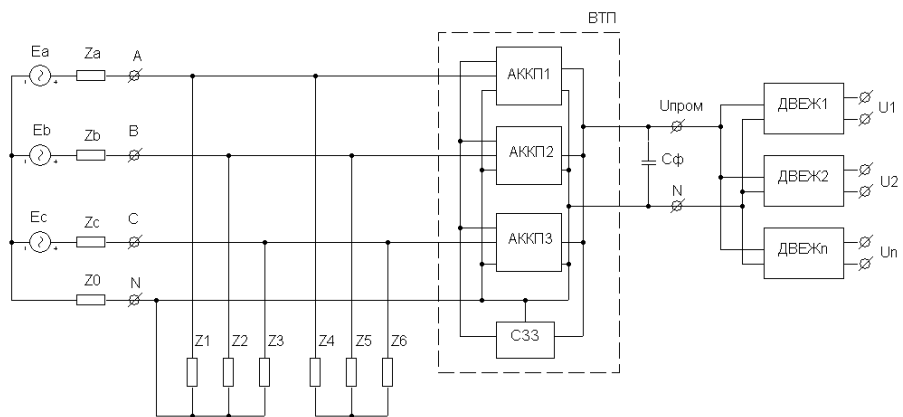


Рис. 1. Структурна схема СЕЖ.

ВТП є трифазним АККП і складається з трьох однофазних модулів АККП1-АККП3, підключених до фазних напруг джерела живлення та з'єднаних паралельно по виходу. Кожен з модулів АККП має свою систему керування (СК) та використовує спільну систему зворотного зв'язку. До виходу ВТП приєднано ємність вихідного фільтра C_f і навантаження R_n (ДВЕЖ). Так як СЗЗ є спільною для трьох модулів АККП, то при симетричній вхідній мережі, симетричних однофазних і трифазних навантаженнях та однакових параметрах силових елементів модулів та їх СК забезпечується рівномірне навантаження кожного з АККП. В такому випадку трифазний АККП по відношенню до первинного джерела електроенергії є аналогом симетричного активного навантаження, а в СЕЖ мають місце симетричні режими. Наведений в [2] аналіз електромагнітних процесів у ідеальному з точки зору ЕМС з мережею трифазному АККП показав, що коли від симетричної мережі споживаються синусоїдальні, симетричні струми, синфазні з напругами живлення, то по відношенню до мережі такий перетворювач є аналогом активного, лінійного та симетричного навантаження, причому в сталих режимах вхідна потужність перетворювача не залежить від часу, а пульсації вихідної напруги, кратні частоті мережі, відсутні. Тому відпадає потреба у застосуванні фільтруючих елементів зі значними масогабаритними показниками на його виході, що призводить до покращення показників ВТП та СЕЖ в цілому.

Однак навіть при симетричній системі напруг первинного джерела електроенергії в наведеній СЕЖ можливі несиметричні режими, обумовлені неоднаковими навантаженнями фаз. В таких випадках аналіз роботи вхідного трифазного перетворювача з метою вибору значень параметрів елементів та СК і СЗЗ необхідно проводити з урахуванням можливої несиметрії трифазної системи напруг на його вході.

Метою роботи є дослідження впливу параметрів системи керування, системи зворотного зв'язку та вихідного фільтру на якість вихідної напруги трифазних АККП, що побудовані на основі однофазних модулів в стаціонарних симетричних і несиметричних режимах роботи.

Виклад основного матеріалу. Багатомодульний ВТП може бути утворений на основі однофазних АККП з гальванічним зв'язком входу і виходу та вихідною напругою, що може бути обрана на рівні амплітудного значення вхідної напруги, які було запропоновано в [5]. Такі модулі однофазних АККП можуть бути поєднані в багатомодульний трифазний АККП без використання додаткових засобів. Структурна схема трифазного перетворювача наведена на рис. 2. Номінальне значення вихідної напруги обрано близьким до максимального значення амплітуди фазної вхідної напруги, а саме 350В. Так як у ВТП кожен з модулів АККП підключений на фазну напругу, їх робота в частині примусового формування вхідного струму в трифазній схемі не відрізняється від роботи в однофазній схемі. Електромагнітні процеси в однофазних перетворювачах були детально розглянуті в [5, 6], тож зазначимо головне.

У СК кожного модуля за еталонний сигнал приймається сигнал з виходу перемножувача ПМ, який утворюється шляхом аналогового перемноження сигналів з ДВХН та СЗ3. Еталонний сигнал прямо пропорційний відповідній фазній напрузі, а його рівень залежить від сигналу зворотного зв'язку v_{os} . Сигнал v_{os} виробляється спільною СЗ3 і є однаковим для всіх модулів. У СК порівнюються еталонний сигнал та сигнал з датчика вхідного струму, на основі чого виробляється імпульсна послідовність керування ключем змінного струму К таким чином, щоб сформувати вхідний струм, що близький до еталонного сигналу. Автоматичне керування рівнем еталонного сигналу дає змогу керувати рівнем потужності, що споживається від мережі живлення, а значить і забезпечувати стабілізацію вихідної напруги ВТП. По виходу АККП з'єднані паралельно, та підключені до конденсатора вихідного фільтру C_n , який згладжує високочастотні пульсації вихідної напруги, обумовлені імпульсним характером процесів у АККП та пульсацією вхідної потужності при несиметричній вхідній напрузі.

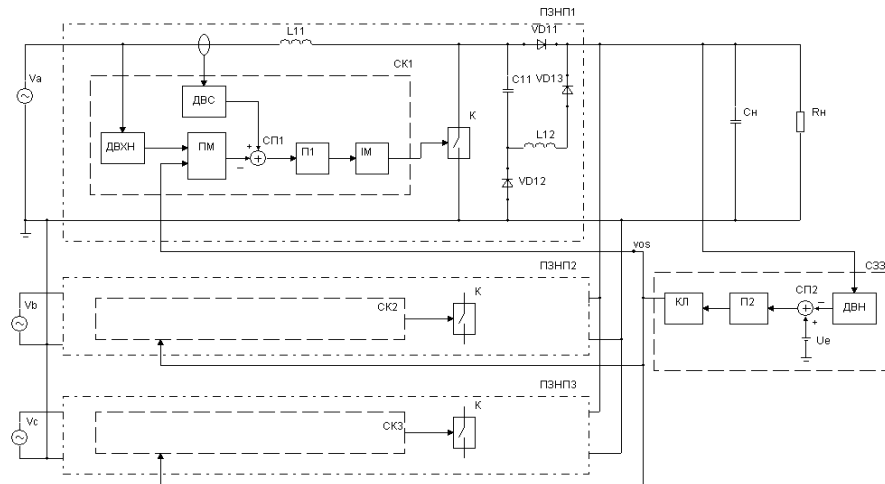


Рис. 2. Структурна схема трифазного АККП.

Проведемо аналіз роботи трифазного перетворювача зі стабілізованою вихідною напругою у режимах симетрії та несиметрії вхідної напруги. Дослідження проведемо за допомогою пакету МС9 на імпульсній моделі, схему якої представлено на рис. 3. Вона складається з трьох ідентичних схем імпульсних моделей однофазних перетворювачів, які поєднано у трифазну систему згідно структурної схеми рис. 2. Схеми імпульсних моделей однофазних перетворювачів описані у [7]. Вхідна трифазна система напруг утворена джерелами синусоїдальної напруги V_a, V_b, V_c , які визначаються виразами

$$\begin{aligned} V_a &= k_A U_m \sin \omega t; \\ V_b &= k_B U_m \sin(\omega t + \phi_B); \\ V_c &= k_C U_m \sin(\omega t + \phi_C), \end{aligned} \quad (1)$$

де k_A, k_B, k_C – коефіцієнти, що відображують відхилення амплітуди напруг фаз А, В, С від номінального значення, ϕ_B, ϕ_C – фазовий зсув фаз В та С відносно фази А. Резистори R_a, R_b, R_c та $R_{nл}$ відповідають опорам фазного та нульового проводів мережі. Конденсатори $C_{21} - C_{23}$ на виході модулів АККП встановлені для покращення комутаційних процесів, мають ємність у одиниці мікрофарад і суттєво не впливають на характер процесів у вхідних ланцюгах. Резистори R_{2a}, R_{2b}, R_{2c} та R_{out} використовуються як шунти для вимірювання вихідних струмів модулів АККП та сумарного вихідного струму ВТП. Враховуючи, що струм крізь R_{out} має імпульсний характер, для його вимірювання використано інтегруючу ланку з елементів $R_{f1}=R_{f2}=1\text{кОм}$, $C_{f1}=0,2\text{мкФ}$. При $R_{out}=0,01\text{Ом}$ сигнал $V(CIOUT) \times 200$, рівний напрузі на C_{f1} , дорівнює середньоінтегральному на періоді комутацій значенню вихідного струму. Інші елементи в імпульсній моделі трифазного перетворювача відповідають аналогічним елементам однофазної імпульсної моделі. Вихідний фільтр представлений конденсатором C_n , а навантаження – резистором R_n . У схемі СЗ3 моделі датчик вихідної напруги ДВН виконаний у вигляді джерела напруги, керованого напругою E_4 , з коефіцієнтом передачі $1/70$; джерело еталонної напруги U_e – у вигляді джерела постійної напруги V_1 ; система порівняння СП2 виконані у вигляді суматора Х15 з коефіцієнтами передачі входів «-1» та «1»; підсилювач сигналу зворотного зв'язку П2 виконаний як обмежувача ланка Х14 з коефіцієнтом передачі 40 та рівнями обмеження $[-10,10]$; корегувальна ланка (КЛ) виконана у вигляді найпростішого фільтру на $R_{k1}, R_{k2}, C_{kл}$ ($R_{k1}=R_{k2}=10\text{кОм}$); обмежувач сигналу Х13 введений для обмеження сигналу зворотного зв'язку

(vos на схемах) у межах [0,1], що моделює можливість фізичної реалізації каналу зворотного зв'язку на реальних компонентах. Абсолютні величини параметрів елементів вказані тут і далі, як приклад, для можливості проведення аналізу за допомогою пакету МС9.

Параметри силових елементів моделі та СК кожного з АККП були обрані на основі аналізу роботи однофазних перетворювачів для мінімізації спотворень вхідного струму [6] та забезпечення необхідної сумарної потужності трифазного перетворювача, що дорівнює потрійній потужності кожного з модулів. Параметри елементів СЗЗ були обрані для забезпечення номінальної вихідної напруги у 350В з роботи [8]. Параметри вихідної ємності та навантаження обирались дискретно, так як метою моделювання було отримати загальні оцінки роботи однофазних АККП, які поєднано у ВТП.

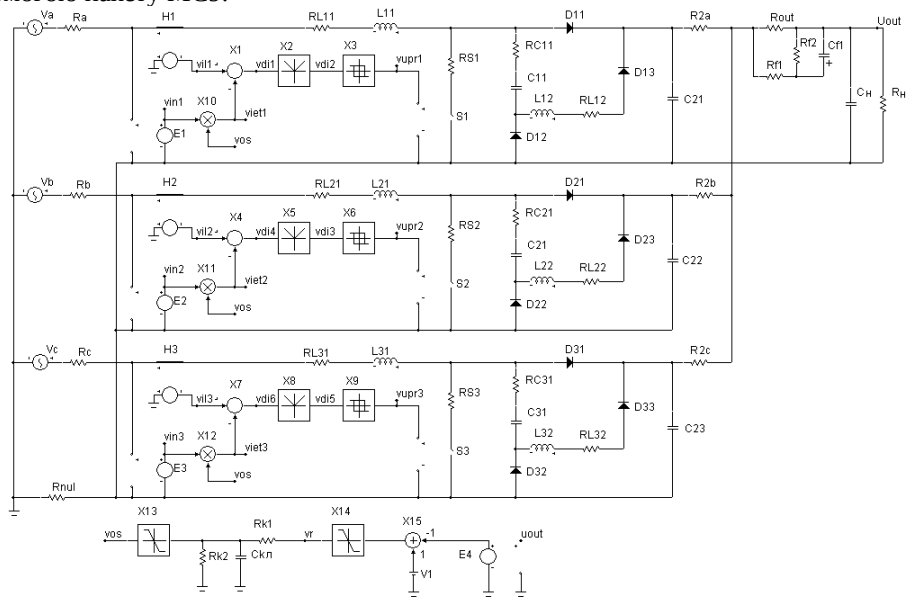


Рис. 3. Схема імпульсної моделі ВТП.

На імпульсній моделі трифазного перетворювача було проведено комплекс розрахунків у пакеті схемотехнічного моделювання МС9 для різних вхідних даних. Контролю підлягали вхідні фазні струми (сигнали V(VIL1) – V(VIL3)), сигнали з датчиків вхідної напруги (V(VIN1) – V(VIN3)), вихідна напруга ВТП U_n (сигнал V(UOUT)), струм у нульовому проводі I(Rnul), сигнал зворотного зв'язку v(vos) та сигнал V(CIOUT)×200.

Проведемо дослідження **симетричного** режиму, для якого значення коефіцієнтів k_a, k_b, k_c дорівнюють одиниці, фазові зсуви вхідних напруг фаз В та С дорівнюють $\phi_B = -2\pi/3, \phi_C = -4\pi/3$. Значення параметрів інших елементів моделі прийняті такими: $L_{11}-L_{22}=20$ мГн, $C_{11}-C_{31}=1$ мкФ, коефіцієнти передачі датчиків вхідної напруги E1-E3, які дорівнюють коефіцієнту k_1 , обрані для забезпечення вихідної потужності у 1,5 кВт при найменшій вхідній напрузі.

Звернемось до рис. 4 та рис. 5. На них представлені результати розрахунків величин, що підлягали контролю, для значень $\Delta I=0,62$ А, $C_n=600$ мкФ, $R_n=82$ Ом та значень ємності КЛ $C_{кл}$, що дорівнюють 0,1 мкФ та 5 мкФ.

З порівняння графіків вхідного струму V(VIL1) – V(VIL3) видно, що при менших значеннях ємності $C_{кл}$ вхідні фазні струми зазнають значних спотворень, що обумовлено відносно великою амплітудою пульсацій та несинусоїдальною формою сигналу зворотного зв'язку v(vos). Таку форму сигналу v(vos) при малих значеннях $C_{кл}$ (тобто при слабкій фільтрації низькочастотної складової сигналу різниці vr) можна пояснити не ідеальністю АККП та СК у частині формування вхідного струму та імпульсним характером останнього, що призводить до присутності в вихідному струмі ВТП (сигнал V(CIOUT)×200 на граф.) навіть при симетричній вхідній напрузі високочастотної складової, у спектрі якої присутня яскраво виражена гармоніка з потрійною частотою мережі.

З графіків V(UOUT) видно, що у вихідній напрузі перетворювача присутні пульсації на потрійній частоті мережі, рівень яких при незмінній ємності вихідного фільтра залежить від значень ємності КЛ, при цьому при більших значеннях $C_{кл}$ (5мкФ) пульсації менші (рис. 5).

У той же час при ємності $C_{кл}=0,1$ мкФ (рис.4) рівень пульсацій вихідної напруги зменшується, але зростають спотворення форми вхідних струмів. Такий перебіг процесів при менших значеннях $C_{кл}$ можна пояснити тим, що при малих $C_{кл}$ фазовий зсув сигналу v(vos) відносно фази

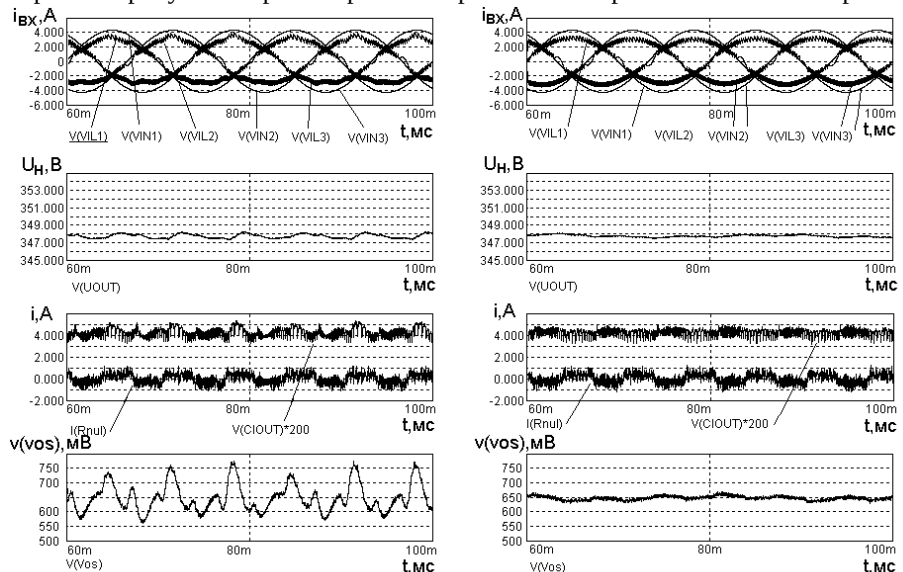


Рис.4. Симетричний режим: $C_{кл}=0,1$ мкФ. Рис.5. Симетричний режим $C_{кл}=5$ мкФ.

вихідної напруги наближується до 180° , тож сигнал на виході СЗЗ має таку форму, аби зменшити пульсації напруги за рахунок зміни вихідного струму ВТП, при цьому зазнає спотворення форма вхідного струму.

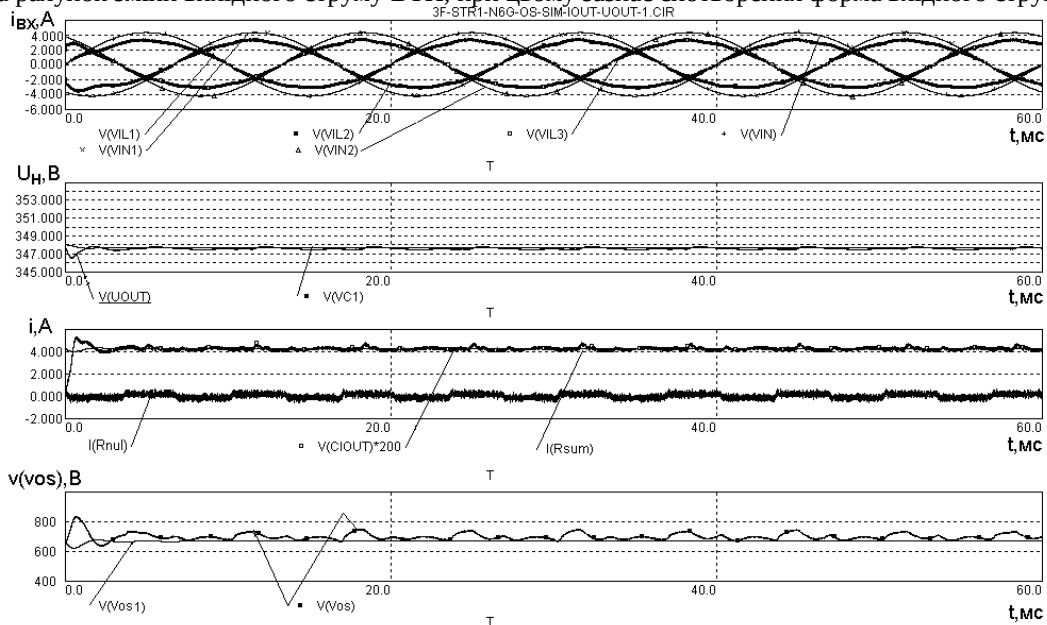


Рис. 6. Симетричний режим: $\Delta I=0,32\text{A}$, $C_n=600\text{мкФ}$, $C_{кл}=0,1\text{мкФ}$.

Для перевірки припущення про значний вплив на описані процеси такого інтегрального показника СК як відхилення вхідного струму від еталону були проведені розрахунки роботи схеми при значеннях $\Delta I=0,32\text{A}$, $C_n=600\text{мкФ}$ та $C_{кл}=0,1\text{мкФ}$, результати яких наведено на рис.6. Порівнюючи їх з графіками на рис. 4 (на якому також $C_{кл}=0,1\text{мкФ}$) можна побачити, що при зменшенні відхилення вхідного струму від еталону як рівень пульсацій вихідної напруги, так і спотворення вхідного струму зменшуються, вихідний струм ВТП має значно кращу форму, його середньоінтегральне на періоді комутацій значення наближується до постійного в усталеному режимі. Такий результат свідчить про переважаючий вплив не ідеальності СК у частині формування вхідного струму на пульсації вихідної напруги у трифазному перетворювачі в симетричних режимах, а також про можливість забезпечити прийнятні форми як вхідного струму, так і вихідної напруги при відповідному та узгодженому виборі параметрів системи керування та параметрів системи зворотного зв'язку.

Відомо, що за малих значень сталої часу корегувальних ланок у системах зі стабілізацією вихідної напруги значно покращуються такі параметри перехідних процесів, як час встановлення вихідної напруги при перемиканнях навантаження та можливі викиди та провали вихідної напруги. Тож можливість забезпечення малих значень сталої часу корегувальної ланки при збереженні досить низьких значень спотворення вхідного струму, що обумовлені негативним впливом на еталонний сигнал струму системи зворотного зв'язку, є позитивною властивістю трифазних перетворювачів змінної напруги на постійну з корекцією коефіцієнту потужності у симетричних режимах вхідної трифазної напруги.

Досягнення оптимальних параметрів СК, значень вихідної ємності та параметрів СЗЗ для вказаного режиму роботи перетворювача виходять за рамки мети роботи і потребують додаткових досліджень.

На рис. 4 – рис. 6 наведено криву струму у нульовому проводі $I(Rnul)$. Порівнюючи графіки відмітимо, що у кривій струму крім високочастотних складових наявні пульсації з потрібною частотою мережі, при чому їх рівень також залежить від значення ΔI , і при зменшенні ΔI зменшується пропорційно. Так для наведених прикладів розрахунків роботи перетворювача потужністю $1,5\text{kW}$ рівень пульсацій струму у нульовому проводі на потрійній частоті мережі складає приблизно $0,35\text{A}$ при $\Delta I=0,62\text{A}$ та $0,27\text{A}$ при $\Delta I=0,32\text{A}$.

Розглянемо надалі **несиметричний** режим роботи перетворювача. Аналіз проведемо при розрахунках роботи ВТП на імпульсній моделі, схему якої наведено на рис.3. Приймемо, що фазова несиметрія відсутня, а коефіцієнти k_A , k_B , k_C знаходяться у співвідношенні $1,1:1:0,9$, що значно перевищує встановлені стандартом ДСТУ EN50160:2014 норми допустимої несиметрії напруг низьковольтної мережі, але цілком вірогідне у автономних СЕЖ. Розрахунки проведемо при значеннях опору навантаження $R_n=82\text{Ом}$ та параметрах СК та СЗЗ такими ж, як і при аналізі симетричного режиму. Графіки вихідного струму ВТП зсунуті вгору на 2A .

На рис. 7 наведені графіки, отримані в результаті розрахунків при значеннях $C_n=600\text{мкФ}$ та $C_{кл}=1\text{мкФ}$. З них видно, що вхідні фазні струми ВТП зазнають значних спотворень, пульсації вихідної напруги мають виражений несинусоїдальний характер, наявні значні періодичні несинусоїдальні пульсації сигналу зворотного зв'язку, підвищений рівень пульсацій вихідної напруги та вихідного струму ВТП на подвійній частоті мережі. Такий перебіг процесів в перетворювачі пояснюється незадовільним коефіцієнтом передачі КЛ СЗЗ, що призводить до спотворень еталонних сигналів струму і через це до негативного впливу на показники якості як вхідного струму так і вихідної напруги. Для їх покращення необхідно збільшити ємність конденсатора КЛ $C_{кл}$.

Звернемось до рис. 8 та рис. 9, на яких наведено результати розрахунків при тій же ємності вихідного фільтру C_n та значення ємності $C_{кл}$, що дорівнюють 5 мкФ та 10 мкФ відповідно. З аналізу графіків вихідної напруги та вхідних струмів на цих рисунках помітно, що при несиметричному режимі вхідних напруг у вихідній стабілізованій напрузі ВТП переважають пульсації з подвійною частотою мережі, причому при меншому значенні ємності $C_{кл}$ пульсації вихідної напруги більші, а вхідні фазні струми знають спотворень.

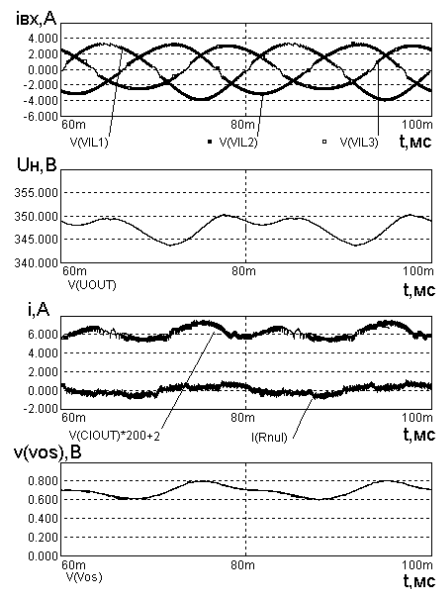
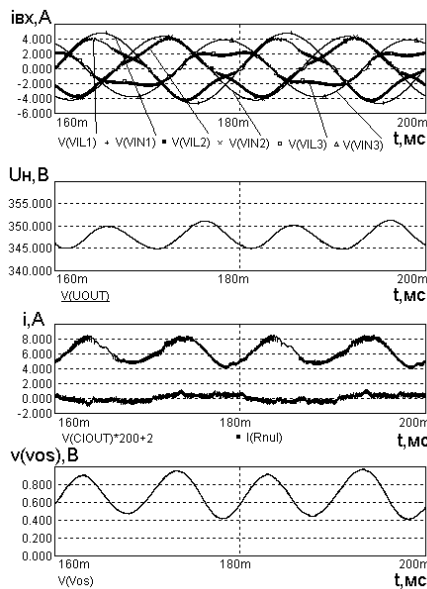


Рис.7. Несиметричний режим, $C_{кл}=1\text{мкФ}$. Рис.8. Несиметричний режим, $C_{кл}=5\text{мкФ}$.

З аналізу графіків вхідних струмів на рис. 9 видно, що форма кривих фазних струмів у несиметричному режимі при $C_{кл}=10\text{мкФ}$ є наближеною до синусоїдальної, а амплітудні значення вхідних струмів різняться приблизно так же, як і значення еталонних сигналів струму. Це пояснюється відносно великим коефіцієнтом фільтрації КЛ за прийнятих параметрів елементів та пропорційності еталонних сигналів струмів фазним напругам мережі.

З аналізу результатів розрахунків, які наведені на рис. 9 можна зробити висновок, що при відповідному виборі параметрів СК, СЗЗ та значень вихідної ємності, можливо забезпечити наближену до синусоїдальної форму вхідних струмів при відносно невеликих значеннях пульсацій вихідної напруги.

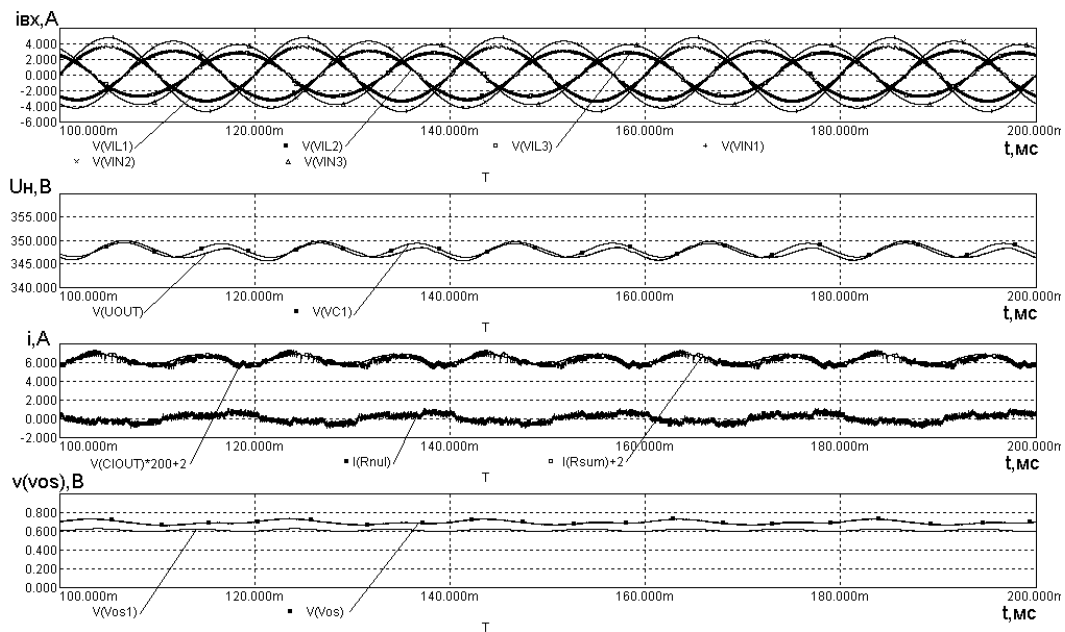


Рис. 9. Несиметричний режим. $C_n=600\text{мкФ}$, $C_{кл}=10\text{мкФ}$.

Висновки. Підсумовуючи результати наведеного аналізу роботи трифазного перетворювача змінної напруги на постійну з корекцією коефіцієнта потужності зробимо наступні висновки.

1. Запропонована схема однофазного перетворювача змінної напруги на постійну з корекцією коефіцієнту потужності та гальванічним зв'язком входу з виходом дозволяє на її основі побудувати трифазні перетворювачі, шляхом простого підключення окремих однофазних модулів до фазних напруг мережі, та їх паралельного з'єднання по виходу. При цьому можливо забезпечити високі значення електромагнітної сумісності з мережею та, на відміну від інших способів побудови ВТП, з'являється можливість забезпечення вихідної напруги на рівні максимального значення амплітуди фазної напруги мережі (350В для мереж 380/220В у наведених прикладах).

Робота кожного з однофазних модулів в частині формування вхідного струму не відрізняється від їх роботи у однофазній мережі. В той же час процеси у вихідних ланцюгах трифазного перетворювача змінної наруги на постійну з корекцією коефіцієнту потужності в значній мірі залежать від характеру вхідної трифазної системи напруг.

2. В симетричних режимах мережі у вихідній напрузі перетворювача присутні гармоніки нульової послідовності, наявність яких пов'язана з імпульсним характером формування вхідного струму та присутністю гармонік нульової послідовності у вихідному струмі однофазних модулів. Це викликано обмеженими значеннями реальних параметрів силових реактивних та перемикаючих елементів АККП, неідеальністю СК (тобто присутністю визначеного відхилення вхідного струму від еталону) та СЗЗ (кінцеве значення сталої часу КЛ). Найбільш вираженими є пульсації на потрійній частоті мережі, рівень яких в основному визначається значеннями відхилення вхідного струму від еталону. Зважаючи на незначний рівень вказаних гармонік, що складає одиначи відсотків від номінального значення вхідного струму, обумовлені ними пульсації вихідної напруги легко згладжуються відносно незначною ємністю конденсатора вихідного фільтру. При цьому у симетричному режимі можливе досягнення високих показників якості як вхідного струму, так і вихідної напруги при відносно малих значеннях сталої часу корегувальної ланки, що позитивно впливає на динамічні режими в перетворювачі.

3. В несиметричних режимах мережі при відповідному виборі параметрів СК та СЗЗ зберігається покращена ЕМС перетворювача з мережею, але у вихідній напрузі з'являються пульсації на подвійній частоті мережі, рівень яких може значно перевищувати пульсації, що визначаються імпульсним характером процесів у схемі. Тому при можливості виникнення в СЕЖ з вхідним перетворювачем несиметричних режимів вибір параметрів елементів схеми та системи керування необхідно проводити з урахуванням можливої несиметрії вхідної трифазної напруги та приймати заходи для зменшення пульсацій вихідної напруги, наприклад, за рахунок вибору більшого значення ємності вихідного фільтру та збільшення сталої часу корегувальної ланки в системі зворотного зв'язку.

Список літератури: 1. Функциональные устройства систем электропитания наземной РЭА / под. ред. В. Г. Костикова. – М: Радио и связь, 1990. – 192с. 2. Шидловский А. К. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью / А. К. Шидловский, А. В. Козлов, Н. С. Комаров, Г. А. Москаленко. – К.: Наукова думка, 1993. – 272 с. 3. Климов В.П. Топологии источников бесперебойного питания переменного тока (ИБП) / В.П. Климов, А.А. Портнов, В.В. Зуенко // Электронные компоненты. – 2003. – №7. Режим доступа: <http://www.tensy.ru/article04.html>. 4. Коваленко К. ИБП-2006: новинки и тенденции / К. Коваленко // Режим доступа: www.sib.com.ua/arhiv_2007/2007-1/2007_1_UPS_2006_1.htm. 5. Пат. України № 27643, 6 Н02М7/00, 7/525. Перетворювач змінної напруги на постійну / Шидловський А.К., Комаров М.С., Москаленко Г. О., Пазеев А.Г.; Заявник та патентовласник ІЕД НАН України. – опубл. 15.09.2000, Бюл. № 4. 6. Жаркін А.Ф. Дослідження гармонічного складу кривої вхідного струму перетворювача змінної напруги на постійну з корекцією коефіцієнта потужності / А. Ф. Жаркін, А. Г. Пазеев // Техн. електродинаміка. – 2006. – №4. – С. 12 – 17. 7. Шидловський А.К. Безперервні наближені моделі перетворювачів змінної напруги в постійну з активною корекцією коефіцієнта потужності / А.К. Шидловський, А.Ф. Жаркін, А.Г. Пазеев // Техн. Електродинаміка. – 2011. – № 6. – С. 11–17. 8. Пазеев А.Г. Аналіз статичної нестабільності вихідної напруги в активних коректорах коефіцієнта потужності / А.Г. Пазеев // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2011. – Вип.30. – С. 24 – 28.

Bibliography (transliterated): 1. Funktsionalnye ustroystva sistem elektropitaniya nazemnoy REA / pod. red. V. G. Kostikova. – М: Radio i svyaz, 1990. – 192s. 2. Shidlovskiy A. K. Tranzistornyie preobrazovateli s uluchshennoy elektromagnitnoy sovmestimostyu / A. K. Shidlovskiy, A. V. Kozlov, N. S. Komarov, G. A. Moskalenko. – К.: Naukova dumka, 1993. – 272 s. 3. Klimov V.P. Topologii istochnikov bespereboynogo pitaniya peremennogo toka (IBP) / V.P. Klimov, A.A. Portnov, V.V. Zuenko // Elektronnyie komponentyi. – 2003. – №7. Rezhim dostupu: <http://www.tensy.ru/article04.html>. 4. Kovalenko K. IBP-2006: novinki i tendentsii / K. Kovalenko // Rezhim dostupu: www.sib.com.ua/arhiv_2007/2007-1/2007_1_UPS_2006_1.htm. 5. Pat. Ukrainy № 27643, 6 Н02М7/00, 7/525. Peretvoriuvach zminnoi napruhy na postiinu / Shydlovskiy A. K., Komarov M. S., Moskalenko H. O., Pazieiev A. H.; Zaiavnyk ta patentovlasnyk IED NAN Ukrainy. – opubl. 15.09.2000, Biul. № 4. 6. Zharkin A. F. Doslidzhennia harmonichnoho skladu kryvoi vkhidnoho strumu peretvoriuvacha zminnoi napruhy na postiinu z korektsiieiu koefitsiienta potuzhnosti / A. F. Zharkin, A. H. Pazieiev // Tekhn. elektrodynamika. – 2006. – №4. – С. 12 – 17. 7. Shydlovskiy A.K. Bezperervni nablyzheni modeli peretvoriuvachiv zminnoi napruhy v postiinu z aktyvnoiu korektsiieiu koefitsiienta potuzhnosti / A.K. Shydlovskiy, A.F. Zharkin, A.H. Pazieiev // Tekhn. Elektrodynamika. – 2011. – № 6. – С. 11–17. 8. Pazieiev A.H. Analiz statychnoi nestabilnosti vykhidnoi napruhy v aktyvnykh korrektorakh koefitsiienta potuzhnosti / A.H. Pazieiev // Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy. – 2011. – Vyp.30. – С. 24 – 28.

Надійшла 06.05.2017