УДК 621.31

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ГАРМОНІЧНИХ КОМПОНЕНТІВ ПОТУЖНОСТІ В СИЛОВІЙ СХЕМІ ДИНАМІЧНОГО ВІДНОВЛЮВАЧА НАПРУГИ

БЕЗЗУБ М.А. аспірант кафедри електротехнікиКременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехнікиКременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

ТОДОРОВ О.В. аспірант кафедри електротехнікиКременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: olehtodorov@gmail.com.

Мета роботи.*Дослідження розподілу гармонічних компонентів потужності в силовій схемі динамічного відновлювача напруги.*

Методи дослідження. *На підставі диференційних рівнянь кіл силової схеми динамічного відновлювача виконано пошук зв'язку параметрів режиму з параметрами елементів схеми. На основі отриманих виразів використовуючи методи математичного моделювання в середовищі візуального програмування створено модель динамічного відновлювача напруги.*

Отримані результати. *Отримані рівняння, які відбивають зв'язок параметрів режимудинамічного відновлювача напруги з параметрами елементів схеми. В результаті моделювання режиму з різним гармонійним складом струму та напруги виявлені особливості розподілу компонентів миттєвої потужності.*

Наукова новизна. *Встановлено, що наявність різних гармонік струму та напруги, які діють в трансформаторі динамічного відновлювача, викликає додаткові гармоніки потужності, які трансформуються в обмотках. Відмічено, що низькочастотні гармоніки потужності LC-фільтра домінують на конденсаторі, який паралельно підключений до обмотки трансформатора, в той же час рівень високочастотних складових, зумовлених ШІМ-модуляцією, для конденсатора і дроселя фільтра відрізняються незначно. Компонента потужності нульової частоти накопичуючого конденсатора відповідає потроєній комопоненті потужності нульової частоти на виході преретворювача, що зумовлено його роботою на три фази. Це не можна повсюдити на другу та третю гармоніки потужностей перетворювача та конденсатора, в останньому ці складові відсутні, що зумовлено енергообмінними процесами між фазами перетворювача.*

Практична цінність. *За допомогою отриманих виразів сформульовано принцип визначення параметрів елементів силової схеми динамічного відновлювача напруги, зокрема накопичувальних елементів.*

Ключові слова: Динамічний відновлювач напруги; гармонічні спотворення; вольтододатній трансформатор; потужність гармонік.

I. ВСТУП

З розвитком енергетики збільшується кількість споживачів електроенергії, які являють собою нелінійне навантаження та спричиняють погіршення якості електроенергії. Такими навантаженнями є електроприводи змінного та постійного струму зі змінною швидкістю, різні системи освітлення, електроживлення промислових устаткувань та багато іншого. Подібні пристрої споживають від мережі несинусоїдальний струм, що призводить до певних негативних наслідків. Негативна дія нелінійного навантаження полягає в тому, що воно призводить до несинусоїдальності, несиметрії, коливань та відхилень напруги. І таким чином впливають на якість електричної енергії яку отримують інші споживачі [1].

Найбільш ефективними технічними рішеннями для корекції якості електроенергії в трифазній мережі змінної напруги є керовані фільтрокомпенсуючі пристрої, до яких можна віднести динамічний відновлювач напруги. Можливості динамічного відновлювача напруги дозволяють використовувати його для вирішення більшості завдань покращення якості електроенергії – фільтрація гармонік напруги, регулювання напруги, балансування несиметрії напруги, зниження дози флікеру та інші [2].

Оскільки динамічний відновлювач напруги працює в умовах відхилення різних показників якості електричної енергії [3] то й кожен з елементів пристрою повинен відповідати певним вимогам. Розробки подібних пристроїв обмежені функціонально по причиніскладності розподілу гармонічних компонентів потужності в силовій частини динамічного відновлювача напруги.

© Беззуб М.А., Бялобржеський О.В., Тодоров О.В., 2023
DOI 10.15588/1607-6761-2023-1-2

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сфері дослідження функціонування динамічного відновлювача напруги існує досить багато робіт. Дослідження та всебічний огляд топології динамічного відновлювача напруги на основі перетворювачів потужності та методів керування виконаний в роботі [4]. Автори порівнюють сучасні джерела та дослідження з питань якості електроенергії, принцип дії динамічних відновлювачів напруги разом із його режимами роботи, компонентами фільтра, топологією пристрою для зберігання енергії, топології динамічних відновлювачів напруги на основі одно-/трифазних перетворювачів живлення та топології на основі блоків керування, які мають різні методи обробки керування. Крім того, модифіковані та покращені конфігурації фільтрокомпенсуючого пристрою. В роботі автори обмежуються узагальненими рівняннями.

У роботі [5] представлена електромагнітна модель динамічного відновлювача напруги на базі силової електроніки. За допомогою програмного забезпечення імітується робота пристрою лише протягом часу відхилення напруги від номінального значення. Результати роботи показують, що провал напруги майже повністю зменшується, а середньоквадратична напруга на чутливому навантаженні підтримується на рівні приблизно 90% від номінального значення. Зосереджуючись на процесах відновлення в мережевому колі досліджуваної системи, автори не розкрили зв'язок зазначених процесах з процесами в елементах силової частини пристрою.

У роботі [6] проаналізовано роботу динамічного відновлювача напруги при провалахмережевої напруги, перенапругах та дисбалану. За показником загальних гармонійних спотворень (THD) напруги та струму мережі досліджено напругу навантаження з урахуванням її несиметрії. Результати вказують на досить високу ефективність компенсаційних властивостей динамічного відновлювача напруги. Недоліком використовуваного методу є визначення напруги компенсації за функцією струму, що може призвести до некоректної роботи комплексу силового активного фільтра в умовах спотворення струму. Спотворення напруги автори створюють штучно, вводячи 5-ту та 7-му гармоніки, як і в роботі [7]. Але як показано в роботі [8] в певних випадках ці спотворення більш складні і на їх усунення впливають параметри елементів силової частини пристрою.

Дослідження методу проектування параметрів вихідного фільтра каскадного динамічного відновлювача напруги на основі Н-мосту, застосовуваного в розподільній мережі середньої напруги, проведено в роботі [9]. Результати моделювання показують, що оптимальнийвибір параметрів фільтра повністю відповідає вимогам продуктивності системи, а також зменшує вартість і розмір динамічного відновлювача напруги. Але автори не показали роботу комплексу при різних показниках відхилення якості електричної енергії, таких як несинусоїдальность та несиметрія. Суттєвим недоліком пропонованого рішення є те, що навантаження прийняте лінійним та незмінним у часі. За рахунок послідовно ввімкненої ємності це може мати вплив на показники якості.

У статті [10] проводять оптимізацію функції діапазону значень індуктивності та ємності LC-фільтрів в структурі динамічного відновлювача напруги. Також аналізуються зміни параметрів за різних умов провалів напруги та коефіцієнтів потужності. Крім того, також пропонується оптимізований метод проектування з урахуванням багатьох факторів впливу. Представлено детальну процедуру оптимізації, а її достовірність підтверджена результатами моделювання. Обидва результати показують, що запропонований метод може покращити конструкцію LC-фільтра для динамічного відновлювача напруги на основі каскадного Н-мосту підвищити продуктивність усієї системи. Але отримані результати не можуть бути поширені на більш широкий спектр відхилення якості електричної енергії та нелінійне навантаження.

Таким чином аналіз існуючих робіт показав, що автори робіт виконують дослідження динамічного відновлювача напруги в рамках сприйняття пристрою як цілісного.Зв'язок параметрів схеми з параметрами режиму та, зокрема, потужністю залишається не дослідженим.

III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження розподілу гармонічних компонентів потужності в силовій схеми динамічного відновлювача напруги.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУІ АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження роботи всіх елементів динамічного відновлювача напруги є досить складним процесом, оскільки динамічний відновлювач напруги працює в умовах відхилення різних показників якості електричної енергії. Такими відхиленнями є перенапруга, провали напруги, несиметрія та несинусоїдальність. В таких умовах кожен з елементів динамічного відновлювача напруги повинен забезпечувати ефективну роботу на широкому спектрі коригувальних величин. Оскільки в кожному елементі силової схеми, зважаючи на спотворення напруги мережі, відбувається розподіл гармонічних компонентів струму та напруги, то вони в свою чергу визначають розподіл гармонічних компонентів потужності.Силова частина динамічного відновлювача напруги складається з вольтододатнього трансформатора, згладжуючого LC фільтра, транзисторного перетворювача та конденсатора в колі постійної напруги (рис.1).

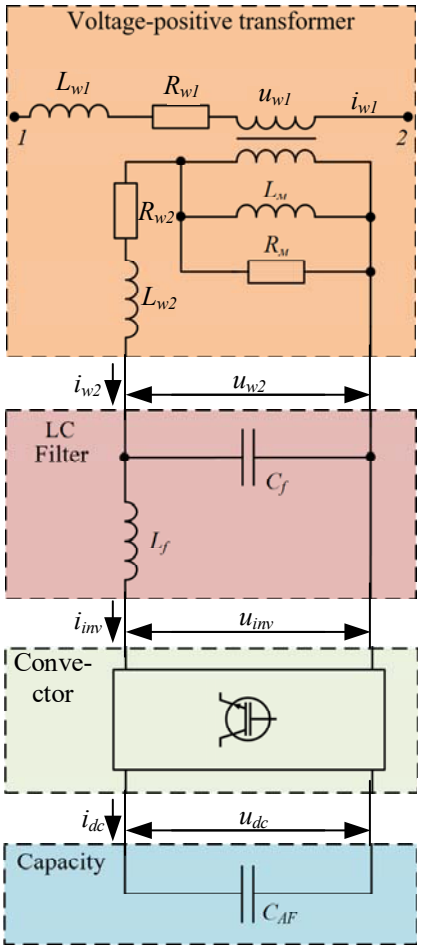


Рисунок 1. Силова частина динамічного відновлювача напруги (однофазне виконання)

Вибір вольтододатнього трансформатора слід виконувати за необхідними параметрами, а саме номінальна потужність, номінальна вихідна напруга та номінальний вихідний струм.

Роботу трансформатора в будь-якому режимі характеризують основні рівняння, до яких відносять рівняння МРС (магніторушійних сил) та рівняння рівноваги напруг для кіл первинної та вторинної обмоток [11].

Розглянемо ці рівняння на прикладі двохобмоткового однофазного трансформатора.Ці рівняння справедливі для кожної фази трифазного трансформатора, якщо він навантажений симетричним навантаженням.

За другим законом Кірхгофа для магнітного кола трансформатора справедливо наступне рівняння МРС:

$$i_{w1}w_1 + i_{w2}w_2 = i_\mu w_1 \quad (1)$$

де w_1, w_2 –число послідовно з'єднаних витків первинної та вторинної обмоток; i_{w1}, i_{w1} – струм первинної та вторинної обмоток; i_μ – струм намагнічування.

Магнітне поле трансформатора, як відзначалося, доцільно представити з наступних магнітних потоків:

Φ_μ – основний магнітний потік; $\Phi_{\sigma w1}$ – магнітний потік розсіювання первинної обмотки; $\Phi_{\sigma w2}$ – магнітний потік розсіювання вторинної обмотки.

Потік Φ_μ практично рівномірно розподіляється по перетину сердечника трансформатора та зчеплений в однаковому ступені як з первинною, так і з вторинною обмотками. Він індукує в цих обмотках ЕРС, миттєве значення яких визначається рівняннями:

$$e_{w1} = -w_1\frac{d\Phi_\mu}{dt} = -\frac{d\psi_{w1\mu}}{dt} \quad (2)$$

$$e_{w2} = -w_2\frac{d\Phi_\mu}{dt} = -\frac{d\psi_{w2\mu}}{dt} \quad (3)$$

де $\psi_{w1\mu}$, $\psi_{w2\mu}$ – потокозчеплення первинної та вторинної обмоток трансформатора, відповідно, з основним магнітним потоком.

Потоки розсіювання $\Phi_{\sigma w1}$ та $\Phi_{\sigma w2}$ індукують, відповідно, в первинній та вторинній обмотках ЕРС:

$$e_{w1} = -L_{w1}\frac{di_{w1}}{dt} \quad (4)$$

$$e_{w2} = -L_{w2}\frac{di_{w2}}{dt} \quad (5)$$

де L_{w1} і L_{w2} – індуктивності розсіювання первинної та вторинної обмоток, відповідні потокам розсіювання цих обмоток.

З огляду на вищевикладене, запишемо рівняння рівноваги напруг для первинної та вторинної обмоток трансформатора по другому закону Кірхгофа.Для первинної обмотки

$$u_{w1} = \frac{d\Psi_{w1}}{dt} + i_{w1}R_{w1} \quad (6)$$

де ψ_{w1} – повне потокозчеплення первинної обмотки як з потоком Φ_μ так і з потоком Φ_{w1}.

Для вторинної обмотки

$$u_{w2} = \frac{d\psi_{w2}}{dt} + i_{w2}R_{w2} \quad (7)$$

де ψ_{w2} – повне потокозчеплення вторинної обмотки трансформатора як з потоком Φ_μ так і з потоком $\Phi_{\sigma w1}$; u_{w2} – миттєве значення напруги вторинної обмотки.

Вплив параметрів трансформатора на напруги/струми залежно від частоти зручно розглянути за схемою заміщення (рис.2).

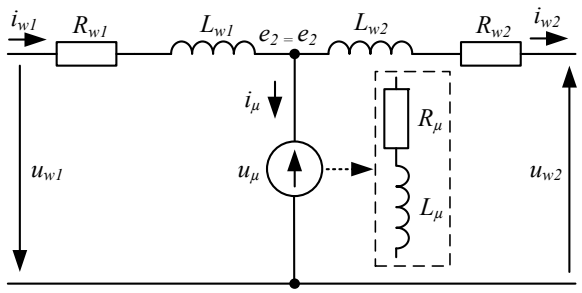


Рисунок 2. Схема заміщення трансформатора

За умови що напруга первинної обмотки та струм вторинної обмотки відомі то для визначення невідомих струму первинної обмотки та напруги вторинної можна представити трансформатор як чотириполюсникта використати G – форму запису рівнянь чотириполюсника [8]. Для розрахунку параметрів G-форми запису рівнянь чотириполюсника використаємо вираз у комплексній формі який пов'язує напругу вторинної обмотки $\dot{U}_{w2}$ з напругою первинної $\dot{U}_{w1}$ на струмом вторинної обмотки $\dot{I}_{w2}$:

$$\dot{U}_{w2} = \dot{G}_{21TV}\dot{U}_{w1} + \dot{G}_{22TV}\dot{I}_{w2}, \tag{8}$$

де G – параметри визначаються як:

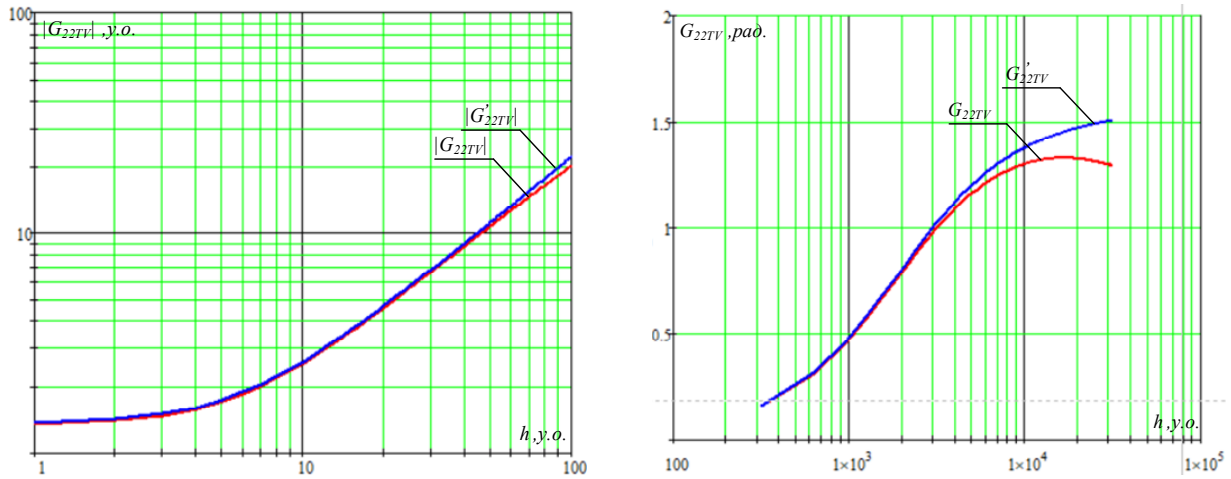
$$\dot{G}_{21TV} = -\frac{R_\mu \cdot L_\mu \cdot j\omega}{-\omega^2 \cdot L_\mu \cdot L_{w1} + j\omega(L_{w1} \cdot R_\mu + L_\mu \cdot R_{w1} + L_\mu \cdot R_\mu) + R_{w1} \cdot R_\mu} \tag{9}$$

$$\dot{G}_{22TV} = \frac{(R_{w1} + L_{w1}j\omega)\cdot(R_\mu \cdot L_\mu j\omega)}{R_\mu \cdot L_\mu j\omega + (R_{w1} + L_{w1}j\omega)(R_\mu + L_\mu j\omega)} + (k^2 R_{w2} + k^2 L_{w2} j\omega) \tag{10}$$

Для визначення характеру зазначених параметрів при зміні частоти використаємонаступні дані трансформатора [7], такі як опір первинної обмотки $R_{w1} = 0.677$ Ом, опір вторинної обмотки $R_{w2} = 0.227$ Ом, опір намагнічування $R_\mu = 21.361$ Ом, індуктивність первинної обмотки $L_{w1} = 0.353$ мГн, індуктивність вторинної обмотки $L_{w2} = 0.1183$ мГн, індуктивність намагнічування $L_\mu = 0.881$ Гн, коефіцієнт трансформації $k = 1.7$. За принципом незначущості скорочуємо вираз 18 до вигляду

$$\dot{G}'_{22TV} = \frac{-L_{w1} \cdot L_\mu \cdot R_\mu \cdot \omega^2 + L_\mu \cdot R_{w1} \cdot R_\mu j\omega}{R_{w1} \cdot R_\mu - L_{w1} \cdot L_\mu \omega^2 + R_\mu \cdot L_{w1} j\omega + R_\mu \cdot L_\mu j\omega + R_{w1} \cdot L_\mu j\omega} + (k^2 R_{w2} + k^2 L_{w2} j\omega) \tag{11}$$

Попередній аналіз показав, що параметр $\dot{G}_{21TV}$ суттєво не залежить від частоти. Для визначення впливу частоти на $\dot{G}_{22TV}$ розраховано АЧХта ФЧХ(рис.2). Для перевірки коректності виразу (11) побудовано порівняльні частотні характеристики двох параметрівв залежності від номеру гармоніки h.



а) б)

Рисунок 3. Частотні характеристики а) АЧХ $\dot{G}_{22TV}$ b) ФЧХ $\dot{G}_{22TV}$

Припустимо, що пристрій працює у мережі$U_{мер}$=U_{w2}=10 кВ. В такій мережі допускається відхилення напруги у 10%. Приймемо відхилення рівня напруги 20%. Отже напруга компенсації може

становити $U_{комп} = 2000$ В. Таким чином напруга вторинної обмотки вольтододатнього трансформатора приймається $U_{w2} = U_{комп} = 2$ кВ. Можливо два варіанти вибору трансформатора в залежності коефіцієнта трансформації *k*. Припустивши що *k>1*, маємо співвідношення $U_{w2}<U_{w1}$ та $I_{w2}>I_{w1}$ що при струмові навантаженні в десятки або сотні ампер призведе до збільшення струму вторинної обмотки. Це призведе до економічних витрат на дротове з'єднання та збільшення втрат потужності в силовій частині динамічного відновлювача напруги. Якщо використовувати *k<1*, маємо співвідношення $U_{w2}>U_{w1}$ та $I_{w2}<I_{w1}$, що призводить до збільшення напруги на вторинній обмотці трансформатора. Це в свою чергу призведе до збільшення вимог до ізоляції елементної бази та збільшення втрат потужності зумовлених опором та індуктивністю трансформатора.

Наступним елементом силової схеми динамічного відновлювача напруги є згладжуючий LC фільтр [12]. Для вибору параметрів фільтра слід враховувати напругу, струм та частоту комутації ШІМ.Роботу та вибір параметрів LC фільтра можна описати за допомогою наступних рівнянь.

$$u_{Cf} = u_{W2} \tag{12}$$

$$u_{inv} = u_{W2} + L_f \frac{di_{Lf}}{dt} + R_f i_{Lf} \tag{13}$$

$$i_{inv} = i_{Lf} = i_{W2} + i_{Cf} = i_{W2} + C_f \frac{du_{W2}}{dt} \tag{14}$$

де u_{inv} – напруга на виході інвертора; u_{Lf} – напруга індуктивності LC – фільтра; i_{Lf} – струм індуктивності LC – фільтра; u_{Cf} – напруга на конденсаторі LC – фільтра; i_{Cf} – струм конденсатора LC – фільтра; L_f – індуктивність LC – фільтра; R_f – опір індуктивності LC – фільтра; C_f – ємність конденсатора LC – фільтра.

При виборі LC фільтра одним з основних параметрів є частота комутації ШІМ[13].

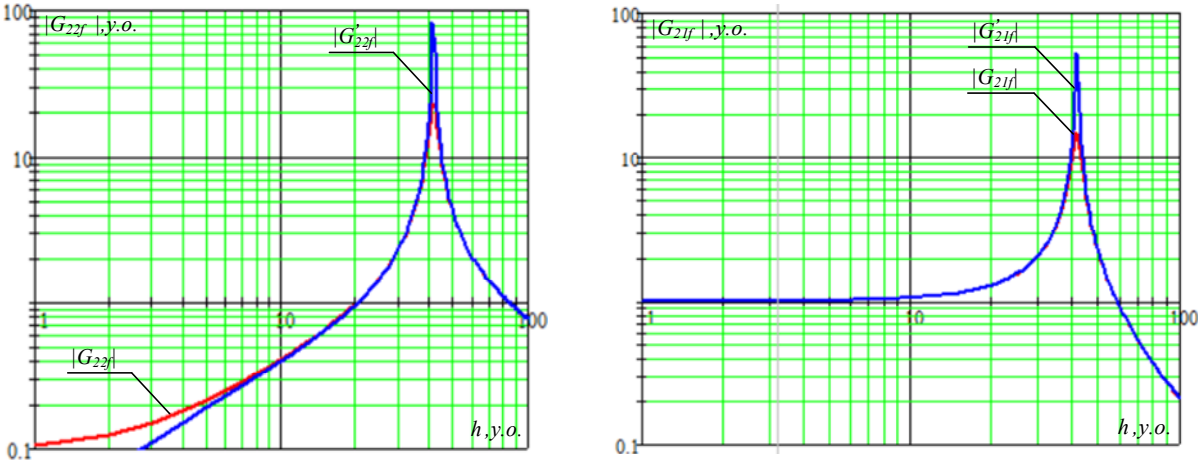
В роботі [8] отримано зв'язок вихідної напруги фільтру із вхідною напругою та струмом з використанням перетворення Лапласа. Для комплексних змінних цей зв'язок має наступний вигляд:

$$\dot{U}_{Cf} = \dot{G}_{21f}\dot{U}_{inv} + \dot{G}_{22f}\dot{I}_{w2} = \frac{1}{1 - L_f C_f \omega^2 + jR_f C_f \omega}\dot{U}_{inv} - \frac{L_f \omega + R_f}{1 - L_f C_f \omega^2 + jR_f C_f \omega}\dot{I}_{w2} \tag{24}$$

Для визначення залежності параметрів $\dot{G}_{21f}$ та $\dot{G}_{22f}$ від частотивикористано наступні параметри елементів: опір індуктивності $R_f = 0.1$ Ом, індуктивність $L_f = 0.1183$ мГн, ємність конденсатора фільтра $C_f = 0.05$ мФ. При розрахунках виявлено що опір індуктивності несуттєво впливає на вихідну характеристику тому виконано спрощення виразу за принципом незначущості.

$$\dot{U}_{Cf} = \dot{G}'_{21f}\dot{U}_{inv} + \dot{G}'_{22f}\dot{I}_{w2} = \frac{1}{1 - L_f C_f \omega^2}\dot{U}_{inv} - \frac{L_f \omega}{1 - L_f C_f \omega^2}\dot{I}_{w2} \tag{25}$$

Для визначення залежності вихідної напруги від вхідної напруги та струму навантаження в залежності від номеру гармоніки h отримано частотні характеристики (Рис. 3).



а) б)

Рисунок 4. Амплітудно-частотні характеристики а) $\dot{G}_{22f}$ б) $\dot{G}_{21f}$

З характеристик видно що скорочення не має суттєвого впливу. При збільшенні частоти з нуля до десятої гармоніки АЧХ вихідної напруги від вхідної суттєво не змінюється, далі характеристика стрімко зростає та при 40 гармоніці досягає свого піку що зумовлено точкою резонансу. Далі характеристика стрімко спадає, що вказує на погіршення роботи комплексу при збільшенні частоти вхідної напруги.

Залежність вихідної напруги до струму навантаження має поступове зростання та при 40 гармоніці досягає свого піку що зумовлено точкою резонансу. Далі характеристика стрімко спадає, що вказує на погіршення роботи комплексу при збільшенні частоти струму навантаження.

Наступним елементом силової схеми динамічного відновлювача напруги є конденсатор кола постійної напруги [14]. Потужність конденсатора можна визначити за допомогою виразу

$$P_{Cdc} = u_{Cdc} \cdot i_{Cdc} = \frac{1}{C_{dc}} \int_0^t i_{Cdc} dt \cdot i_{Cdc} = u_{Cdc} \cdot C_{dc} \frac{du_{Cdc}}{dt} \quad (26)$$

Також потужність конденсатора можна виразити з міркувань балансу потужності на вході та виході перетворювача без урахування втрат:

$$P_{Cdc} = E \cdot i_{Cdc} = i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C \quad (27)$$

де E – ЕРС накопичувального конденсатора; i_{Cdc} – струм накопичувального конденсатора; i_A, i_B, i_C – струм кожної фази на виході перетворювача; u_A, u_B, u_C – напруга кожної фази на виході перетворювача.

Якщо заряду накопичувального конденсатора достатньо для компенсації, а струм конденсатора має постійну та змінну складові, то напруга на конденсаторі буде зменшуватися за лінійним законом відповідно до виразу:

$$u_{Cdc} = \frac{1}{C_{dc}} \int_0^t (-I_0 + I_v \cdot \sin \omega t) dt + U_{\max} = \\ = U_{\max} - \frac{I_0}{C_{dc}} - \frac{I_v \cdot \cos \omega t}{\omega C_{dc}} \quad (28)$$

Для стабільної роботи схеми слід дотримуватися співвідношення при якому напруга на конденсаторі більше амплітуди фазної напруги.

Взявши до уваги вищевказане в середовищі візуального програмування використано модель ділянки електроспоживання з послідовно підключеним динамічним відновлювачем напруги[15] (рисунок 5), яка складається з наступних елементів: джерело напруги $u_s = 380$, навантаження, трансформатор з параметрами опір первинної обмотки $R_{w1} = 0.677$ Ом, опір вторинної обмотки $R_{w2} = 0.227$ Ом, опір намагнічування $R_\mu = 21.361$ Ом, індуктивність первинної обмотки $L_{w1} = 0.353$ мГн, індуктивність вторинної обмотки $L_{w2} = 0.1183$ мГн, індуктивність намагнічування $L_\mu = 0.881$ Гн, коефіцієнт трансформації $k = 1.7$. LC – фільтр з параметрами опір індуктивності $R_f = 0.1$ Ом, індуктивність $L_f = 0.1183$ мГн, ємність конденсатора фільтра $C_f = 0.05$ мФ. Перетворювач напруги та накопичувальний конденсатор напругою $U_C = 1000$ В.

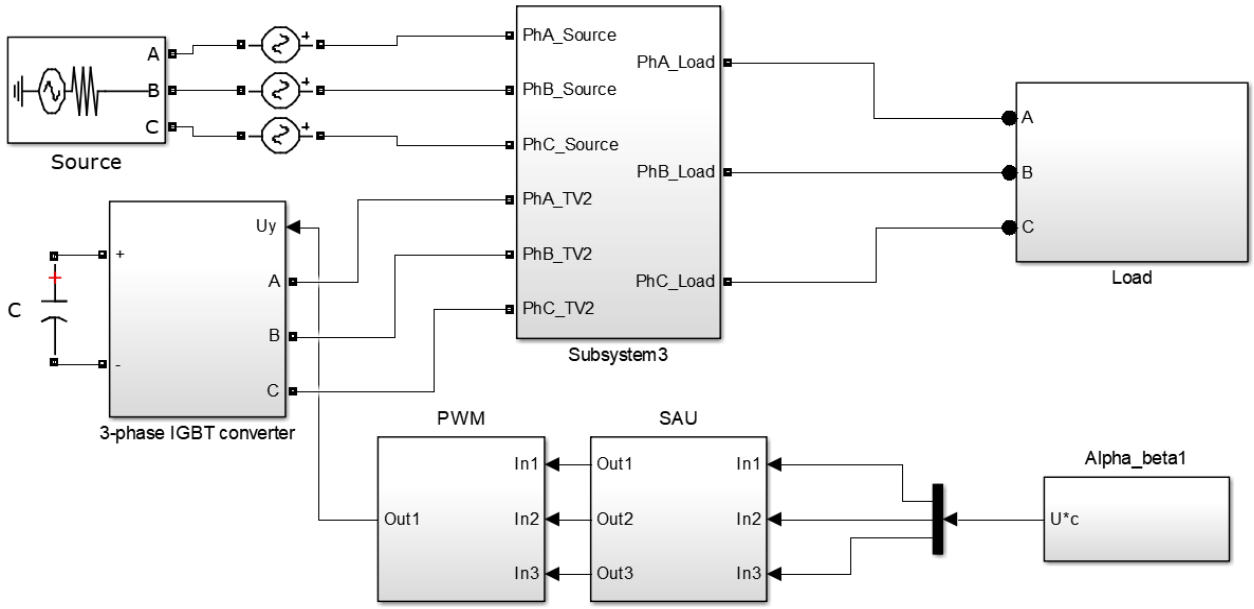


Рисунок 5. Модель ділянки електроспоживання з послідовно підключеним динамічним відновлювачем напруги

Проведено серію експериментів спрямованих на визначення показників потужності кожного з елементів динамічного відновлювача напруги та розподіл потужності в цих елементах. В експерименті імітовано роботу динамічного відновлювача напруги при спотвореній напрузі джерела живлення. Для цього в модель введено елемент який спотворює напругу мережі генеруючи напругу частотою 150 Гц та амплітудою в 10 відсотків від напруги мережі амплітудою 300 В.

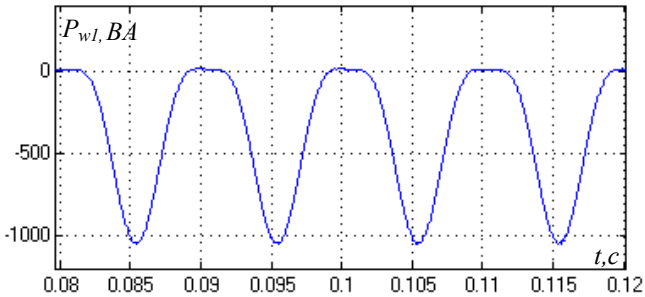
Також виконано дослідження з визначення розподілу потужності гармонік в кожному елементі динамічного відновлювача напруги.

В результаті отримані показники потужності на кожному елементів силової схеми динамічного відновлювача напруги. Оскільки розподіл потужності в силовій схемі досить важко розрахувати, використано метод визначення проекцій вектора потужності кожного елемента динамічного відновлювача напруги в залежності від частоти. Для аналізу обрані: потужністьна первинній обмотці трансформатора P_{w1}, потужність вторинної обмотки трансформатора P_{w2} ,потужність дроселя LC –фільтра P_{Lf}, потужність конденсатора LC –фільтра P_{Cf}, потужність на виході інвертора P_{inv}, потужність накопичувального конденсатора P_{dc}.

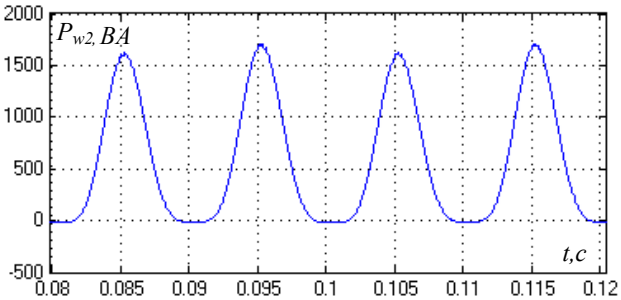
Потужністьна елементах представлена наступним чином:

$$P = u \cdot i = P_h \cdot \sin(\omega_h t - \psi_{Ph}) = \\ = P_{ah} \cdot \sin(\omega t) + P_{bh} \cdot \cos(\omega t) \quad (29)$$

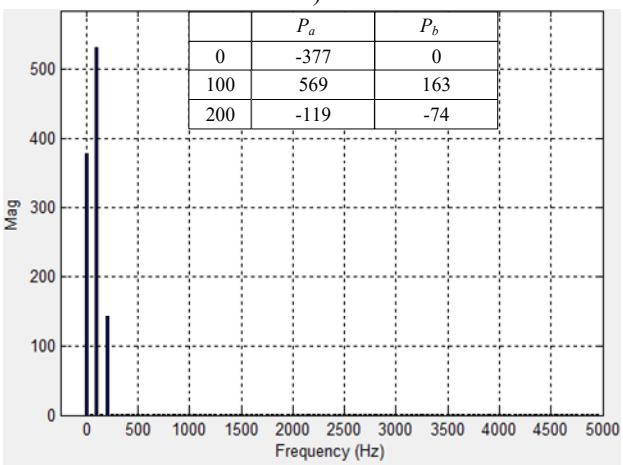
де $P_{ah} = P_h \cdot \cos\psi_{Ph}$ – косинусна складова потужності; $P_{bh} = P_h \cdot \sin\psi_{Ph}$ – синусна складова потужності; u – напруга на елементові схеми; i – струм елемента схеми; P_h – потужність гармоніки на елементові схеми; ψ_{Ph} – кут початкової фази потужності елемента схеми. На рисунку 6 наведено часові та спектральні діаграми потужності первинної та вторинної обмоток трансформатора.



a)

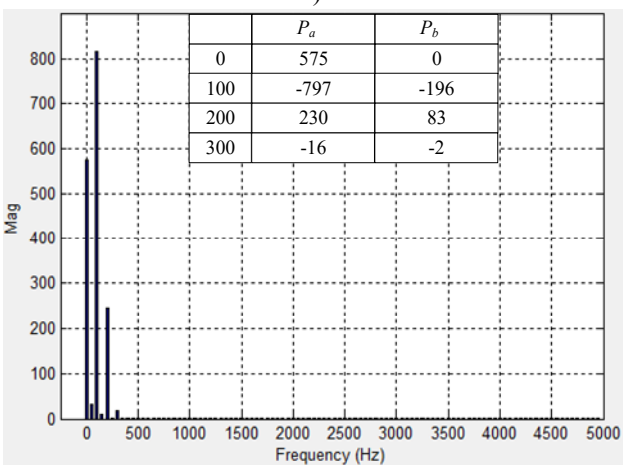


b)



	P_a	P_b
0	-377	0
100	569	163
200	-119	-74

c)



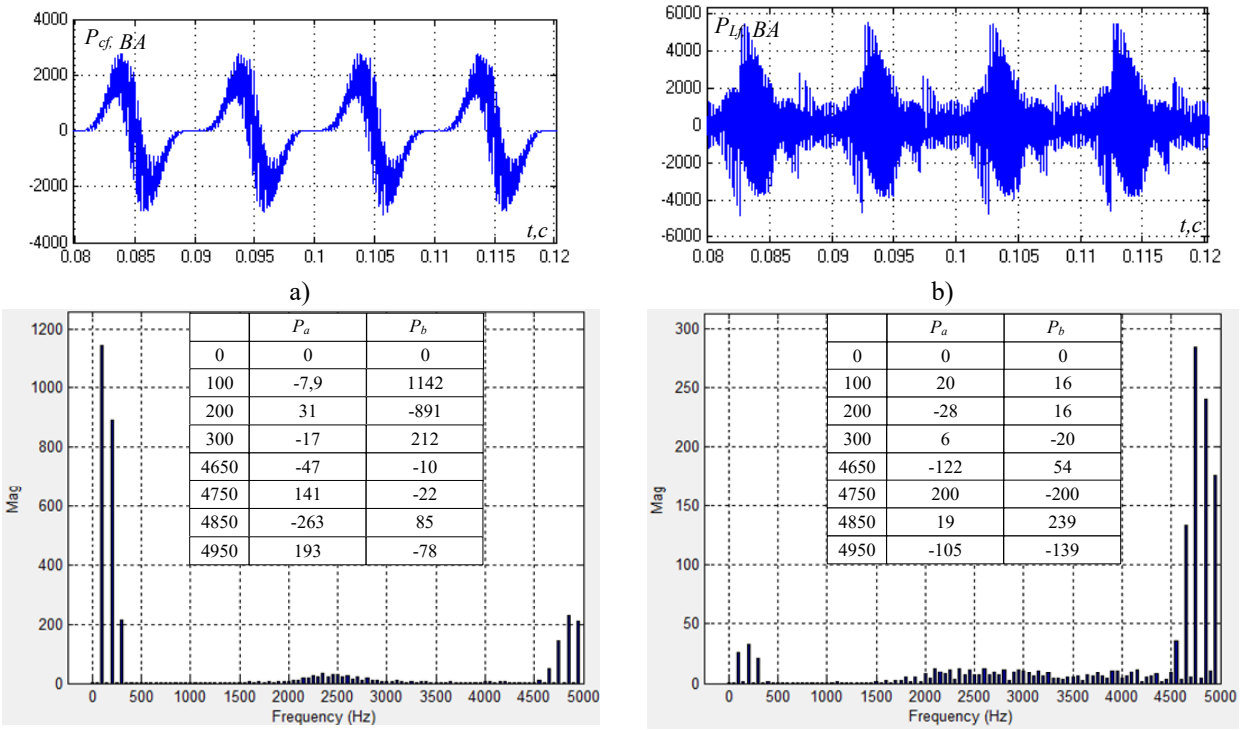
	P_a	P_b
0	575	0
100	-797	-196
200	230	83
300	-16	-2

d)

Рисунок 6. Діаграми потужності трансформатора а) часова первинної обмотки; б) часова вторинної обмотки; с) спектральна первинної обмотки; д) спектральна вторинної обмотки

Аналіз спектральних діаграм показав наявність вищих гармонік напруги, що в свою чергу призвело до виникнення вищих гармонік потужності на первинній обмотці трансформатора (рис. 6с) що в свою

чергу передбачає наявність вищих гармонік на вторинній обмотці трансформатора(рис. 6d).

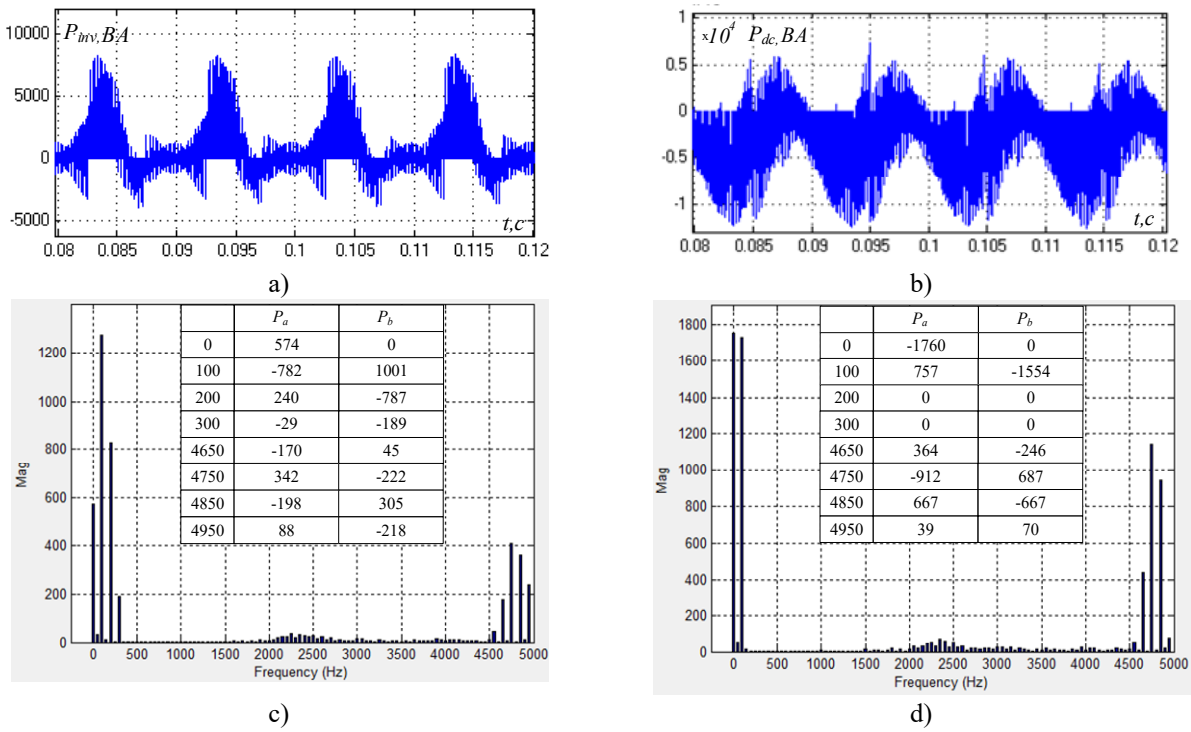


	P_a	P_b
0	0	0
100	-7,9	1142
200	31	-891
300	-17	212
4650	-47	-10
4750	141	-22
4850	-263	85
4950	193	-78

	P_a	P_b
0	0	0
100	20	16
200	-28	16
300	6	-20
4650	-122	54
4750	200	-200
4850	19	239
4950	-105	-139

Рисунок 7. Діаграми потужності LC – фільтра a) часова конденсатора; b) часова дроселя; c) спектральна конденсатора; d) спектральна дроселя.

В потужності конденсатора (рис. 7c) домінують компоненти потужності гармонік відповідних потужностей трансформатора. Гармоніки потужності конденсатора та дроселя (рис. 7d) які відповідають частоті модуляції відрізняються незначно, що відповідає фільтраційним властивостям цього кола.



	P_a	P_b
0	574	0
100	-782	1001
200	240	-787
300	-29	-189
4650	-170	45
4750	342	-222
4850	-198	305
4950	88	-218

	P_a	P_b
0	-1760	0
100	757	-1554
200	0	0
300	0	0
4650	364	-246
4750	-912	687
4850	667	-667
4950	39	70

Рисунок 8. Діаграми потужності інвертора a) часова на стороні змінної напруги; b) часова накопичувального конденсатора; c) спектральна на стороні змінної напруги; d) спектральна накопичувального конденсатора

Складові потужності частотою 200 Гц в досліджуваному варіанті на накопичувальному конденсаторі відсутні (рис. 8c), що зумовлено перерозподілом потужності на даній частоті в перетворювачі (рис. 8d).

Складові потужності накопичувального конденсатора зумовлені сумою високочастотних складових на виході всіх фаз перетворювача.

Для порівняння вище отриманих потужностей синусної та косинусної складової потужності кожного елемента динамічного відновлювача напруги в залежності від частоти внесемо їх до таблиці 1.

Таблиця 1. Значення ортогональних проекцій вектора потужності за гармоніками

Частота	Конденсатор		Вихід перетворювача		конденсатора LC – фільтра		Дросель LC – фільтра		Вторинна обмотка		Первинна обмотка	
	P_a, ВА	P_b ВА	P_a, ВА	P_b ВА	P_a, ВА	P_b ВА	P_a, ВА	P_b ВА	P_a, ВА	P_b ВА	P_a, ВА	P_b ВА
0	-1760	0	574	0	-	-	-	-	575	0	-377	0
100	757	-1554	-782	1001	-7.9	1142	20	16	-797	-196	569	163
200	-	-	240	-787	31	-891	-28	16	230	83	-119	-74
300	-	-	-29	-189	-17	212	6	-20	-16	-2	-	-
4650	364	-264	-170	45	-47	-10	-122	54	-	-	-	-
4750	-912	687	342	-222	141	-22	200	-200	-	-	-	-
4850	667	-667	-198	305	-263	85	19	239	-	-	-	-
4950	39	70	88	-218	193	-78	-105	-139	-	-	-	-

Аналіз частотних характеристик слід проводити починаючи з накопичувального конденсатора оскільки саме він є джерелом живлення динамічного відновлювача напруги. Порядок дослідження частот прийнято від меншої до більшої.

Постійна складова потужності на виході накопичувального конденсатора має значення в 1760 одиниць, на виході перетворювача вона сягає 590. Це зумовлено тим що конденсатор живить три фази одночасно. Далі на дроселі та конденсаторі LC - фільтра постійна складова потужності відсутня. Це може бути спричинене перерозподілом потужністю між частотами. Далі на вторинній обмотці трансформатора потужность становить 580 одиниць, а на первинній обмотці трансформатора, зважаючи на втрати в трансформаторі потужность становить 380 одиниць.

Потужність на частоті 100 Гц становить 1740 одиниць, а на виході перетворювача вже становить 1280. Це може бути спричинене перерозподілом потужності в перетворювачі між фазами та частотами. На дроселі LC – фільтра потужність становить 30 одиниць, а на конденсаторі згладжуючого фільтра 1170, що в сумі, враховуючи втрати, співпадає з цією ж потужністю на виході перетворювача. Далі на вторинній обмотці трансформатора потужність становить 810 одиниць, а на первинній обмотці трансформатора, зважаючи на втрати в трансформаторі потужність на частоті 100 Гц становить 580.

На частоті 200 Гц потужність на виході накопичувального конденсатора відсутня, а от на виході перетворювача вона становить 820 одиниць. Це зумовлено перерозподілом потужністю між частотами. На дроселі LC – фільтра потужність на частоті 200 Гц становить 40 одиниць, а на конденсаторі згладжуючого фільтра 900, що в сумі трохи більше за потужність на виході перетворювача, це спричинене перерозподілом потужністю між частотами. На вторинній обмотці вольтододатнього трансформатора потужність на частоті 200 Гц становить 250 одиниць, а на первинній обмотці трансформатора, зважаючи на втрати в трансформаторі потужність становить 150 одиниць.

Потужність на частоті 300 Гц є лише на виході перетворювача та елементах LC – фільтра, що вказує на перерозподілом потужністю між частотами.

На діапазоні частот від 4500 до 5000 Гц потужність на елементах виникає в залежності від частоти модуляції. Але на обмотках трансформатора потужність на цій частоті відсутня, це вказує на те що ця потужність виникла при роботі ШІМ, а LC - фільтр взяв на себе цю потужність.

V. ВИСНОВКИ

Досліджений розподіл гармонічних компонентів потужності кожного елемента динамічного відновлювача напруги. Встановлено що при роботі перетворювача виникають високочастотні компоненти потужності викликані частотою роботи ШІМ, які компенсуються за допомогою LC-фільтра. В потужності конденсатора домінують компоненти потужності гармонік відповідних потужностей трансформатора. Гармоніки потужності конденсатора та дроселя які відповідають частоті модуляції відрізняються незначно, що від-повідає фільтраційним властивостям цього кола. Також виявлено що низькочастотні складові при-сутні на всіх елементах силової схеми крім накопичувального конденсатора. Причиною цього може слугувати перерозподіл потужності між фазами в перетворювачі. Також встановлено, що рівень потужності гармонійних складових на конденсаторі значно перевищує рівень на виході перетворювача. Це спричинене тим що конденсатор працює відразу на три фази.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] S. Mikkili, A.K. Panda, Power Quality Issues: Current Harmonics, Florida: CRC Press, 2018, p. 160. DOI 10.1201/9781315222479.

[2] Hirofumi Akagi; Edson Hirokazu Watanabe; Mauricio Aredes, "The Instantaneous Power Theory," in Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning , IEEE, 2017, pp.37-109, doi: 10.1002/9781119307181.ch3.

[3] Bezzub M., Bialobrzheskyi O., Reva I.& TodorovO. (2021). Series active power filter functioning study under conditions of different indicators of power quality deviation. Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences. 129-138. 10.32782/2225-6733.43.2021.16

[4] Moghassemi, Ali & Sanjeevikumar, P.. (2020). Dynamic Voltage Restorer (DVR): A Comprehensive Review of Topologies, Power Converters, Control Methods, and Modified Configurations. Energies. 13. 10.3390/en13164152.

[5] R. Sedaghati, M. Ghasemi and M. Hayatdavudi, "Performance study of Dynamic Voltage Restorer (DVR) in order to power quality improvement," 2012 Proceedings of 17th Conference on Electri-cal Power Distribution, 2012, pp. 1-6.

[6] T. AppalaNaidu, "The Role Of Dynamic Voltage Restorer (DVR) in improving power quality," 2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), 2016, pp. 136-141, doi: 10.1109/AEEICB.2016.7538259.

[7] Bondarenko, S., Bialobrzheskyi, O., & Vlasenko, R. (2018). Investigation of the influence of the transformer of a series active filter on the quality of voltage. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 93-101. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-10.

[8] M. Bezzub, O. Bialobrzheskyi, O. Todorov and I. Reva, "The Effect Frequency Characteristics of the Series Active Filter with a Voltage-positive Transformer Power Circuit on Quality of Filtering," 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005782.

[9] Yao, Sen & Zhu, Zheng & Zhang, Hua & Cao, Jun & Zhang, Guang. (2014). The Design of Filter Parameters of Dynamic Voltage Restorer in Medium Voltage Network. Applied Mechanics and Materials. 654.

[10] ChenGuodong, ZhuMiao & Cai Xu. (2014). Parameter Optimization of the LC filters Based on Multiple Impact Factors for Cascaded H-bridge Dynamic Voltage Restorers. Journal of Power Electronics. 14. 10.6113/JPE.2014.14.1.165.

[11] Sartran Laurent, Barrett Samuel, Kuncoro Adhiguna, Stanojević Miloš, Blunsom Phil & Dyer Chris. (2022). Transformer Grammars: Augmenting Transformer Language Models with Syntactic Inductive Biases at Scale. Transactions of the Association for Computational Linguistics. 10. 1423-1439. 10.1162/tacl_a_00526.

[12] Vaishnav Navneet, Krishna Bajjuri & Jain Amit. (2022). Inductor Selection, Improved Active Damping and Speed Sensorless Operation Without Voltage Sensors in IM Drive With LC Filter. IEEE Transactions on Power Electronics. 37. 1-10. 10.1109/TPEL.2022.3192117

[13] Li Guanlin, Amirabadi Mahshid, Chen Xiyou & Lehman Brad. (2022). The Methodology of Constructing the Quadratic Converters. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. PP. 1-1. 10.1109/JESTPE.2022.3157002

[14] Chenchireddy Kalagotla & Sreejyothi Khammampati. (2022). Level-Shifted PWM Techniques Applied to Flying Capacitor Multilevel Inverter. 10.1109/ICEARS53579.2022.9752074.

[15] BezzubM., Todorov O., Bialobrzheskyi O.& Reva I. (2021). Unified Power Quality Conditioner Electrical Complex for Compensation Influence of Sharply Variable Loading. 222-227. 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570033.

Стаття надійшла до редакції 18.01.2023

THE POWER HARMONIC COMPONENTS DISTRIBUTION STUDY IN THE POWER CIRCUIT OF A DYNAMIC VOLTAGE RESTORER

BEZZUBM.A. PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

BIALOBRZHESKYIO.V. D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

TODOROV O.V. PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: olehtodorov@gmail.com;

Purpose. *Investigation of the distribution of harmonic power components in the power circuit of a dynamic voltage restorer.*

Methodology. *On the basis of the differential equations of the power circuit of a dynamic restorer, a search for the relationship between the mode parameters and the parameters of the circuit elements is performed. On the basis of the obtained expressions, a model of a dynamic voltage regulator was created using the methods of mathematical modeling in the visual programming environment..*

Findings. *The equations that reflect the relationship between the mode parameters of a dynamic voltage restorer and the parameters of circuit elements are obtained. As a result of modeling the mode with different harmonic composition of current and voltage, the following features of the distribution of instantaneous power components are revealed.*

Originality. *It has been established that the presence of different current and voltage harmonics acting in the transformer of a dynamic restorer causes additional power harmonics that are transformed in the windings. It is noted that the low-frequency power harmonics of the LC filter dominate on the capacitor, which is connected in parallel to the transformer winding, while the level of high-frequency components caused by PWM modulation for the capacitor and the filter choke differ slightly. The zero-frequency power component of the storage capacitor corresponds to a tripled zero-time power component at the output of the converter, which is due to its operation in three phases. This cannot be extended to the second and third harmonics of the powers of the converter and the capacitor; these components are absent in the latter, which is due to energy exchange processes between the phases of the converter.*

Practical value. *Using the obtained expressions, the principle of determining the parameters of the elements of the power circuit of a dynamic voltage restorer, in particular, the storage elements, is formulated.*

Keywords: Dynamic voltage restorer; harmonic distortion; voltage transformer; harmonic power; harmonic power.

REFERENCES

[1] S. Mikkili, A.K. Panda, Power Quality Issues: Current Harmonics, Florida: CRC Press, 2018, p. 160. DOI 10.1201/9781315222479.

[2] H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, The Instantaneous Power Theory, in Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, (2017). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781119307181.ch3.

[3] 3. Bezzub, M.A. & Bialobrzheskyi, Olexii & Reva, Ihor & Todorov, O.. (2021). Series active power filter functioning study under conditions of different indicators of power quality deviation. Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences. 129-138. 10.32782/2225-6733.43.2021.16

[4] Moghassemi, Ali & Sanjeevikumar, P.. (2020). Dynamic Voltage Restorer (DVR): A Comprehensive Review of Topologies, Power Converters, Control Methods, and Modified Configurations. Energies. 13. 10.3390/en13164152.

[5] R. Sedaghati, M. Ghasemi and M. Hayatdavudi, "Performance study of Dynamic Voltage Restorer (DVR) in order to power quality improvement," 2012 Proceedings of 17th Conference on Electri-cal Power Distribution, 2012, pp. 1-6.

[6] T. Appala Naidu, "The Role Of Dynamic Voltage Restorer (DVR) in improving power quality," 2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), 2016, pp. 136-141, doi: 10.1109/AEEICB.2016.7538259.

[7] Bondarenko, S., Bialobrzheskyi, O., & Vlasenko, R. (2018). Investigation of the influence of the transformer of a series active filter on the quality of voltage. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 93-101. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-10.

[8] Bezzub, Maksim & Todorov, O. & Bialobrzheskyi, Olexii & Reva, Ihor. (2022). The Effect Frequency Characteristics of the Series Active Filter with a Voltage-positive Transformer Power Circuit on Quality of Filtering.. 10.1109/MEES58014.2022.10005782.

[9] 3. Yao, Sen & Zhu, Zheng & Zhang, Hua & Cao, Jun & Zhang, Guang. (2014). The Design of Filter Parameters of Dynamic Voltage Restorer in Medium Voltage Network. Applied Mechanics and Materials. 654.

[10] Chen, Guodong & Zhu, Miao & Cai, Xu. (2014). Parameter Optimization of the LC filters Based on Multiple Impact Factors for Cascaded H-bridge Dynamic Voltage Restorers. Journal of Power Electronics. 14. 10.6113/JPE.2014.14.1.165.

[11] Sartran, Laurent & Barrett, Samuel & Kuncoro, Adhiguna & Stanojević, Miloš & Blunsom, Phil & Dyer, Chris. (2022). Transformer Grammars: Augmenting Transformer Language Models with Syntactic Inductive Biases at Scale. Transactions of the Association for Computational Linguistics. 10. 1423-1439. 10.1162/tacl_a_00526.

[12] Vaishnav, Navneet & Krishna Bajjuri, & Jain, Amit. (2022). Inductor Selection, Improved Active Damping and Speed Sensorless Operation Without Voltage Sensors in IM Drive With LC Filter. IEEE Transactions on Power Electronics. 37. 1-10. 10.1109/TPEL.2022.3192117

[13] Li, Guanlin & Amirabadi, Mahshid & Chen, Xiyou & Lehman, Brad. (2022). The Methodology of Constructing the Quadratic Converters. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. PP. 1-1. 10.1109/JESTPE.2022.3157002

[14] Chenchireddy, Kalagotla & Sreejyothi, Khammampati. (2022). Level-Shifted PWM Techniques Applied to Flying Capacitor Multilevel Inverter. 10.1109/ICEARS53579.2022.9752074.

[15] Bezzub, Maksim & Todorov, O. & Bia-lobrzheskyi, Olexii & Reva, Ihor. (2021). Unified Power Quality Conditioner Electrical Complex for Compensation Influence of Sharply Variable Loading. 222-227. 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570033