

ЕЛЕКТРОМАГНІТНОСУМІСНІ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ З РЕЛЕЙНИМ КЕРУВАННЯМ

Розвиток промисловості призводить до зростання нелінійних навантажень, які є генераторами вищих гармонік у мережу. Існує багато пристроїв для фільтрації вищих гармонік. Використання активних випрямлячів у складі напівпровідникових джерел живлення, вирішує проблему генерації небажаних гармонік в мережу та забезпечує коефіцієнт потужності рівним 1. Розроблено 6 варіантів трифазних та однофазних джерел живлення працюючих в режимі джерела струму. Всі схеми складаються з двох частин: активного випрямляча та DC-DC перетворювача. Сфера використання таких джерел різноманітна: електропривод постійного струму, електроенергетична система вітряків, електрична система літаків. Система керування такими перетворювачами релейна, вона забезпечує формування струму та граничну швидкодію у відпрацюванні збурень. Цифровим моделюванням отримані осцилограми які підтверджують працездатність запропонованих джерел, електромагнітну сумісність джерел живлення з мережею та значення коефіцієнта потужності близьким до одиниці. Дослідження електромагнітних процесів дозволило отримати аналітичні вирази для частоти релейного режиму, смності конденсаторів та умов працездатності джерел. Розроблена програма дозволяє отримати значення параметрів для вибору силових елементів схеми. Якість споживаного струму проаналізовано за допомогою розрахунку коефіцієнта гармонійних спотворень THD. Для усіх розглянутих джерел значення THD менше 5%, що задовольняє стандартам на якість споживано струму.

Ключові слова: джерело струму, електромагнітна сумісність, релейне керування, активний випрямляч

Вступ. Розвиток промисловості призводить до зростання нелінійних навантажень, які є генераторами вищих гармонік у мережу. Внаслідок цього проблема якості електроенергії ще більше загострюється. Економічні втрати через невідповідність якості електроенергії вимогам стандартів обчислюються мільярдами євро. Тому проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) нелінійних навантажень з мережею стоїть на першому місці при розробці джерел живлення (ДЖ).

Техніко-економічні показники споживачів електроенергії багато в чому залежать від можливості джерел живлення реалізувати вимоги, які пред'являються до них з боку споживача: діапазон регулювання та стабілізація параметрів (струм, напруга, потужність), нечутливість до дії збурень

Одним із класифікаційних ознак джерел живлення є вид їх зовнішньої характеристики, відповідно до якого реалізуються режими джерела напруги, джерела струму або джерела потужності. Джерело живлення повинне максимально точно реалізувати умови: $U = \text{const}$, або $I = \text{const}$, або $P = \text{const}$.

Джерела напруги є загальноприйнятим при виробництві, перетворенні, розподілі та споживання електричної енергії, але існує багато областей техніки, в яких використання джерел струму $I = \text{const}$ дозволяє отримати кращий ефект і принципово нові можливості в порівнянні з джерелом напруги.

Сучасні джерела живлення мають право на існування, якщо вони відповідають не тільки вимогам споживачів, але й при цьому вплив напівпровідникових джерел на мережу живлення не повинен виводити показники якості електроенергії за межі допустимих значень.

Показники якості електроенергії як напруги так і струму, споживаного з мережі, встановлюються як вітчизняними (ГОСТ 13109-97, ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004, ДСТУ ІЕС 61000-3-12:2009 [1-3]), так і міжнародними стандартами (Std ІЕС 61000-3-12, Std ІЕЕЕ-519 [4-5]).

Мета та задачі. Мета – розробка та дослідження трифазних та однофазних напівпровідникових джерел струму електромагнітно сумісних з мережею живлення з можливістю регулювання вихідного параметра за величиною, формою та частотою.

Для поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- розробка принципів побудови джерел живлення, які працюють у режимі джерела струму;
- розробка системи керування;
- розробка цифрових моделей джерел струму;
- проведення цифрового моделювання, для підтвердження працездатності розроблених джерел;
- проведення аналізу електромагнітних процесів в джерелах живлення в трифазному та однофазному виконанні;
- отримання аналітичних виразів для розрахунку основних параметрів джерел;
- проведення гармонійного аналізу;
- розробка програми розрахунку параметрів для всіх схемотехнічних рішень.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Зарубіжні стандарти, оцінюючи показники якості електроенергії (ПЯЕ), передбачають збереження параметрів як напруги, так і струму в межах норми. Вважається, що найбільші спотворення у форму струму вносять потужні промислові нелінійні навантаження, однак зараз доводиться зважати на вплив спотворення форми споживаного струму малопотужною технікою, що містить у своєму складі випрямлячі. При цьому ця техніка сама пред'являє жорсткі вимоги до якості електроенергії [6].

Найпростішим методом покращення якості електроенергії є фільтрації вищих гармонік за допомогою пасивних фільтрів, які складаються з конденсаторів та індуктивностей. Відомі недоліки цих фільтрів не дозволяють їм забезпечити високу якість електроенергії по цілому ряду ПЯЕ, вирішується практично одне завдання - компенсація однієї найбільш вираженої гармоніки [7].

Поява повністю керованих напівпровідникових приладів (IGBT, IGCT, GTO) дозволило розробити новий перспективний клас пристроїв, які дозволяють найбільш ефективно покращувати якість споживаної електроенергії – активні фільтри [8]. Робота активних фільтрів заснована на виробленні антигармонік у протифазі гармонікам, які генеруються нелінійним навантаженням, тобто. реалізується режим компенсації гармонік. У всіх випадках таке управління вимагає багатьох вимірвальних, перетворювальних та обчислювальних процедур, що ускладнює алгоритм та схемотехніку систем управління [9,10]. Наявність додатково введеного фільтра призводить до ускладнення ще й силової частини перетворювача. Найбільш перспективним є використання активних випрямлячів у складі джерел живлення [11,12].

Матеріал і результати досліджень. Виробництво якісних напівпровідникових джерел живлення можливе лише на основі замкнутих систем регулювання. При виборі відповідних структур і алгоритмів управління можливо досягти більш високих показників якості управління, зниження взаємного впливу системи мережа-споживач і забезпечити низьку чутливість до дії збурень [13].

Сучасні системи автоматичного регулювання (САР) працюють в умовах постійно діючих на них різноманітних збурень (коливання напруги мережі, зміни параметрів каналів управління об'єкта і т.д.), які істотно погіршують якість роботи САР. Зменшити ступінь впливу останніх, вдається шляхом надання САР тим чи іншим способом властивостей інваріантності.

Для зменшення чутливості САР до дії збурень запропоновано релейний принцип управління, який дозволяє забезпечити практично миттєву реакцію на відхилення від завдання, то запропоновано покращувати якість електроенергії не шляхом компенсації гармонік, а примусовим, з максимально можливою точністю, наближенням дійсного струму до величини та форми струму завдання. Точність відтворення (відстеження) сигналу завдання визначатиметься шириною петлі гістерезису релейних регуляторів.

В таблиці 1 зведені силові схеми розроблених джерел живлення реалізуючих режим джерела струму. Всі схеми складаються з двох частин активного випрямляча та DC-DC перетворювача [13-18]. Схема DC-DC перетворювача однакова для всіх, відрізняється схемотехніка активних випрямлячів.

Сфера використання таких джерел живлення різноманітна, вони можуть використовуватися для живлення електродвигунів постійного струму, в системах живлення вітряків, в електричних системах літаків [17-19].

Між активним випрямлячем та DC-DC перетворювачем знаходиться ланка постійного струму з напругою U_c . У схемах 1 та 5 знаходиться один конденсатор у ланці постійного струму, в схемах 2,4 два конденсатора, середня точка яких приєднана до нейтралі мережі. В схемах 3 та 6 середня точка конденсаторів під'єднана до фази мережі.

Система керування забезпечує формування споживаних з мережі струмів синусоїдальної форми та стабілізацію струму навантаження у всьому діапазоні його регулювання. Вона складається з релейних регуляторів струму та системи розподілення імпульсів на транзистори.

Модель системи керування для схеми 1 та 2 представлена на рисунку 1. Для схем 3 та 4 у системі керування відсутній канал «фаза С». Для однофазної 5 та 6 є тільки канал «фаза А».

Формування величини амплітуди струму мережі здійснюється наступним чином: на вхід ΔU_c приходять сигнали різниці напруги на конденсаторах між реальним значенням та завданням і цей сигнал надходить на вхід Transfer Fcn1 для згладжування пульсацій, після цього сигнал додається до величини струму завдання навантаження 7. Сформований сигнал надходить на входи множників кожної фази.

Робота каналу "фаза А" описується наступним чином – на вхід 2 надходить сигнал із датчика напруги, за допомогою блоку Gain цей сигнал масштабується для отримання одиничного синусоїди. Далі сигнал поступає на вхід фазової автопідстроювання частоти (ФАПЧ) блок «1 phase PLL». Після цього, сигнал множиться на величину завдання струму мережі. Сформований сигнал завдання струму мережі надходить на вихід 3 та на вхід блоку Relay1. На вхід 1 надходить сигнал з релейного елемента фази А. З допомогою логічних елементів AND і NOT формуються імпульси управління, що надходять на виходи 1 і 2, сигнали з яких поступають на пару транзисторів однієї стійки. Алгоритм роботи цієї пари транзисторів організований так, що один транзистор бере участь у формуванні позитивної напівхвилі струму (у цей час інший транзистор закритий), а інший негативною (перший транзистор закритий). При зміні полярності

може виникнути ситуація коли один транзистор не встиг закритися із-за інерційності, а інший вже відкрився. Запропоновано організацію безструмової паузи, завдяки якій у момент зміни полярності струму одночасна робота обох транзисторів виключена. Величина паузи залежить від ширини петлі гістерезису релейного елемента, індуктивності дроселів і величини сумарної напруги на конденсаторах.

Таблиця 1. Схематехніка трифазних та однофазних джерел живлення

№	Схема	№	Схема
1		4	
2		5	
3		6	

Робота каналів "fasa B", "fasa C" здійснюється аналогічно роботи каналу "fasa A".

З входу 7 вхід блоку Relay1 подається величина струму завдання, де визначається знак сигналу. На вхід 8 надходить сигнал релейного елемента. З допомогою логічних елементів AND і NOT формуються імпульси управління, з виходів 11, сигнали 10 надходять на транзистори DC-DC перетворювача.

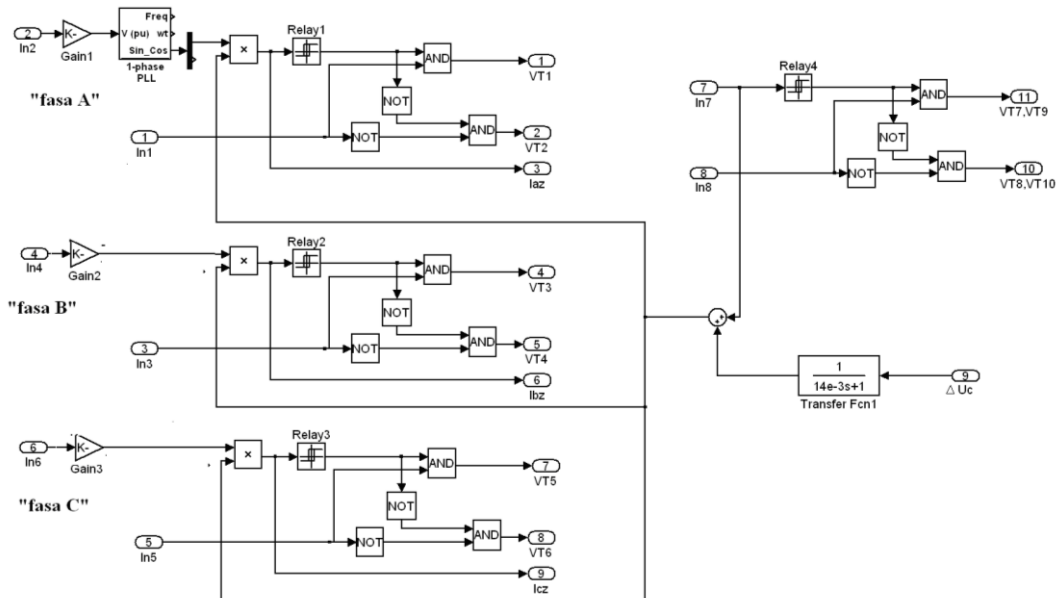


Рисунок 1 - Модель системи керування

Цифровим моделюванням отримані осцилограми роботи для схеми 2.

Моделювання проводилося за наступними значеннями параметрів: фазна напруга $U_m = 310$ В, активний опір навантаження $R_H = 10$ Ом, індуктивність навантаження $L_H = 10$ мГн, індуктивність фазних дроселів $L_A = L_B = L_C = 10$ мГн, активний опір фазних дроселів $R_A = R_B = R_C = 0,1$ Ом, ємність конденсатора $C1 = 2000$ мкФ, $a = b = 0,2$ А, $U_{C1} = U_{C2} = 350$ В.

На осцилограмах представлені криві напруги мережі u_A, u_B, u_C , криві струмів i_A, i_B, i_C , споживаних з мережі, струму навантаження I_H , робота релейних регуляторів у системі управління фази А u_{pe1} та навантаження u_{pe4} (рис.2). Під дією напруги на конденсаторі U_C показано стабілізацію струму навантаження та реакцію зміну величини опору навантаження. У час $t=0.047$ с зменшився опір

навантаження, частота релейного режиму струму навантаження збільшилася (рис.2б) на фрагменті (рис 2а) ділянки 0,0455 – 0,049.

Аналогічні результати отримані і для інших трифазних схем.

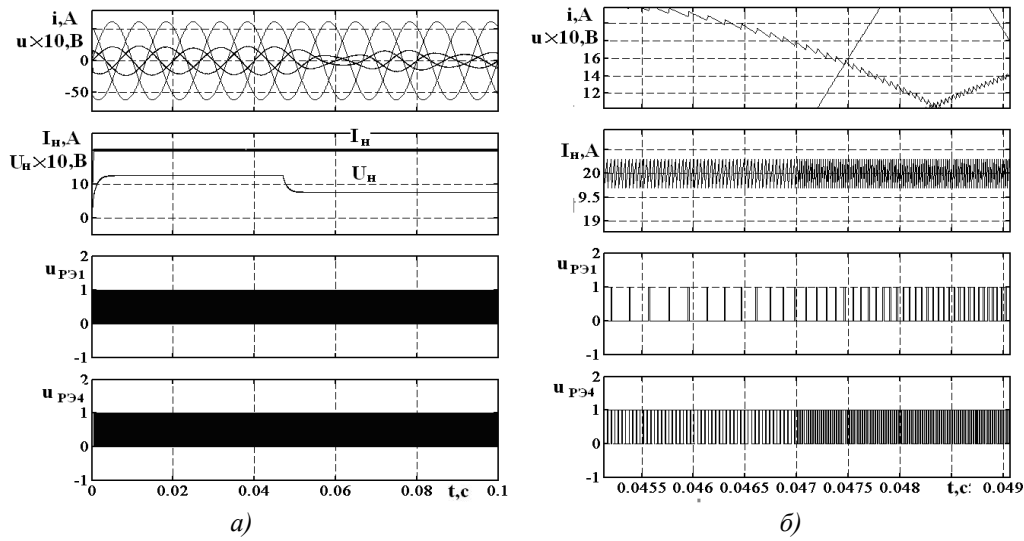


Рисунок 2 – Осцилограми процесів (а) і фрагмент (б)

При роботі потужних споживачів електричної енергії можливе спотворення кривої напруги в момент переходу її через нуль, що призведе до неправильної синхронізації системи керування з мережею живлення перетворювача (система не відчуває істинний момент переходу кривої напруги через нуль) (рис 3).

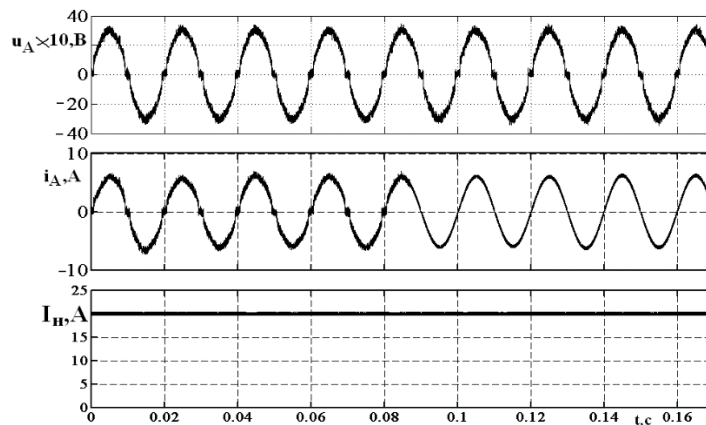


Рисунок 3 - Вплив роботи ФАПЧ

З урахуванням швидкодії джерела струму, крива струму повністю повторює спотворену криву напруги (THD=6,88%) (рис.4). Поліпшити якість кривої струму можливо за допомогою застосування пристрою фазового автопідстроювання частоти. У момент часу $t = 0,087с$ ФАПЧ підключається до системи, що призводить до значного поліпшення кривої струму, THD зменшився в 13 разів і дорівнює 0,52%.

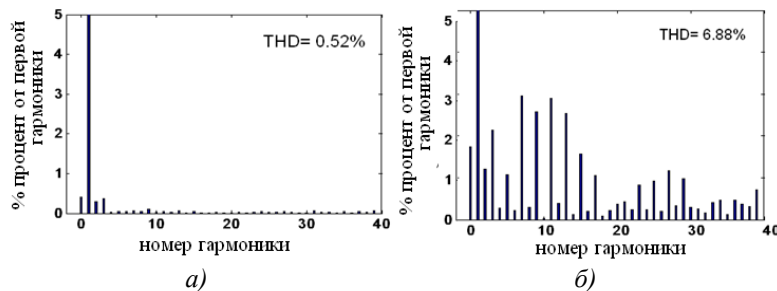


Рисунок 4 - Гармонійний склад струму з ФАПЧ (а) та без нього (б)

Рисунок 5а демонструє, на прикладі схеми 2, процес формування споживаних з мережі струмів і струму навантаження, а також реакція на зміну напруги мережі.

Аналіз осцилограми показує, що споживані з мережі струми мають синусоїдальну форму за відсутності фазового зсуву між напругами і струмами ($\varphi=0, \cos\varphi=1$). При зміні величини напруги живлення синусоїдність струмів і $\varphi=0$ зберігаються, тобто. система не чутлива до дії такого обурення та електромагнітно сумісна з мережею. При дії збурень фазний струм змінює своє значення для встановлення балансу потужності.

Релейний принцип керування дозволяє реалізувати режими роботи при якому струм у навантаженні з високим ступенем точності повторює форму задаючих завдань. У якості прикладу представлено відпрацювання закону виду $i_n = I_m \sin \omega t$

У якості навантаження можна використовувати ємнісне навантаження ($C_n = 2000 \mu\text{кФ}$). Зростання напруги на конденсаторі є збуренням для джерела живлення. Осцилограми показують, що джерело струму нечутливе до дії збурень, струм заряду стабільний, споживаний з мережі струм синусоїдальний при $\cos\varphi=1$.

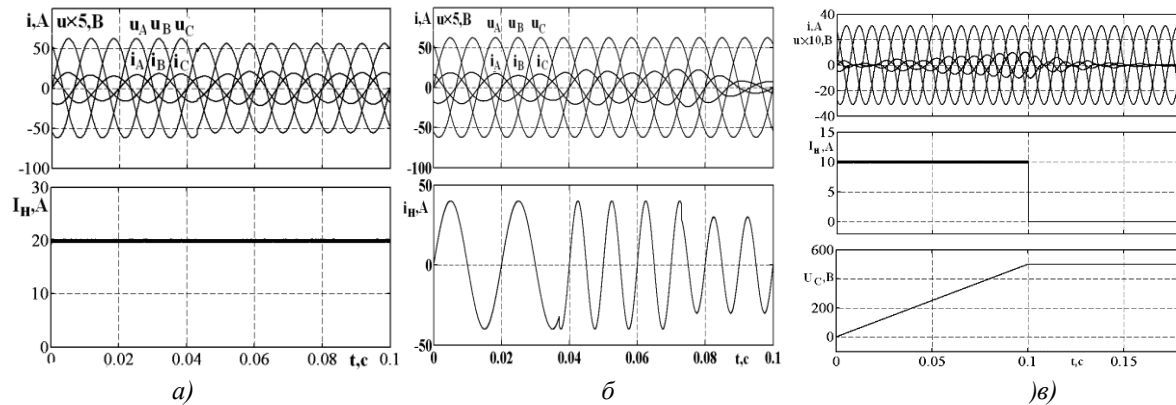


Рисунок 5 – Осцилограми роботи схеми 2:
 а) реакція на зміну напруги, б) формування синусоїдного струму навантаження,
 в) заряд конденсатора навантаження

Аналогічні результати отримані і для інших трифазних схем.

Рисунок 6 демонструє роботу однофазної схеми 5. Показано наростання струму в навантаженні під дією повної напруги рівної напрузі на конденсаторі $U_C=400 \text{ В}$, стабілізація струму навантаження та реакція на зміни величини опору навантаження (рис.6 а) та напруги мережі живлення (рис.6 б). Синусоїдність струму зберігається при відсутності фазового зсуву в обох випадках, система не чутлива до цих збурень.

Також можливо формування змінного струму в навантаженні як і для трифазних перетворювачів, в такому випадку джерело струму працює як однофазний перетворювач частоти.

Аналогічні результати отримані і для схеми 6.

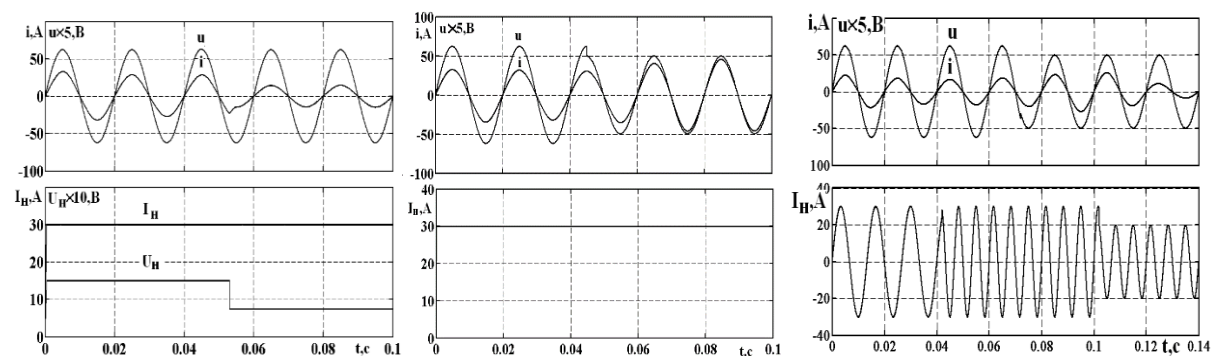


Рисунок 6 – Осцилограми роботи схеми 5:
 а) реакція на зміну напруги, б) реакція на змінення опору навантаження,
 в) формування синусоїдного струму навантаження,

При формуванні струму навантаження, при відсутності збурень діючих на систему, при заданому значенні струму постійна і залежить від параметрів навантаження та схеми. А у контурі формування синусоїдального струму, з змінення величини струму буде змінюватися частота релейного режиму.

Дослідження електромагнітних процесів в джерелах живлення дозволили отримати вирази для частоти релейного режиму та умови працездатності джерел [13,16,17].

В таблицю 2 зведені вирази для визначення максимальних та мінімальних значень частот які залежать від параметрів схеми та ширини петлі гістерезису a , значення напруги в ланці постійного струму U_d

Умовою працездатності джерел є підтримання релейного режиму, він зупиниться якщо напруга на конденсаторі буде дорівнювати або стане менше мінімальної напруги. Це підтверджується виразами визначення мінімальної частоти. Перед початком роботи треба зарядити конденсатори до напруги вищою за мінімальну.

Аналіз показує що, найбільше значення мінімальної напруги ланки постійного струму буде в схемі 3, найменше значення серед трифазних схем у 1 схемі, а у однофазній у 5. Відповідно до цього частоти релейного режиму будуть істотно відрізнятися.

Таблиця 2. Параметри джерел струму

	Напруга на конденсаторах	Напруга звена постійного струму	Частота релейного режиму	
			Мінімальна частота, Гц	Максимальна частота, Гц
1	$U_C > \sqrt{3}U_m$	$U_d = U_C$	$f_{\min} = \frac{U_C}{12aL_A} - \frac{9(U_m - I_m R_A)^2}{16aU_C L_A}$	$f_{\max} = \frac{U_C}{6aL_A} - \frac{9(U_m - I_m R_A)^2}{32aU_C L_A}$
2	$U_{C1} > U_m$	$U_d = U_{C1} + U_{C2}$	$f_{\min} = \frac{U_{C1}^2 - (U_m - I_m R_A)^2}{2aL_A U_C}$	$f_{\max} = \frac{U_{C1}^2}{2aL_A U_C}$
3	$U_{C1} > \sqrt{3}U_m$	$U_d = U_{C1} + U_{C2}$	$f_{\min} = \frac{U_{C1}^2 - 3U_m^2}{2aL_A U_C}$	$f_{\max} = \frac{U_{C1}}{4aL_A}$
4	$U_{C1} > U_m$	$U_d = U_{C1} + U_{C2}$	$f_{\min} = \frac{U_{C1}^2 - (U_m - I_m R_A)^2}{2aL_A U_C}$	$f_{\max} = \frac{U_{C1}^2}{2aL_A U_C}$
5	$U_C > U_m$	$U_d = U_C$	$f_{\min} = \frac{U_C^2 - (U_m - I_m R_{op})^2}{4aU_C L_{op}}$	$f_{\max} = \frac{U_C}{4aL_{op}}$
6	$U_{C1} > U_m$	$U_d = U_{C1} + U_{C2}$	$f_{\min} = \frac{U_{C1}^2 - (U_m - I_m R_{op})^2}{4aU_C L_{op}}$	$f_{\max} = \frac{U_{C1}}{4aL_{op}}$

Для розрахунку основних параметрів джерел живлення був розроблений алгоритм та програма розрахунку параметрів для вибору силових елементів схеми.

У програмі необхідно задати напругу на конденсаторах, пульсації напруги на конденсаторах, амплітудне значення напруги мережі, струм навантаження, опір навантаження, потужність навантаження, індуктивність вхідних дроселів, ширину петлі гістерезису релейного елемента в контурі формування споживаних з мережі.

Перед початком розрахунку вибираємо відповідну схему. Якщо розрахунок ведеться за заданою потужністю навантаження, відзначити «розрахунок за заданою потужністю» (тоді не потрібно вказувати опір навантаження, у графі опір ставимо «0»). Зазначаємо, якщо необхідно розрахувати вхідну індуктивність, або максимальну частоту, треба в рядку параметр якого ми шукаємо задаємо «0». Натискаємо кнопку "Розрахунок". У відповідних вікнах з'являються значення: ємності конденсаторів, амплітудного значення струму мережі, максимальної частоти релейного режиму вхідного струму або індуктивності вхідних дроселів.

Рівень гармонік струму оцінено коефіцієнтом THD, отримані графіки залежностей від струму навантаження для всіх схем (рис 8)

Для схем 2-3 THD практично у всьому діапазоні змінення струму навантаження THD близько 1%, Для схем 4-6 THD у всьому діапазоні становить 2,5-2%, що спричинено наявністю пульсацій напруги на конденсаторах, зменшити величину яких можна налаштуванням фільтра на виході датчика напруги конденсатора. Для схеми 1 THD найбільший, це спричинено тим що в системах без нульового проводу відбувається взаємодія між фазами.

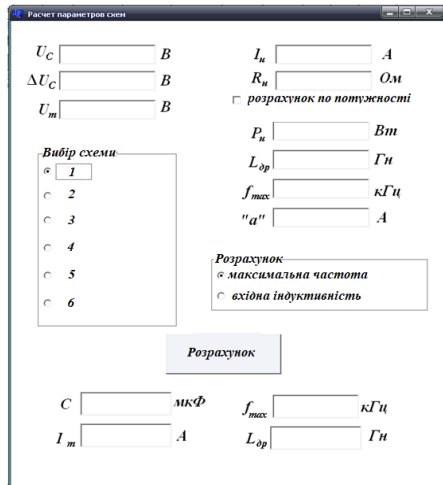


Рисунок 7 – Вікно програми

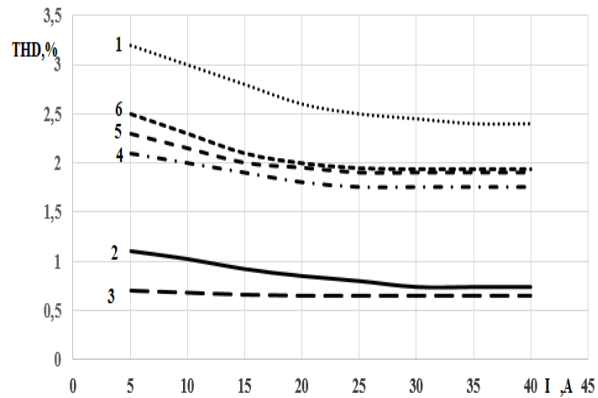


Рисунок 8– Залежності $THD=f(I_n)$

Висновки. Розроблено та досліджено трифазні та однофазні напівпровідникові джерела живлення з релейним керуванням працюючих в режимі джерела струму. Представлено 6 схемотехнічних рішень джерел. Релейний принцип керування дозволив реалізувати граничну швидкість у відпрацюванні завдання та реакції на збурення, при цьому струм у навантаженні з високим ступенем точності повторює форму сигналу завдання.

Моделюванням підтверджено, що розроблені системи мають розширені функціональні можливості, реалізуючи наступні режими роботи:

- перетворення трифазної змінної напруги постійної частоти і амплітуди в постійний струм з можливістю регулювання його величини і стабілізації на заданому рівні;
- перетворення трифазної змінної напруги незмінної частоти і амплітуди в однофазний струм різної форми і регульованої частоти;

За результатами дослідження електромагнітних процесів у розглянутих системах отримано аналітичні вирази для розрахунку частот релейного режиму, умов працездатності джерел.

Розроблено програму для розрахунку основних параметрів джерел живлення для вибору силових елементів схем.

Список використаної літератури

- 1) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97: – [Действительный 21.11.1997]. – Минск, 1997. – 35с.
- 2) Электромагнитна сумісність. Частина 3-12. Норми. Норми на гармоніки струму, створені обладнанням із номінальним вхідним струмом понад 16 А та до 75 А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загальної призначеності (IEC 61000-3-12:2004, IDT): ДСТУ IEC 61000-3-12:2009 : – [Действительный 01.04.2012]. –Киев,2012. – 38с.
- 3) Электромагнитна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми на гармоніки струму, створені обладнанням із номінальним вхідним струмом силою до 16 А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загальної призначеності (IEC 61000-3-2:2004, IDT): ДСТУ IEC 61000-3-2:2004 : – [Действительный 01.01.2007]. –Киев, 2007. –24с.
- 4) CEI, 61000-1-1 : Electromagnetic compability (EMC), Part 1 : General, section 1 : application and interpretation of fundemantal definitions and terms, 2001.
- 5) IEEE-519. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems,- W.: JSC, 2014.- 65 p.
- 6) Куско А. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон: пер. с англ. Рободзея А.Н. М.: Додэка-XX1, 2008. - 336 с
- 7) Akagi H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters. / H. Akagi // Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences,2006. – Vol. 54, No.3. – P. 255-269.
- 8) Akagi H. Active Filters and Energy Storage Systems for Power Conditioning in Japan / Akagi H. // Power Electronics Systems and Applications, 2004 Hong Kong, China, 2004 – p.80-88.
- 9) Kalarathi, M. & N., Rathina. (2020). Multilevel Parallel Active Power Filter Based on ANFIS Controller for Harmonic Alleviation. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. 45. 10.1007/s40998-020-00384-8.

- 10) K. Kalyan, M. S. Rao and S. Gawre, "Improvement of Power Quality Using Series Active Power Filter(SAPF)," 2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/SCEECS48394.2020.151.
- 11) Kolar J. W. The essence of three-phase PFC rectifier systems–Part 1 / J. W. Kolar, T. Friedli // IEEE Trans. Power Electron., 2013. – vol. 28 – P. 176–198.
- 12) Gonçalves JT, Valtchev S, Melicio R, Gonçalves A, Blaabjerg F. Hybrid Three-Phase Rectifiers with Active Power Factor Correction: A Systematic Review. Electronics. 2021; 10(13):1520. <https://doi.org/10.3390/electronics10131520>
- 13) Высокоэффективные источники электропитания: Монография / Ю. П. Самчелеев, В. Г. Дрючин, Г. С. Белоха, Н. И. Андреева. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – 219 с.
- 14) Пат. 63609, МПК H02M 7/12. Регульоване джерело живлення / Белоха Г.С. Дрючин В.Г., Самчелеев Ю.П., Шевченко И.С.; заявник та патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №U201103998; заявл. 04.04.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.
- 15) Пат. 87224, МПК H02M 7/00. Регульоване джерело живлення / Белоха Г.С. Дрючин В.Г., Самчелеев Ю.П., Шевченко И.С.; заявник та патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №U201310643; заявл. 03.09.2013; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 24.
- 16) Бекбаев А.Б. Система стабилизации тока, электромагнитно совместимая с сетью. / А.Б. Бекбаев, Ю.П. Самчелеев, В.Г. Дрючин, Г.С. Белоха, Е.А. Серсанбаев // Вестник КазНТУ, Алматы. – 2014. - №1(101). – с. 93-100.
- 17) Самчелеев Ю.П. Универсальный высокоэффективный источник питания для электроприводов постоянного и переменного тока. / Ю.П. Самчелеев, В.Г. Дрючин, Г.С. Белоха // Вісник національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХП», 2013. - №36(1009). – С.317-321.
- 18) H. Bielokha and I. Shevchenko, "Active Rectifiers in the Electrical System of Aircraft," 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598724.
- 19) Г. Белоха, «Перетворювач частоти в системі генерування енергії вітроенергетичних установок», VisnikSNU/, вип. 7 (263), с. 35-39, Груд 2020.

H. Bielokha, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, **ORCID** 0000-0003-4277-367X
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ELECTROMAGNETIC COMPATIBLE CURRENT SOURCES WITH RELAY CONTROL

The development of industry leads to an increase in nonlinear loads, which are generators of higher harmonics in the network. The quality indicators of voltage and current consumed from the network are established by international standards for the quality of electricity. The simplest method of filtering harmonics is passive filters, lack of low quality harmonic compensation. The use of active filters improves the quality of the current. But active filters have a complex control system. The use of active rectifiers as part of semiconductor power supplies solves the problem of generating higher harmonics in the network and provides a power factor equal to 1.

Six variants of three-phase and single-phase power supplies have been developed. They operate as a current source. All circuits consist of two parts: an active rectifier and a DC-DC converter. The scope of use of such sources is different: a direct current electric drive, an electric power system of wind turbines, an electric system of aircraft. The control system of the relay converters provides the formation of current and the maximum speed in the processing of disturbances.

Oscillograms of the current sources are obtained by digital modeling. They confirm the efficiency of the proposed sources, the electromagnetic compatibility of the power sources with the mains and the value of the power factor close to unity. Current sources are invariant to the action of disturbances: changes in load resistance, mains voltage. The study of electromagnetic processes made it possible to obtain analytical expressions for the maximum and minimum frequency of the relay mode, the capacitance of the capacitors and the operating conditions of the sources.

The developed program allows you to get the parameters for choosing the power elements of the circuit: inductance, capacitance, switching frequency of transistors.

The quality of the consumed current is analyzed by calculating the total harmonic distortion (THD). For all considered sources, the THD value is less than 5%, which meets the quality standards for the consumed current.

Keywords: current source, electromagnetic compatibility, relay control, active rectifier

References

- 1) Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Quality standards for electric train energy in general-purpose power supply systems: GOST 13109-97: - [Valid 11/21/1997]. - Minsk, 1997. -- 35p.
- 2) Electromagnetic compatibility. Part 3-12. Norms. Current harmonics standards established by equipment with a rated input current of more than 16 A and up to and including 75 A per phase connected to low-voltage general-purpose power supply systems (IEC 61000-3-12: 2004, IDT): DSTU IEC 61000-3 -12: 2009: - [Valid 01.04.2012]. - Kiev, 2012. - 38c.
- 3) Electromagnetic compatibility. Part 3-2. Norms. Current harmonic standards established by equipment with a rated input current of up to 16 A inclusive per phase connected to low-voltage general-purpose power supply systems (IEC 61000-3-2: 2004, IDT): DSTU IEC 61000-3-2: 2004: - [Valid 01.01.2007]. - Kiev, 2007. - 24p.
- 4) CEI, 61000-1-1 : Electromagnetic compatibility (EMC), Part 1 : General, section 1 : application and interpretation of fundamental definitions and terms, 2001.
- 5) IEEE-519. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, - W.: JSC, 2014.- 65 p.
- 6) Cusco A. Quality of energy in electrical networks / A. Cusco, M. Thompson: trans. with English Robodeya AN M. : Dodeka-XX1, 2008. - 336 p
- 7) Akagi H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters. / H. Akagi // Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences, 2006. – Vol. 54, No.3. – P. 255-269.
- 8) Akagi H. Active Filters and Energy Storage Systems for Power Conditioning in Japan / Akagi H. // Power Electronics Systems and Applications, 2004 Hong Kong, China, 2004 – p.80-88.
- 9) Kalarathi, M. & N., Rathina. (2020). Multilevel Parallel Active Power Filter Based on ANFIS Controller for Harmonic Alleviation. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. 45. 10.1007/s40998-020-00384-8.
- 10) K. Kalyan, M. S. Rao and S. Gawre, "Improvement of Power Quality Using Series Active Power Filter (SAPF)," 2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/SCEECS48394.2020.151.
- 11) Kolar J. W. The essence of three-phase PFC rectifier systems—Part 1 / J. W. Kolar, T. Friedli // IEEE Trans. Power Electron., 2013. – vol. 28 – P. 176–198.
- 12) Gonçalves JT, Valtchev S, Melicio R, Gonçalves A, Blaabjerg F. Hybrid Three-Phase Rectifiers with Active Power Factor Correction: A Systematic Review. Electronics. 2021; 10(13):1520. <https://doi.org/10.3390/electronics10131520>
- 13) Highly efficient power supplies: Monograph / Yu. P. Samcheleev, V. G. Dryuchin, G. S. Belokha, N. I. Andreeva. - Alchevsk: DonSTU, 2013. -- 219 p.
- 14) Pat. 63609, IPC H02M 7/12. Adjustable power supply / Belokha GS Dryuchin VG, Samcheleev YP, Shevchenko IS; applicant and patent owner Donbass State Technical University. - 201U201103998; stated 04.04.2011; publ. 10/10/2011, Bull. № 19.
- 15) Pat. 87224, IPC H02M 7/00. Adjustable power supply / Belokha GS Dryuchin VG, Samcheleev YP, Shevchenko IS; applicant and patent owner Donbass State Technical University. - №U201310643; stated 03.09.2013; publ. 27.01.2014, Bull. № 24.
- 16) Bekbaev A.B. Current stabilization system, electromagnetically compatible with the network. / A.B. Bekbaev, Yu.P. Samcheleev, V.G. Dryuchin, G.S. Belokha, E.A. Sersanbaev // Bulletin of KazNTU, Almaty. - 2014. - No. 1 (101). - With. 93-100.
- 17) Yu.P. Samcheleev Universal high efficiency power supply for AC and DC drives. / Yu.P. Samcheleev, V.G. Dryuchin, G.S. Belokha // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of Science Works. Series: Problems of an automated electric drive. Theory and practice. - Kh. : NTU "KhPI", 2013. - No. 36 (1009). - S.317-321.
- 18) H. Bielokha and I. Shevchenko, "Active Rectifiers in the Electrical System of Aircraft," 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598724.
- 19) G. Belokha, "Frequency converter in the energy generation system of wind turbines", VisnikSNU /, vol. 7 (263), p. 35-39, Dec 2020.

Надійшла 20.12.2021

Received 20.12.2021