

А. О. ДРАНКОВА, канд. техн. наук, доц., Національний університет «Одеська морська академія»;
С. С. МІХАЙКОВ, аспірант, Національний університет «Одеська морська академія»;
І. І. КРАСОВСЬКИЙ, магістр, Національний університет «Одеська морська академія».

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ «АВТОНОМНЕ ДЖЕРЕЛО – НЕЛІНІЙНЕ НАВАНТАЖЕННЯ» ЗАСОБАМИ ПАСИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

Вступ. Широке впровадження систем управління електромеханічними пристроями з статичними силовими перетворювачами, а саме частотно–регульованого електроприводу призводить до погіршення якості електроенергії завдяки появі гармонійних спотворень струму та напруги мережі живлення [1,5]. Найбільш гостро це відчувається, коли мережа живлення має кінцеву потужність [6].

Ефективним засобом поліпшення форми струму та напруги мережі живлення є використання спеціальних фільтрокомпенсуючих пристроїв – силових фільтрів гармонік [1,5]. Силові фільтри гармонік класифікують за такими ознаками:

- за схемою включення в мережу – паралельні, послідовні і комбіновані структури;
- по виду застосованих елементів – пасивні, активні і гібридні структури;
- по числу фаз – однофазні, трифазні трьох–провідні та трифазні чотирьох–провідні структури;

Традиційно, для ослаблення вищих гармонік струмів і напруги в мережах електропостачання використовують пасивні фільтри гармонік (ПФГ) [1,3,4]. ПФГ мають низьку вартість та не вимагають частого технічного обслуговування. Однак, ПФГ є статичними пристроями, ефективність яких зменшується при зміні характеру нелінійного навантаження, а також при зміні пропускну здатності мережі. Тому, налаштування ПФГ на конкретне нелінійне навантаження є актуальною задачею для підвищення якості електроенергії всієї системи «автономне джерело – нелінійне навантаження».

Мета роботи. Підвищення якості електроенергії в системі «автономне джерело–нелінійне навантаження» засобами пасивної фільтрації.

Матеріали дослідження. Дослідження проводились на експериментальному стенді у лабораторії електромеханічних систем кафедри суднової електромеханіки і електротехніки Національного університету «Одеська морська академія». Стенд складається з наступних компонентів: трифазний мережевий автомат (МА); мережевий дросель – для створення мережі кінцевої потужності; перетворювач частоти (ПЧ); електромашинний підсилювач ЕМП12А А11 – АД і генератор постійного струму (ГПС); дільник напруги (ДН), у складі 4-ох резисторів з наступними номіналами, 3.6 МОм, 240 КОм, 22 КОм, 20 КОм – для зняття сигналу фазної напруги; трансформатор струму (Тр) – для зняття сигналу фазного струму; джерело постійного струму (ДПС) – для формування сигналу обмотки управління (ОУ) ГПС; амперметри для контролю струму ОУ та статорної обмотки ГПС; дрітаний резистор – навантаження в колі ГПС; трифазний фільтр С-типу. Функціональна схема експериментального стенду зображена на рис.1

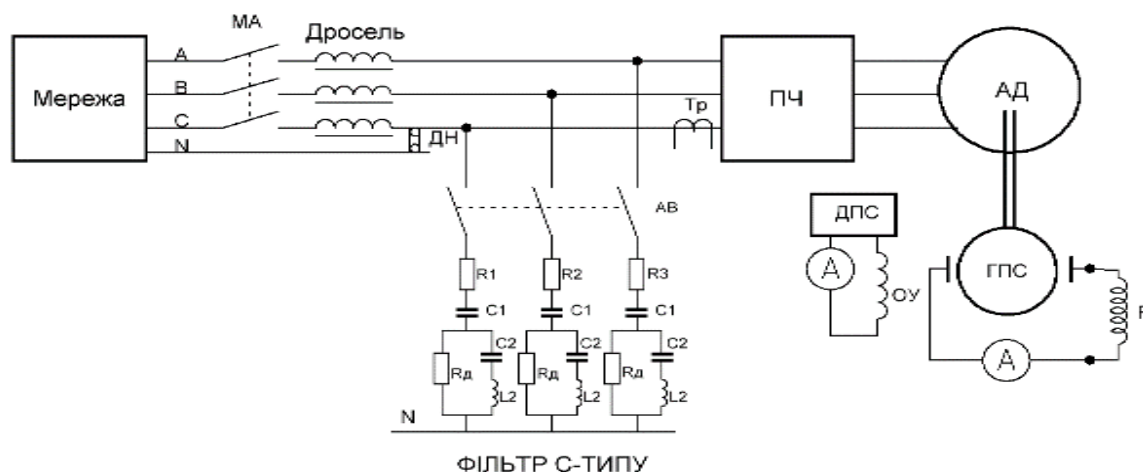


Рис. 1 Функціональна схема експериментального стенду

В експериментальному стенді використано ПЧ фірми Mitsubishi Electric серії FR A700 з потужністю 2,2 кВт. Електромашинний підсилювач ЕМП12А А11 являє собою агрегат, що складається з власне електромашинного підсилювача поперечного поля (генератора) і приводного двигуна, пов'язаних на загальному валу та розташованих у загальному корпусі на лапах. Основні електричні параметри ЕМП12А А11 приведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні електричні параметри ЕМП12А А11

Тип	Дані генератора								Дані двигуна				Примітка
	U, В	P, кВт	P _{вх.оу} , Вт	R _{оу} , Ом				I, А	U, В	I, А	P, кВт		
				I	II	III	IV						
A 11	115±4	1,0	0,56	1000	1000	-	-	8,7	220/380	5,4/3,2	1,68	Частота обертання 2900 об/хв.	

У ході експерименту було знято робочі характеристики ЕМП12А А11 при постійному струмі ОУ 10 мА та 15 мА (табл. 2 та рис. 2).

Вигляд зовнішньої характеристики збігається з виглядом механічної характеристики суднового підрулюючого пристрою, який виступає в якості нелінійного навантаження (рис.3). В разі чого можливо зробити висновок про коректність проведення експерименту.

Для побудови трифазного фільтра С-типу було виконано розрахунок елементів фільтра відповідно за формулами (1) ÷ (4) [1,3,4]. Фільтр налаштовано на гасіння 3-ої гармоніки і його параметри наведено у табл. 3. Для розрахунку використані наступні дані: напруга мережі $U = 220$ В; $f = 50$ Гц; реактивна потужність фільтра $Q_F \approx Q_{\text{ЕМП}} = 1347$ Вар.

$$C_1 = \frac{Q_F}{\omega_1 U^2} \quad (1)$$

$$C_2 = C_1 (n_g^2 - 1) \quad (2)$$

$$L_2 = \frac{1}{\omega_1^2 C_2} \quad (3)$$

$$R_d = \frac{U^2}{n_g^3 Q_F^2 k \omega_1 L_s} \sqrt{U^4 - n_g^4 Q_F^2 k \omega_1^2 L_s^2} \quad (4)$$

Таблиця 2 – Робочі характеристики ЕМП12А А11

№	Частота, Гц	Відношення, %	I _{ОУ} , мА	I _{СТ} , А	I _{ОУ} , мА	I _{СТ} , А
1	0	0	10	0	15	0
2	12,5	25		0,90		1,50
3	25	50		2,80		3,70
4	37,5	75		4,70		5,90
5	50	100		7,00		8,60

Таблиця 3 – Розрахункові параметри фільтра С-типу

№ Гармоніки	f, Гц	ω , с ⁻¹	C ₁ , мГн	C ₂ , мГн	L ₂ , мГн	R _d , Ом
3	50	42	8,6	09	14,3	300

Для перевірки резонансної якості фільтру та визначення його добротності було проведено моделювання роботи кола фільтру в програмі Electronics Workbench. Моделювання показало, що добротність фільтру має значення 15, що свідчить о його широкосмугових якостях.

До складу трифазного фільтру С-типу ввійшли також трифазний автомат (АВ) та резистори R1, R2, R3 з номіналами по 200 Ом кожний для обмеження струму, який протікає через фільтр.

В якості вимірювального приладу в ході експерименту використовувався цифровий осцилограф usb.oscill, призначений для дослідження електричних сигналів в смузі 0...15 МГц. Осцилограф виконано у вигляді зручно щупа зі змінними головками. Зі зворотного боку щупа розташований роз'єм, через який проводиться обмін даними і здійснюється електроживлення. Передбачена гальванічна ізоляція.

Управління осцилографом та відображення даних може здійснюватися: персональним комп'ютером/ноутбуком/нетбуком/планшетом під управлінням операційної системи Windows через USB інтерфейс; кишеньковим комп'ютером під управлінням операційної системи Windows CE, обладнаним USB-host портом; телефоном/планшетом під управлінням ОС Android 4 і новіше, через OTG порт.

Експериментальні дані були зняті при постійному навантаженні ОУ ГПС, яке складає 10 мА та при змінній частоті обертання асинхронного двигуна відповідно на 12.5 Гц, 25 Гц, 37.5 Гц, 50 Гц, що моделює типові режими роботи суднового підрулюючого пристрою.

Послідовність проведення експерименту для отримання осцилограм та показників якості електромережі за напругою наступна:

1. Включення мережевого автоматичного вимикача.
2. Підключення осцилографа до дільника напруги.
3. Зняття параметрів напруги мережі.
4. Пуск ЕМП частотним перетворювачем та налаштування до частоти 12.5 Гц (перша точка зняття даних).

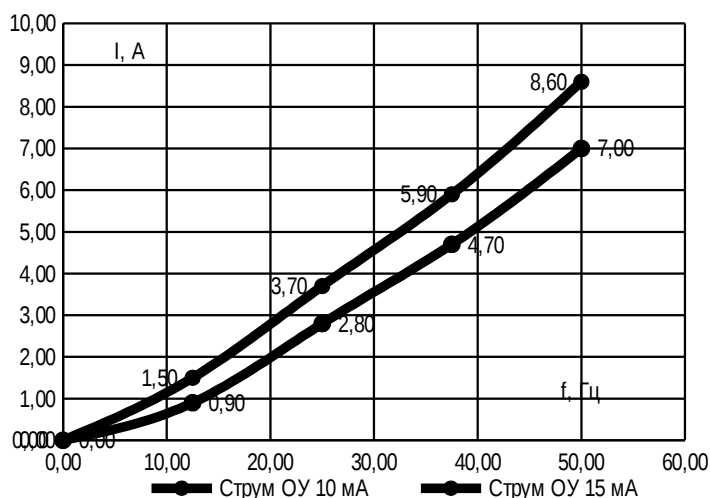


Рис. 2 Механічна характеристика ЕМП12А А11

5. Навантаження ЕМП – включення джерела постійного струму та збудження обмотки управління ЕМП до 10 мА.

6. Реєстрація даних на частоті 12.5 Гц.

7. Налаштування ПЧ на 25 Гц (друга точка зняття даних) та реєстрація даних.

8. Налаштування ПЧ на 37.5 Гц (третя точка зняття даних) та реєстрація даних.

9. Налаштування ПЧ на 50 Гц (остання точка зняття даних) та реєстрація даних.

Послідовність проведення експерименту для отримання осцилограм та показників якості електромережі за струмом наступна:

1. Підключення осцилографа до трансформатора струму.

2. Пуск ЕМП частотним перетворювачем та налаштування до частоти 12.5 Гц (перша точка зняття даних).

3. Включення джерела постійного струму та збудження обмотки управління ЕМП до 10 мА.

4. Зняття даних на 12.5 Гц.

5. Налаштування ПЧ на 25 Гц (друга точка зняття даних) та реєстрація даних.

6. Налаштування ПЧ на 37.5 Гц (третя точка зняття даних) та реєстрація даних.

7. Налаштування ПЧ на 50 Гц (остання точка зняття даних) та реєстрація даних.

Для достовірності зняття даних було виконано фіксацію режиму роботи для кожного значення частоти ЧП понад одну хвилину. Так, під час проведення експерименту знято осцилограми та спектри напруги і струму, частка яких приведено нижче (рис.3 ÷ рис.6).

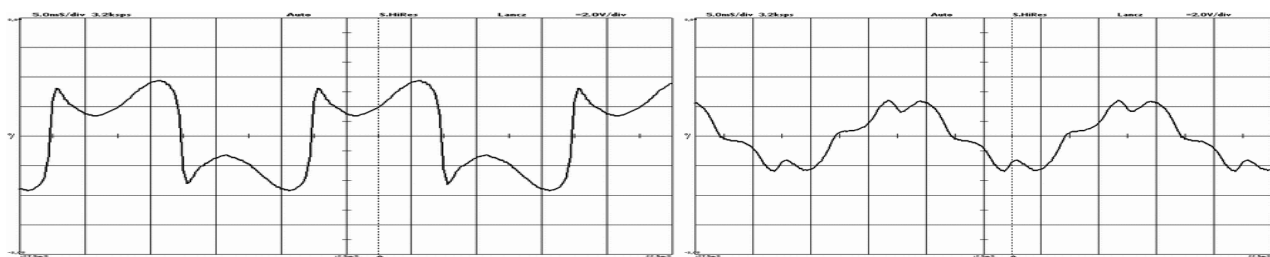


Рис. 3 – Осцилограми напруги без та з ПФГ для частоти обертання ЧП 50 Гц

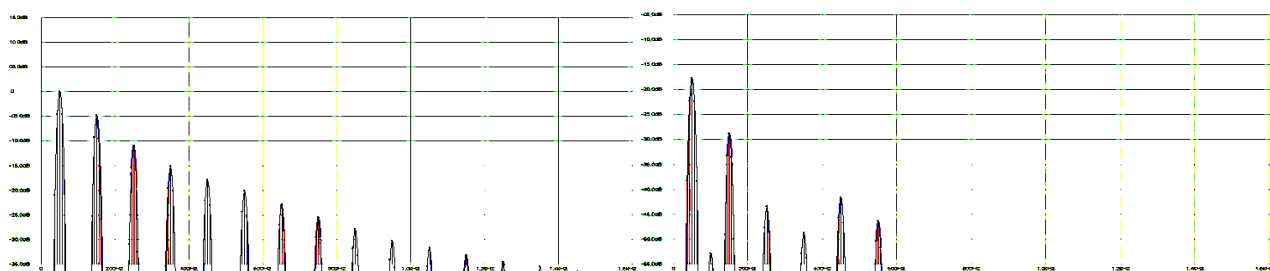


Рис. 4 – Спектри напруги без та з ПФГ для частоти обертання ЧП 50 Гц

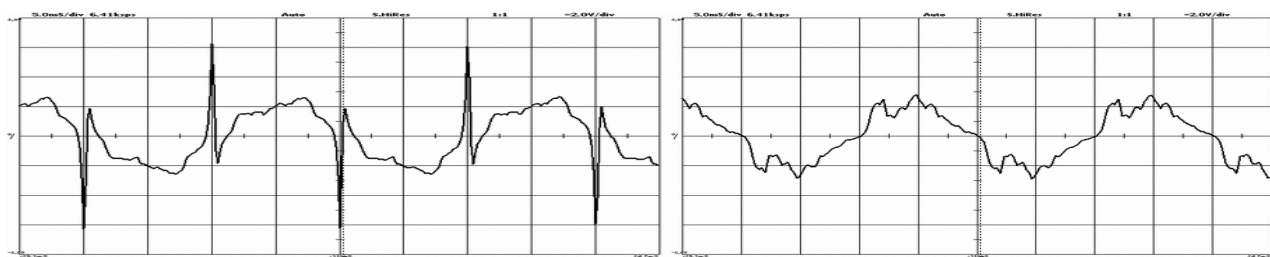


Рис. 5 – Осцилограми струму без та з ПФГ для частоти обертання ЧП 50 Гц

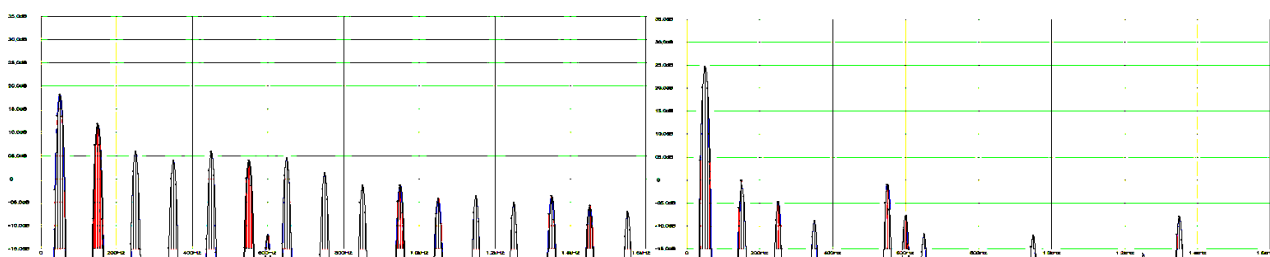


Рис. 6 – Спектри струму без та з ПФГ для частоти обертання ЧП 50 Гц

Аналіз результатів експерименту підтвердив теоретичні положення – наявність непарних високочастотних гармонік в мережі с нелінійним навантаженням [1,2,5]. Кількість розглянутих гармонік складає 15. Окрім осцилограм та спектрів у ході експерименту також були отримані значення коефіцієнтів гармонійних складових напруги та струму для всіх типових режимів роботи підрулюючого пристрою. Цей якісний аналіз електромережі було проведено без та з використанням пасивного фільтру С-типу на всьому діапазоні частоти обертання ЧП (табл. 4 та табл. 5).

Таблиця 4 – Коефіцієнти гармонійної складової напруги без та з ПФГ

№ Гар.	fГ, Гц	Частоти налаштування ПЧ, Гц							
		12.5		25		37.5		50	
		без ПФГ	з ПФГ	без ПФГ	з ПФГ	без ПФГ	з ПФГ	без ПФГ	з ПФГ
1	50	100	100	100	100	100	100	100	100
3	150	29,64	0,62	29,17	1,49	30,02	2,25	31,18	3,14
5	250	10,69	0,69	10,76	0,38	11,34	0,38	11,69	0,94
7	350	8,98	0,97	8,78	1,76	8,35	2,40	8,46	2,61
9	450	4,97	0,45	5,79	0,45	6,01	1,00	5,99	1,74
11	550	4,82	0,90	5,38	1,22	5,67	2,34	5,94	3,51
13	650	3,44	0,40	4,21	0,08	4,34	0,38	4,43	0,08
15	750	3,07	0,19	3,57	0,20	5,12	0,18	3,81	0,33

Для напруги на всьому діапазоні роботи було виконано нормування відносно параметрів напруги мережі в силу малої потужності зібраного фільтру. Завдяки цьому можна побачити ефективне пригнічення вищих гармонік напруги, які генеруються нелінійним навантаженням, використаним в даному експерименті. Як можливо побачити з аналізу таблиці 4, рівень вмісту вищих гармонік напруги при застосуванні ПФГ С-типу відповідає європейському стандарту та стандарту МЕК, а саме менш 5%.

Таблиця 5– Коефіцієнти гармонійної складової струму без та з ПФГ

№ Гар.	fГ, Гц	Частоти налаштування ПЧ, Гц							
		12.5		25		37.5		50	
		без ПФГ	з ПФГ	без ПФГ	з ПФГ	без ПФГ	з ПФГ	без ПФГ	з ПФГ
1	50	100	100	100	100	100	100	100	100
3	150	40,12	0,45	41,19	1,60	36,78	3,88	48,90	5,77
5	250	33,66	3,75	30,48	4,36	25,70	3,51	24,88	3,37
7	350	29,39	2,95	27,86	2,06	22,95	3,20	20,49	1,92
9	450	24,88	0,78	22,86	2,19	22,48	1,47	24,27	0,27
11	550	22,32	1,33	24,64	3,29	19,13	3,43	19,88	5,25
13	650	17,44	2,46	16,31	3,72	16,51	2,49	21,10	0,15
15	750	16,34	2,19	17,26	1,69	12,95	0,66	14,51	0,45

Отриманні результати демонструють ефективність використання пасивного фільтру С-типу, налаштованого на конкретне навантаження. Завдяки фільтру вміст налаштованої гармоніки в середньому зменшується в 7-15 раз в робочому діапазоні частоти обертання ЧП, як по напрузі, так і по струму.

Побудова залежності процентного вмісту третьої гармоніки напруги (рис. 7) та струму (рис. 9) від зміни частоти налаштування ПЧ – демонструє процес збільшення складу 3-ї гармоніки зі збільшенням частоти, як без використання фільтру, так і з його використанням. Однак при використанні ПФГ С-типу характер залежності стає більш лінійним (рис. 8 та рис. 10).

Так, як фільтр С-типу є широкосмуговим, комутація фільтра пригнічує не лише налаштовану гармоніку, а також інші вищі гармоніки, завдяки чому зменшується сумарний THD напруги та струму. В таблиці 6 наведено значення THD напруги та струму при налаштуванні ПЧ на всі режими роботи підрулюючого пристрою.

Таблиця 6 – Значення THD напруги та струму

THD	Частоти налаштування ПЧ, Гц							
	12.5		25		37.5		50	
	без ПФГ	з ПФГ	без ПФГ	з ПФГ	без ПФГ	з ПФГ	без ПФГ	з ПФГ
THDU, %	32.8	1	33	1.6	33.7	3.1	34.8	4
THDI, %	73.95	8.9	71.5	9.85	61.8	9.85	68.15	10.7

Проведені експерименти дозволяють зробити висновки, що з розглянутих вищих гармонік напруги та струму найбільший вміст мають такі непарні вищі гармоніки, як 3-я, 5-а, 7-а. Тому, для підвищення якості електроенергії в системі «автономне джерело – нелінійне навантаження» доцільно використання декількох ПФГ С-типу, налаштованих саме на ці найбільш вагомні гармоніки.

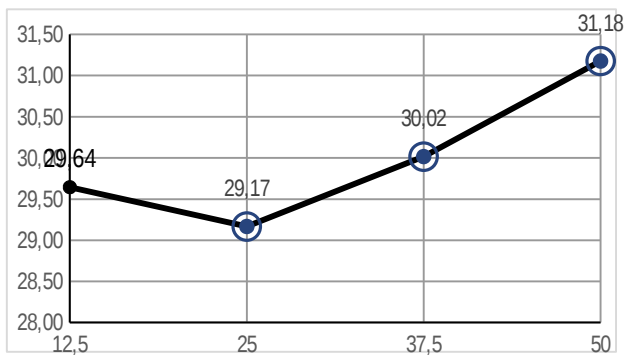


Рис. 7 – Зміна складу 3-ї гармоніки напруги залежно від частоти налаштування ПЧ без ПФГ С-типу

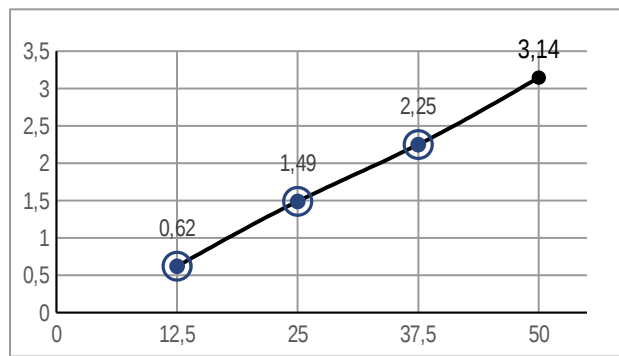


Рис. 8 – Зміна складу 3-ї гармоніки напруги залежно від частоти налаштування ПЧ з використанням ПФГ С-типу

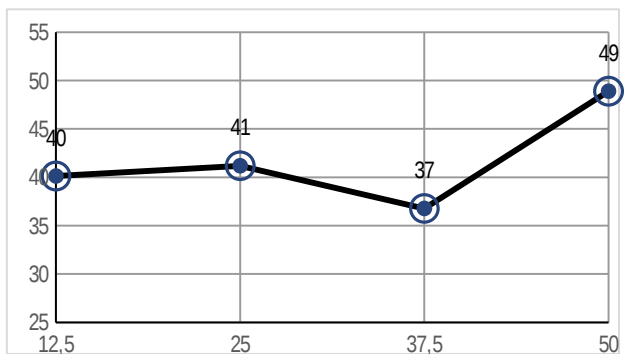


Рис. 9 – Зміна складу 3-ї гармоніки струму залежно від частоти налаштування ПЧ без ПФГ С-типу

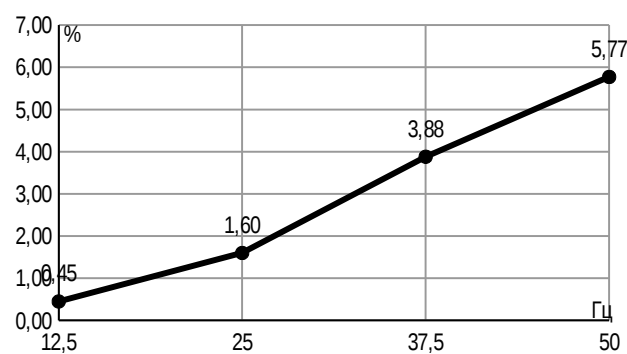


Рис. 10 – Зміна складу 3-ї гармоніки струму залежно від частоти налаштування ПЧ з використанням ПФГ С-типу

Перелік використаної літератури: 1. Arrillaga Дж. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ. [Текст] / Дж. Arrillaga, Д. Бредли, П.Боджер.– М.: Энергоатомиздат, 1990.– 320 с.:ил. 2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. [Текст] – М. : Гардарики, 2002. – 638 с.: ил. 3. Nassif A. D., Xu W., Freitas W. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. – IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1710-1718. 4. Das J. Passive filters – potentialities and limitations. – IEEE trans. on industry applications. Vol. 40, No. 1, January/February, 2004, pp. 232-241. 5. Дранкова А. О. Підвищення якості електроенергії суднової високовольтної мережі з нелінійним навантаженням [Текст] / Дранкова А. О., Шестака А.І., Красовський І.І. // Матеріали науково-методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки» 29.11.2016 – 30.11.2016 – Одеса: НУ «ОМА». – 2017. – С. 68-75. 6. Дранкова А. О. Способи підвищення якості електроенергії в автономних енергетичних системах [Текст] / Дранкова А. О., Красовський І.І.// Матеріали науково-методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки» 15.12.2015 – 16.12.2015 – Одеса: НУ «ОМА». – 2016. – С. 45-48.

Bibliography (transliterated): 1. Arrillaga Dzh., Bredli D., Bodzher P. Garmoniki v elektricheskikh sistemah [Power System Harmonics], (1990), *Energoatomizdat*, Moscow, pp. 320 (In Russian). 2. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie cipi. [Theory of Electrical Engineering. Electric Circuits], (2002), *Gardariki Publ.*, Moscow, pp. 638 (In Russian). 3. Nassif A. D., Xu W., Freitas W. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. – IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1710-1718. 4. Das J. Passive filters – potentialities and limitations. – IEEE trans. on industry applications. Vol. 40, No. 1, January/February, 2004, pp. 232-241. 5. Drankova A.O., Shestaka A.I., Krasovskiy I.I. Pidvischenya yakosti elektroenergii sudnovoy visocovoltnoy mrezhki z nelineynim navantazhenyem. [Improve power quality of ship's high-voltage network with a nonlinear load], (2017), *NU «OMA» Publ.*, Odessa, pp.68-75, (In Ukrainian). 6. Drankova A.O., Krasovskiy I.I. Sposobi pidvischenya yakosti elektroenergii v avtonomnih energetichnih sistemah. [Ways of improving the quality of electricity in autonomous power system], (2016), *NU «OMA» Publ.*, Odessa, pp.45-48, (In Ukrainian).

Отримано 03.07.2017