

**ВЪРХУ ЕДНА ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ ЕКСПЛОАТАЦИОННИТЕ
ВЪЗМОЖНОСТИ НА СИЛОВИ ФИЛТРИ НА ВИСШИ ХАРМОНИЦИ В
ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИТЕ СИСТЕМИ**

Борислав Б. Цветанов*, Гинко А. Георгиев**

*Технически университет – Варна

**Бургаски свободен университет

**ON AN OPPORTUNITY TO IMPROVE THE OPERATIONAL CAPABILITIES OF POWER
FILTERS OF HIGHER HARMONICS IN POWER SUPPLY SYSTEMS**

Borislav B. Tzvetanov*, Ginko A. Georgiev**

*Technical University – Varna

**Burgas Free University

Abstract: In this publication, issues related to the possibility of improving the operational capabilities of power filters of higher harmonics in power supply systems are considered. For this purpose, the operation of power resonance filters with an active addition of correcting voltage pulses was investigated. The results of the operation of filters were evaluated by means of THDi

Keywords: power supply, power filters, higher harmonics

Въведение

Както в световен мащаб, така и в нашата страна съществува тенденция към все по-голямо използване на нелинейните в електрическо отношение потребители, поради редица технико-икономически съображения. Тук спадат както управляеми, така и неуправляеми и правители, различни видове честото преобразуватели и др. Това стана възможно благодарение на бързото развитие и внедряване на силовата полупроводникова техника за захранване и управление на силовото електрообзавеждане на технологични процеси в индустриалните предприятия и фирми. Наличието на такъв вид потребители, особено съизмерими по мощност със захранващите електроенергийни източници на електроснабдителните системи, внасят смущения при тяхната експлоатация. Това се изразява в деформиране формата на кривата на електрическите величини ток и напрежение. Тези въздействия върху електроснабдителните системи се разглеждат като смущаващи влияния в тях. В електроснабдителните системи (ЕСС) и в електрическите потребители се появяват висши хармоници, които циркулират в цялата система.

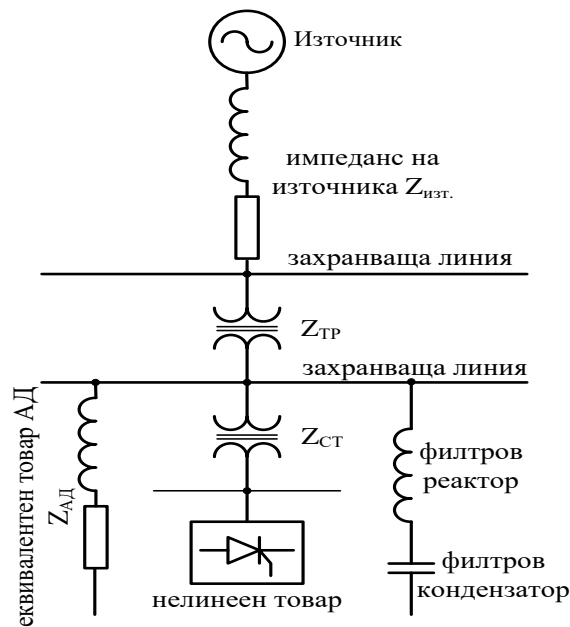
За допустимите деформации в кривите на тока и напрежението вследствие на висшите хармоници в тях, са въведени задължителни изисквания за тяхната допустима големина на база утвърдени национални и международни стандарти. Тук трябва да се има предвид

стандартите на международната електротехническа комисия IEC 1000-3-2, IEC 1000-3-4 и EN 61000-3-4,

За ограничаване на висшите хармоници в ЕСС се прилагат разнообразни технически и организационни решения [1,2,3,4]. Към техническите средства могат да се причислят използването на многоамотъчни трансформатори (обикновено тринамотъчни), на индуктивни съпротивления в променливо токовата част на системата, използване на полупроводникови преобразуватели с подобрена комутация, електрически филтри за висши хармоници и др. Особено широко приложение за ограничаване на висшите хармоници в ЕСС са получили електрическите филтри. Към тях спадат резонансните филтри, като типични представители на класическите подходи за решаване на проблемите с висшите хармоници. Едни от най-съвременните технически решения за борба с висшите хармоници в ЕСС се явяват силовите активни филтри. И първите и вторите обаче не са лишени от недостатъци, което води до търсене на нови технически решения, които да се отличават с високи технико-икономически показатели.

“LC” резонансните филтри се явяват класически средства за ограничаване нивата на висшите хармоници в ЕСС. Висшите хармоници с порядък $\nu = 5, 7, 11$ и 13 -ти, са хармоници с най-голямо негативно енергетично въздействие в системата. Ето защо “LC”- филтрите като резонансни такива се прилагат предимно за въздействие поотделно върху всеки един от горепосочените хармоници. Тези филтри спадат към пасивните филтри.

Филтрите обикновено се поставят на места в съответствие с фиг.1 т.е. в непосредствена близост до източника на висши хармоници за да филтрират тази част от хармониците за които са настроени.



Фиг. 1

Най често използвания филтър е срязващият RLC филтър за една честота. Импеданса Z на такъв филтър се определя от:

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (1)$$

$$\text{където: } X_L = \omega L \quad X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (2)$$

при което: L и C –представяват индуктивността и капацитета на реактивните елементи на филтъра

R – се формира като сумарното активно съпротивление от индуктивността и активното съпротивление на кондензатора, породено от тангенс делта в него.

ω – представлява кръговата честота на мрежата

Качествения фактор Q на филтъра се явява един от основните критерии за определяне на неговата филтриращата ефективност. Той се определя от съотношението:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{X_L}{R} \quad (3)$$

Типични стойности на Q за промишлените филтри са 30÷50 за 50Hz. Серийния резонансен кръг понижава импеданса си в точката където при една определена честота импеданса на индуктивността и кондензатора са равни. Серийния резонансен кръг е настроен за определена честота $\omega_{рез.}$ когато :

$$X_L = X_C \quad (4)$$

или : $\omega_{рез} = 1 / \sqrt{LC}$.

За резонансната честота импеданса на филтъра е равен на активното съпротивление т.е. $Z=R$.

Когато част от кондензаторните батерии в отделните филтри аварират е възможно усилване на генерираните хармоници. Тогава новата резонансна честота на филтъра е висока и е възможно вместо той да подтиска, да усилва хармоника за който е настроен (да влезе в антирезонанс). Поради тази причина изчисляването на филтрите се извършва за честоти около 4% по-ниска от резонансната, а именно:

$$\begin{aligned} f_5 &= 240 \text{ Hz} \\ f_7 &= 336 \text{ Hz} \\ f_{11} &= 528 \text{ Hz} \\ f_{13} &= 625 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (5)$$

Върху филтриращите способности на пасивните резонансни филтри освен отклоненията в честотата на мрежата, съществено влияние оказват и отклоненията в параметрите на самите филтриращи елементи. Те могат да се породят вследствие изменението на температурата на околната среда в която работят, стареене на изолацията им и др. странични причини. Тези фактори на практика намаляват ефективността на филтрирането на висшите хармоници в ЕСС. Трябва обаче да се отбележи, че тези пасивни резонансни филтри имат и положителни страни. В ценово отношение и като влагана инвестиция за решаване проблемите с висшите хармоници те се явяват едни от най-икономичните решения в тази насока.

Постиженията в областта на силовата електроника способстваха за създаването на нов клас силови електронни устройства - активни силови филтри (АСФ) – active power filters (APF). Трябва да се направи уточнение, че тези устройства не са само филтри, както би следвало да се очаква от названието им. Те могат да изпълняват и други допълнителни функции, като симетриране на товара, компенсирание на фактора на мощността му и др.

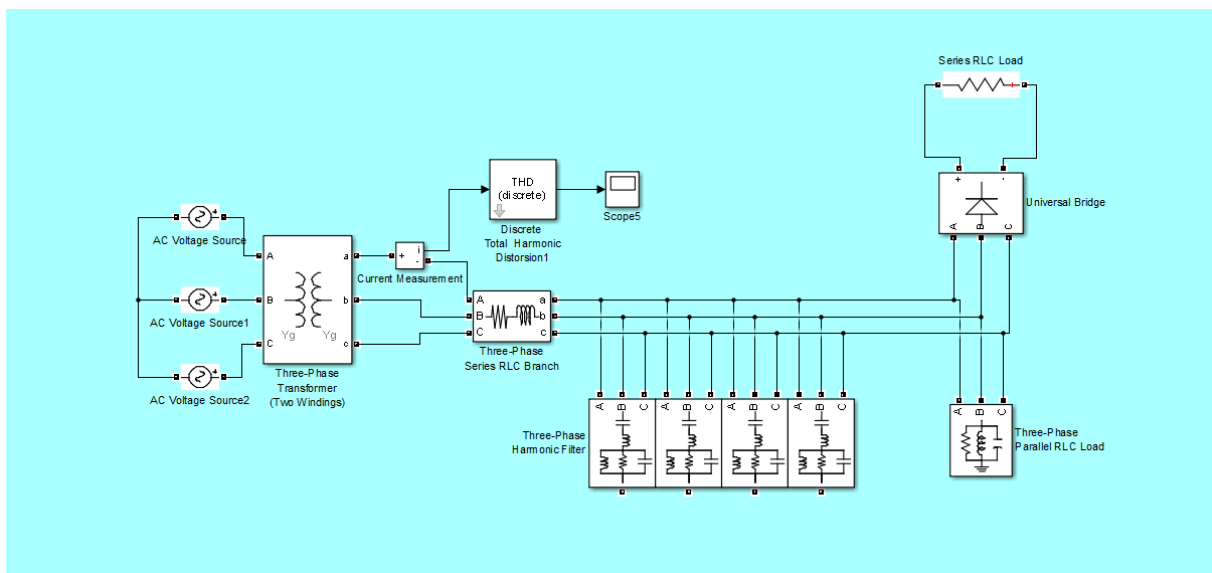
Независимо от техните превъзходни технически възможности в сравнение с класическите пасивни резонансни филтри, както може да се очаква, активните филтри са многократно по-скъпи като инвестиция влагана за решаване на проблемите с висшите хармоници. Ето защо тяхното приложение в ЕСС трябва да се прецизира от гледна точка на технико-икономическата им целесъобразност за всеки конкретен случай на приложение.

Изследване и експериментални резултати

През последните години активно се работи от страна на научните и инженерно-технически специалисти за намиране на решения, които в сравнение с по-горе анализирани те възможности за решаване на проблемите с висшите хармоници притежават високи технически показатели, но са реализуеми на много по-ниска себестойност. Сместът на търсените нови решения се състои в намиране на съчетание между ниска инвестиция, която се влага в пасивните резонансни филтри и присъединяване на активни коригиращи елементи към тях, с цел постигане на високи функционални технически показатели. Тези активни коригиращи елементи в мощностно отношение са на порядък с по-маломощни в сравнение със силовите активни филтри. Търсят се решения за филтриране на висшите хармоници с устройства удовлетворяващи стандартните нормативни изисквания, но на много по-ниска цена отколкото са АСФ.

Принципа на който работят пасивните резонансни филтри при тяхната настройка почива на даване на късо веригата на филтъра за даден хармоник и той не се допуска в системата. В такъв случай единственото съпротивление което ограничава тока на късо съединение на филтрирания ток е активното съпротивление на филтъра R . Ето защо филтриращите способности на пасивните резонансни филтри зависят от качествения фактор Q , тъй като той при равни реактивни елементи на филтъра е обратно пропорционален на активното му съпротивление R . В случая големината на R на практика ограничава при резонанса даването на късо тока на съответния висш хармоник. Върху това активно съпротивление при протичането на филтрирания ток се създава пад на напрежение, което ограничава процеса на „чистото“ късо съединение в резонансния контур на филтъра. За да се постигнат резултати близки до „чисто“ късо съединение е необходимо компенсиране на този пад на напрежение върху приведеното активно съпротивление R . Това може да се постигне посредством инжектиране на външен напрежен сигнал с форма и честота, такъв какъвто е пада на напрежението върху R , но с обратна фаза. Така се компенсира напрежението върху R и може да се постигне процес близък до „чисто“ късо съединение за дадения хармоник във филтъра. Този пад се компенсира от външен източник, който се генерира от активен елемент.

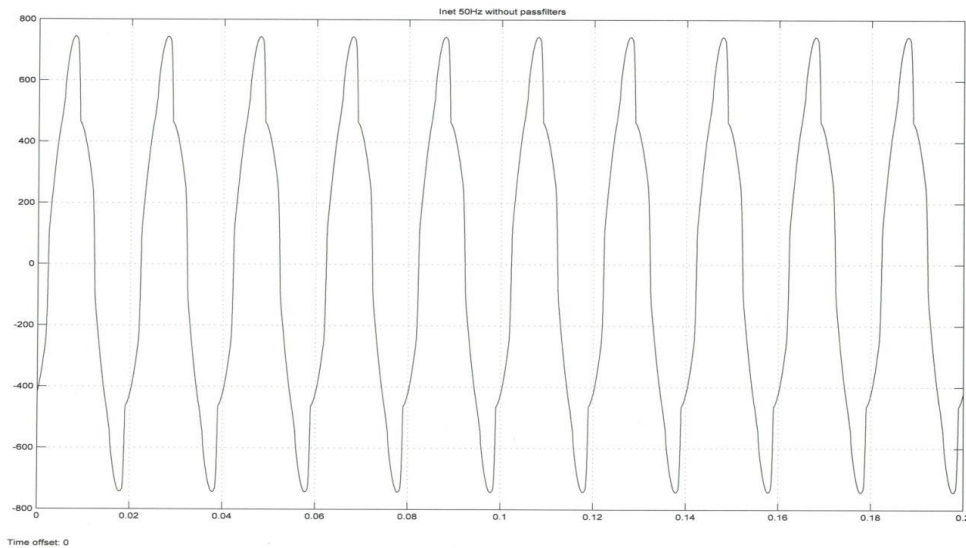
За работоспособността на пасивни резонансни филтри, без и с последователно включени активни елементи към тях е симулационно изследвано с инженерно ориентирана пакет програма „Matlab Simuling [5], за едно цехово електроснабдяване. Конфигурацията на силовите елементи с включени пасивни резонансни филтри за филтриране на висшите хармоници е показана на фиг.1..



Фиг. 1

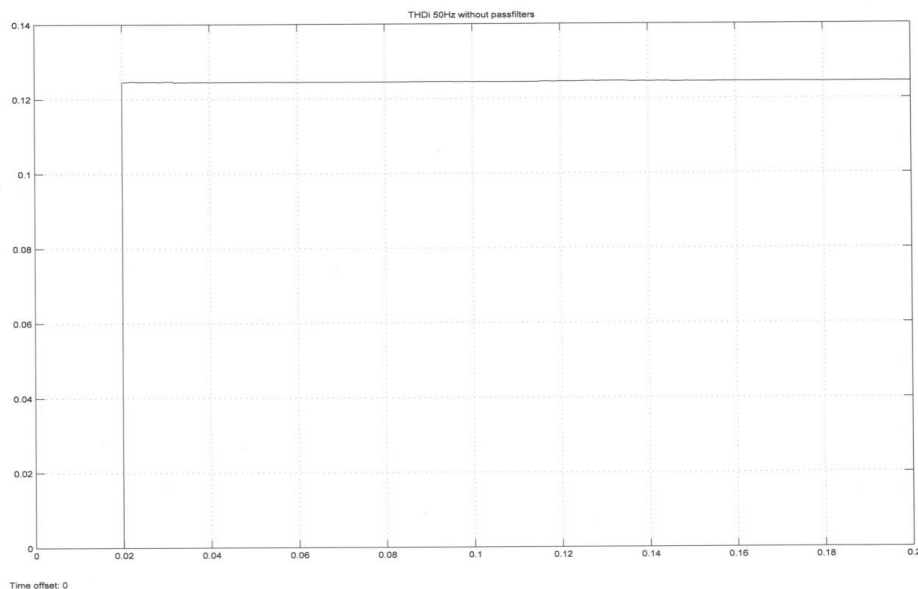
Захранващ източник в разглежданото цехово електроснабдяване представлява силов трансформатор с параметри : мощност 400KVA, $U=3 \times 380 \text{ V}$ и $u_k= 5.5\%$. Електрическото натоварване се осъществява с нелинеен товар (мостов трифазен изправител) с мощност $P= 150\text{KW}$ и линеен еквивалентен товар с компоненти на пълната мощност ; $P= 100\text{KW}$ и $Q = 200\text{KVAr}$. За ограничаване (потискане) на висшите хармоници генерирани от нелинейния товар са включени резонансни LC филтри, предназначени за филтриране на 5,7,11 и 13 – хармоници, имащи най-голямо енергетично значение от всички висши генерирани хармоници. Резонансните филтри са оразмерени за качествен фактор $Q= 30$. Общата мощност на кондензаторните елементи на филтрите осигуряват компенсация на косинус фи на товара до 0.96 в системата, при номинална честота на мрежата 50Hz.

На фиг.2 са показани резултати получени от изследване проведено върху избрания силов модел, без включени резонансни филтри.



Фиг.2 а)

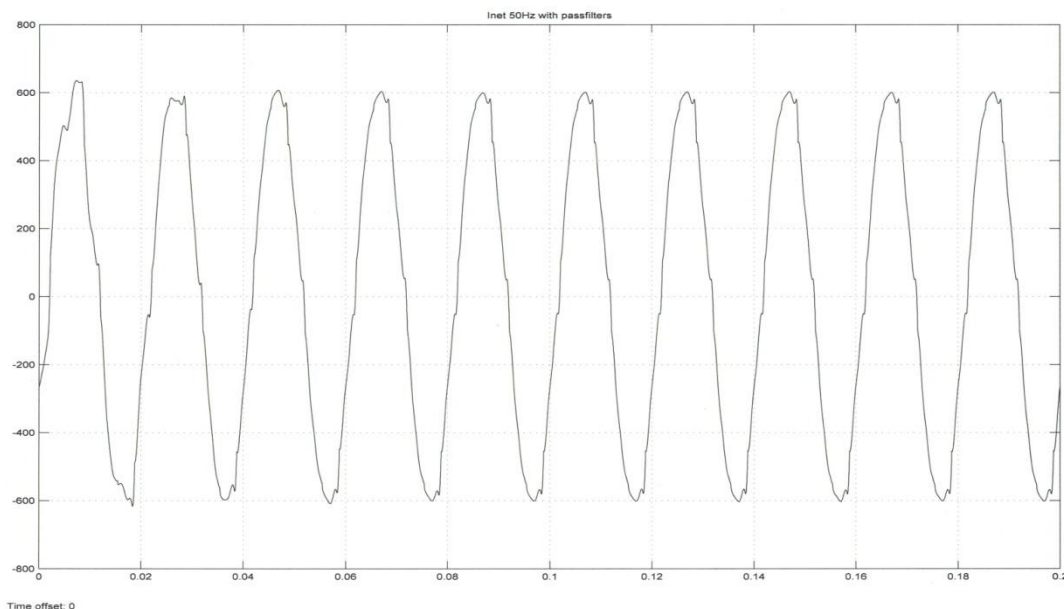
На фиг.2 а) е показана формата на кривата на тока през захранващия енергиен източник. Вижда се, че той е деформиран от съдържащите се в него висши хармоници.



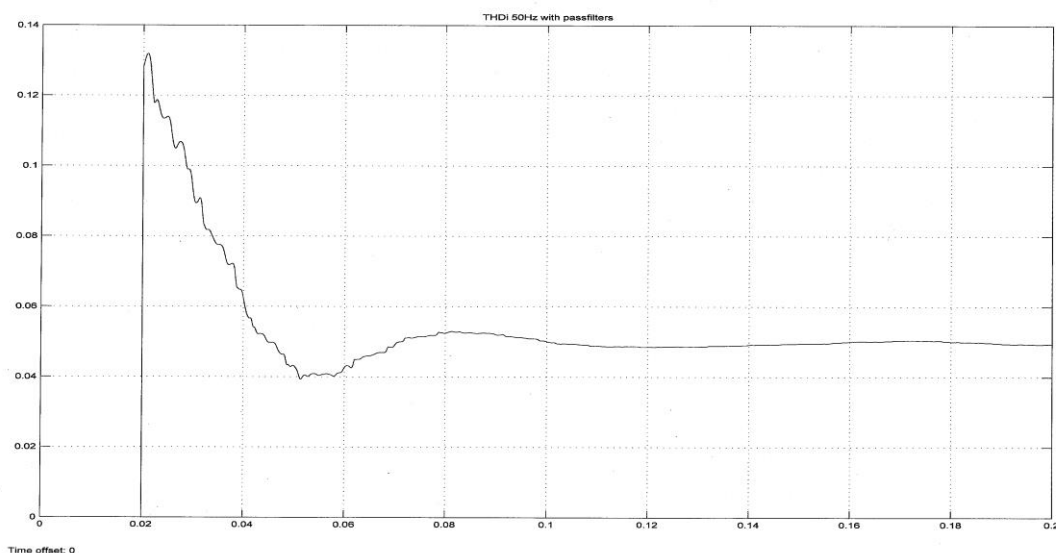
Фиг. 2б)

Изкривяването на тока е оценено посредством THD_i представляващ коефициент на несинусоидалност за тока, представен на фиг.2 б). Получените резултати показват за периода на изследването, че стойността му е равна на 12.5%, която превишава нормативната такава от 5%. Този резултат показва необходимост от използване на филтри за ограничаване състава на висшите хармоници в тока.

На фиг.3 са отчетени резултати от проведеното изследване на силовия модел при включени резонансни филтри. Работната честота на електроенергийната система е 50Hz.



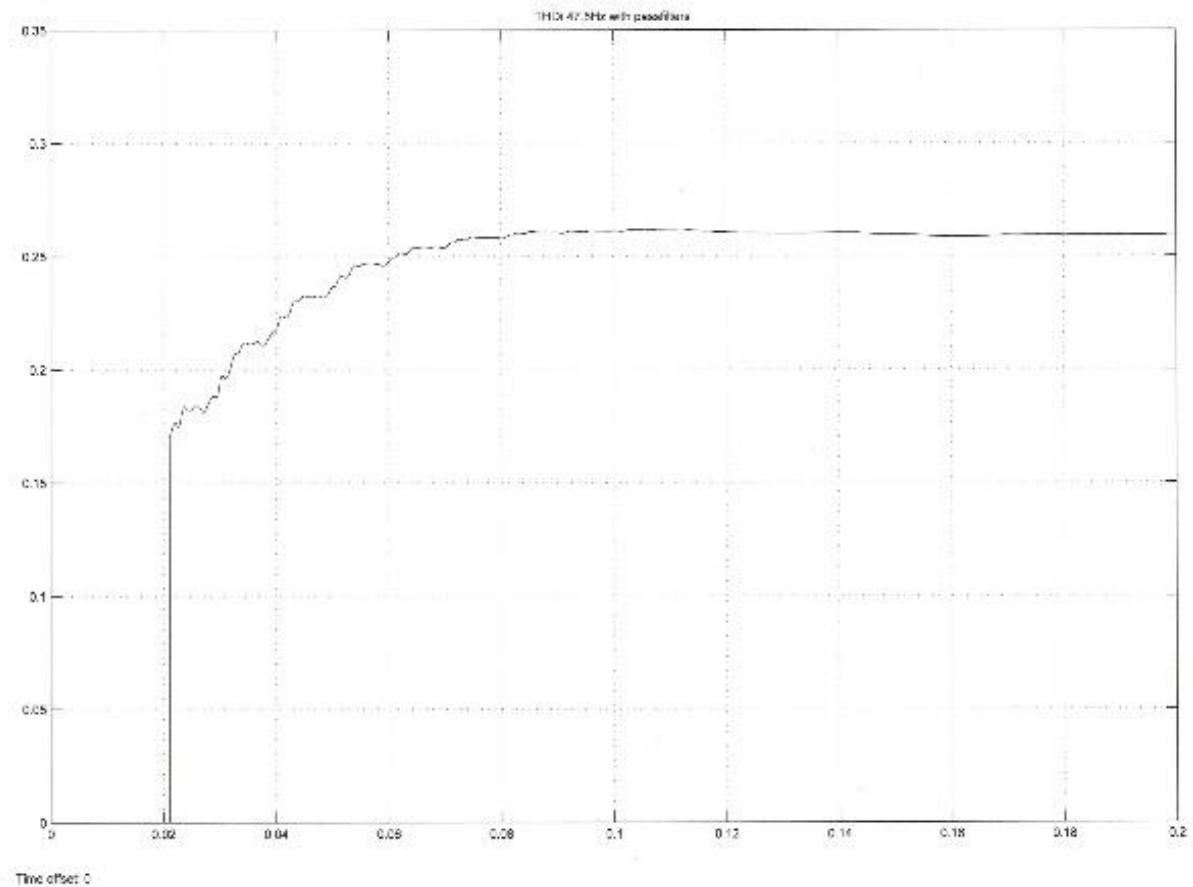
Фиг. 3а)



Фиг. 3б)

На фиг.3а) е показан филтриран фазов ток в цеховата електроенергийна система след включване на резонансните филтри. От фигурата се вижда, че той е с незначителна деформация по отношение на синусоидалната му форма. Големината на тези изкривявания са отчетени с THD_i за времето на изследването, както това е показано на фиг.3б). Стойността му след установяване на преходния процес от включване на резонансните филтри възлиза на $\text{THD}_i = 4.73\%$. Тази стойност е по-малка от нормативно установената 5%. Следователно

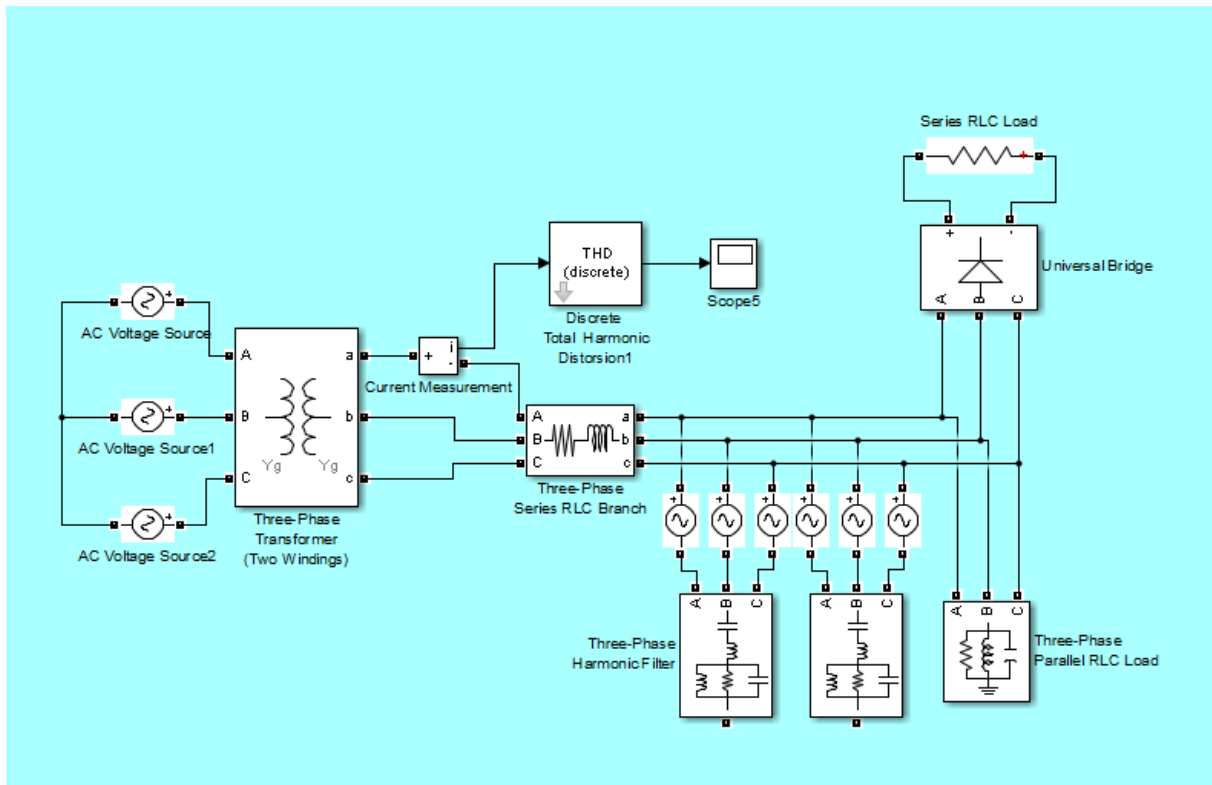
резонансният филтър е добре оразмерен и изпълнява своето функционално предназначение при тази честота. В случаите на промяна параметрите на пасивните резонансни филтри вследствие на температурни въздействия, стареене на изолацията и други причини, което като краен резултат води до влошаване на качествения фактор на филтрите например до $Q=18$ са отразени на фиг.4



фиг.4.

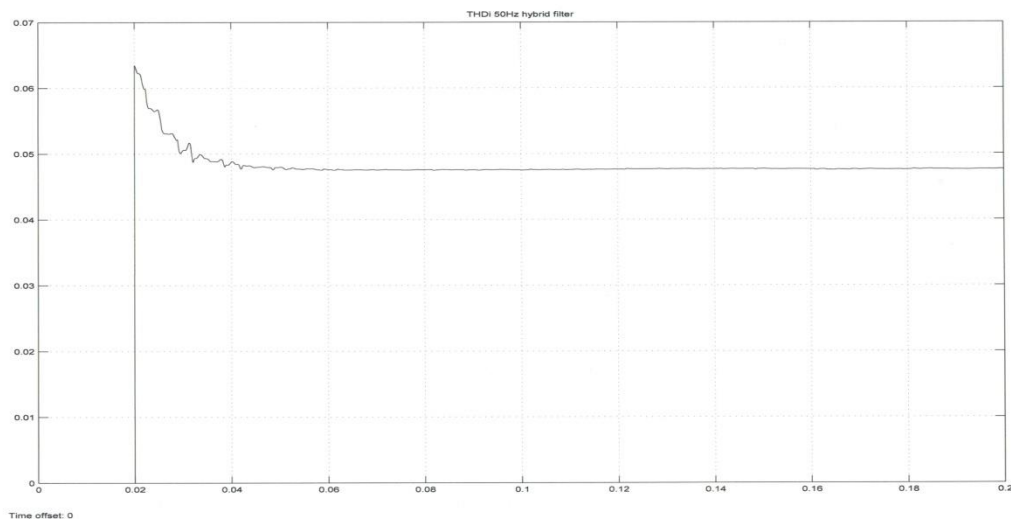
От получения резултат показан на фиг4. се вижда че големината на $THDi=26\%$. В този случай резонансните филтри са функционално непригодни.

В публикацията са представени също и резултати от проведено изследване свързано с използване на пасивни резонансни филтри, но с последователно включени активни коригиращи елементи в тях. Изследването е проведено на базовия силов модел на цеховото електроснабдяване показана на фиг.5. От страна на пасивните резонансни филтри участват (LC) елементи само за 5-тия и 7-мия хармоници.



Фиг. 5

На фиг. 6 е поместен резултат за THDi получен от изследването на базисния силов модел с присъединени пасивни резонансни филтри с включени активни коригиращи елементи към тях.



фиг. 6

Резултатите от функционирането на филтрите с включени активни коригиращи елементи са оценени с помощта на заснетото THDi, като стойността на този коефициент възлиза на 4.82%. Това е под границата на нормативната стандартна стойност, което показва функционалната годност на приложеното решение за филтриране на висшите хармоници. Тези резултати се постигнати с въздействие от страна на активните елементи на филтрите за 5-ти и 7-ми хармоници с напрежение съответно 7 V и 5 V. Извършен е експеримент на разработен

физически модел с данни на включените елементи с мащабирано намалени стойности по отношение на проведеното симулационно изследване. Работоспособността на пасивните резонансни филтри с включени активни коригиращи елементи за 5 и 7 хармоници са оценени посредством заснети ходографи на изобразяващите вектори на потребявания ток в системата, без и с включени филтри с активни коригиращи елементи. Тъй като ходографите на изобразяващите вектори на заснетите токове се формират от техните моментни стойности протичащи в системата, същите носят пълна и обзрима информация за изменението на тези стойности без и с филтриране на висшите хармоници. На фиг.7 е отразен ходографа на изобразяващия вектор без филтриране на висшите хармоници. От получения резултат за изобразяващия вектор се вижда, че той е силно деформиран от комутационните процеси протичащи в нелинейният товар-мостов изправител на изхода на който е присъединен чисто активен товар. Деформациите във формата на ходографа на този изобразяващ вектор се държат на присъствието на безкрайния ред от висши хармоници, които се генерират в ЕСС. На фиг.8 е показан получен ходографа на изобразяващия вектор при филтрирани висши хармоници с пасивни резонансни филтри настроени за 5 и 7 хармоник с включени активни коригиращи елементи.



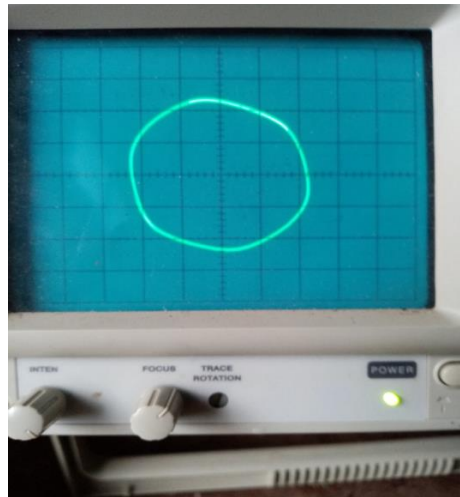
Фиг.7



фиг.8

От получената осцилограма за ходографа на изобразяващия вектор на тока с проведено филтриране на основните енергозначими 5 и 7 хармоници се вижда, че големи деформации в описания ходограф на тока отсъстват. В този случай формата на фазовите токове от които е формиран изобразяващия вектор се приближават до синусоидалната такава.

На фиг.9 е показан за сравнение ходограф на изобразяващ вектор на тока при пълно отсъствие на висши хармоници в системата.



Фиг.9

Изводи

От изложения в тази публикация материал може да се направи следното обобщение :

1. Показана е съществуваща възможност за повишаване ефективността при използване на пасивни резонансни филтри за филтриране на генерирани висши хармоници в ЕСС посредством добавяне към тях на активни коригиращи елементи.

2. С реализиране на такива комбинирани филтри с импулсна коригираща напреженова добавка се постига повишаване качествения фактор на филтрите като цяло. По този начин се постига потискане на висшите хармоници със значимо енергетично въздействие , като се използват само два филтъра за 5 и 7 хармоник. С направеният експеримент се достигна стойност за THD_i в рамките на нормирания от стандарта.

3. Реализирането на такива комбинирани филтри, те ще се характеризират с високи технико-икономически показатели.

Литература :

1. Чиков В.Ч „Електромагнитна съвместимост в индустриалните предприятия“ ТУ-Варна 2016 г.
2. Георгиев Г. А. „Изследване на възможността за въздействие върху електроенергийната ефективност в корабни условия “- ВВМУ “Н.Й.Вапцаров” – Варна ,2010 г.
3. De La Rosa F. “Harmonics and power system ” ISBN 0-8493-3016-5 2006 y.
4. Emadi A.,Nassiri A.,Bekiarov S. “Uninterruptible power supplies and active filters” ISBN 0-8493-3035-1 2005y
5. Kubka L , Janicek J. “Matlab & Simulink – resene priklady” –SOS a SOU Lanskroutn - 2007
- 6.Kamen Seymenliyski, Silviya Letskovska, Radoslav Simionov, Eldar Zaerov, Electrical Equipment Impact On The Environment And Quantity Factor Measurement, ICTRS '18, October 8–9, 2018, Barcelona, Spain ISBN: 978-1-4503-6580-2, <https://doi.org/10.1145/3278161.3278168>, Proceedings of the Seventh International Conference on Telecommunications and Remote Sensing, p. 41-44
- 7.K. Seymenliyski, Silviya Letskovska, Radoslav Simionov, Eldar Zaerov, Modern technological solutions in electricity supply, Годишник БСУ, 2018, с. 78 – 83, ISSN: 1311-221-X, Печатница „ЕКС-ПРЕС“ ООД
8. Камен Сейменлийски, Силвия Лецковска, Интелигентни решения в енергийните и ресурсни мрежи, Бургаски свободен университет, 2021, ISBN 978-619-253-011-2, 242 с.