

РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ ТРАНСФОРМАТОРИ ЗА ФОТОВОЛТАИЧНИ ЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ

Радослав Спасов, Пламен Ризов, Виктор Захариев, Цветомир Стоянов

Резюме: В следния доклад е разгледано влиянието върху работата на повишаващ трансформатор в разпределителни мрежи с фотоволтаични електроцентрали в зависимост от хармоничният състав на захранващото напрежение. Стандартите дефинират степента на Тоталното Хармонично Изкривяване (THD) на напрежението и тока в разпределителните мрежи. Изчислението на THD е извършено чрез моделирането на изходното напрежение на трансформатора с помощта на софтуерния продукт "Femm", както и с допълнителни програмни модули в софтуерната среда на MatLab и Excel за генериране на входящите токове и напрежения спрямо стандарта. Получените стойности на THD се анализират и се сравняват с предварително определени стандарти.

Ключови думи: Метод с крайни елементи (МКЕ), Разпределителни трансформатори, Фотоволтаична централа (ФВЦ), Тотално хармонично изкривяване (THD).

DISTRIBUTING TRANSFORMER FOR PHOTOVOLTAIC POWER STATIONS

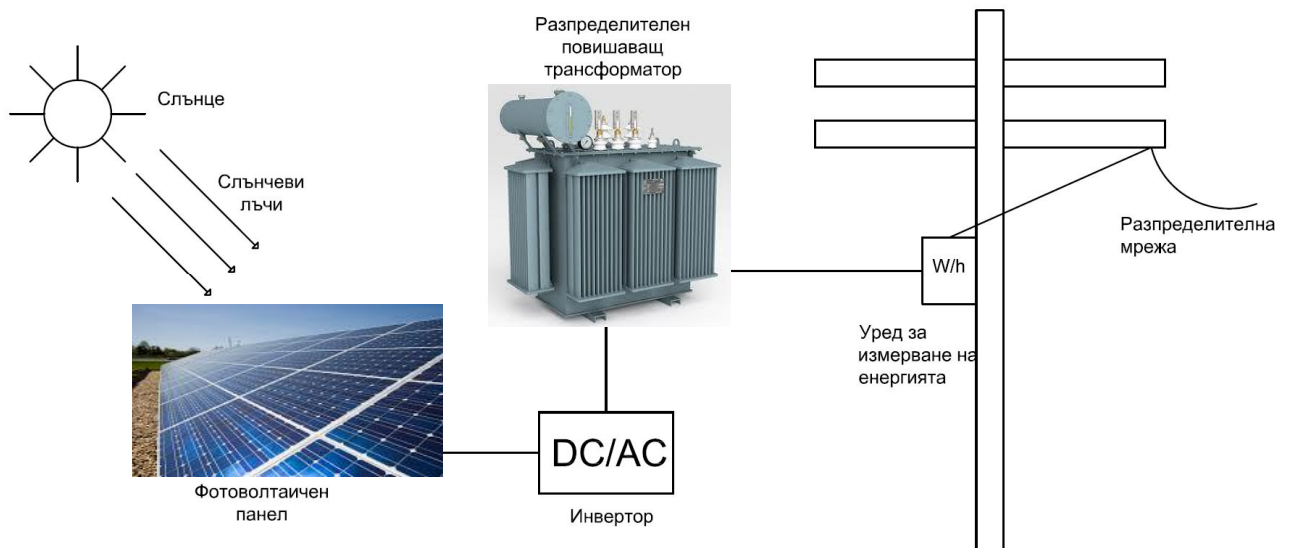
Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Victor Zahariev, Tsvetomir Stoyanov

Abstract: The report analyses the effect on the work of a power transformer working in the distributive systems of a photovoltaic power stations in accordance to the harmonics present in the voltage supplied to it. The standards define the degree of Total Harmonic Distortion (THD) of the voltage and current in the distributional system. The calculation of the Total Harmonic Distortion is made through modulating the output voltage of the transformer with the help of the software product "FEMM", and with additional program modules in the software products MatLab and Excel, for the generation of the input currents and voltages in accordance to the standards. The generated values are analyzed and the THD values are compared to previously determined values from previous given standard values.

Key Words: Finite Element Method (FEM), Distribution Transformers, Photovoltaic Power stations (PV-systems), Total Harmonic Distortion (THD).

1. Въведение

Разгледан е разпределителен трансформатор за работа в фотоволтаични електроцентрали. Специфичните изисквания към тези трансформатори са свързани със съвместната им работа с инвертори, които в зависимост от техните качества генерират напрежение с различен хармоничен състав. Наличието на хармоници в захранващото напрежение (респективно в токовете) води до увеличаване на загубите в трансформатора, а от друга страна хармониците в изходното напрежение на трансформатора влошават качествените характеристики на подаваната електроенергия към разпределителната мрежа. Трансформаторът посредством намотките си високо напрежение е свързан към енергийната разпределителната мрежа, а първичната намотка е захранена с напрежение генерирано от инверторна група, която от своя страна е захранена от преобразователните панели на фотоволтаична електроцентрала. Цялостната принципна схема на свързването на разпределителния трансформатор е показана на фиг. 1.



Фиг.1 Принципна схема на свързването на разпределителния трансформатор.

Предмет на изследване е конструкцията на намотките на разпределителен трансформатор, която би подобрила качеството на изходното напрежение. За да се елиминира влиянието на конструкцията на магнитопровада и насищането му сме избрали мантиен трансформатор с линейна магнитна характеристика на стоманата използвана за направата на магнитопровада. При така избраната конструкция на трансформатора може да се заобиколят недостатъците на ядрения трансформатор и да се разглежда само влиянието на конструкцията на намотките върху изходното напрежение при зададени токови плътности на първичната намотка с различен хармоничен състав. Създаден е модел на трифазен мантиен трансформатор в FEEM, в който токовите плътности въвеждани в намотките са изчислени да отговарят на определени стойности дефинирани от стандарта.

Амплитудните стойности на отделните хармоници, използвани за определяне и генериране на различните входни стойности на хармоничния състав е изобразена на Таблица 1 и е взета от стандарт IEEE 519-92 ("Recommended Practices and Requirements

for Harmonic Control in Electric Power Systems”). В таблицата от стандарта са зададени определени стойности на THD при различните к-фактори. Тоталното хармонично изкривяване за тока, респективно за токовата плътност, се изчислява по следната формула (1).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1)$$

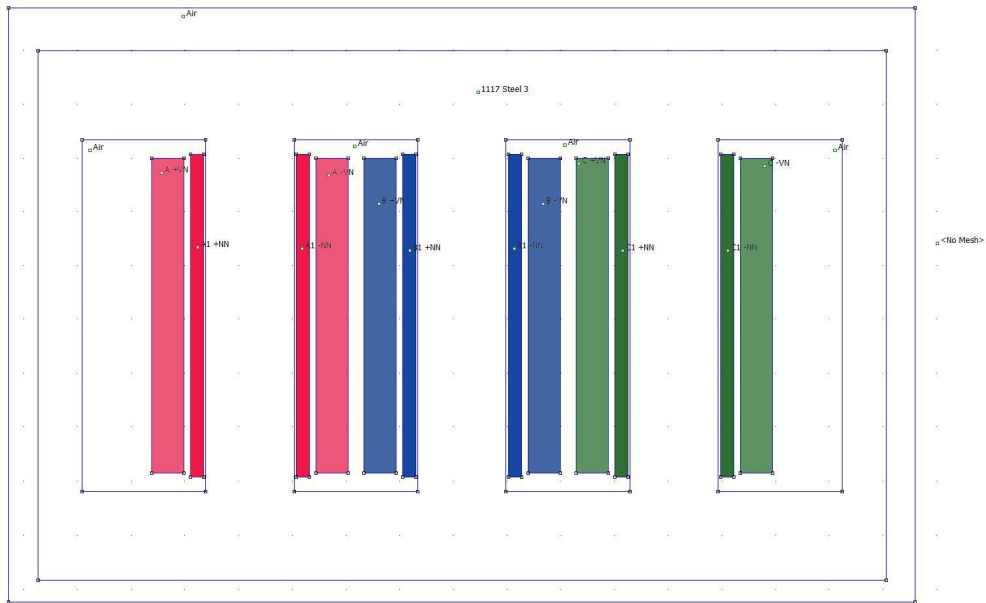
THD	0.136	0.194	0.241	0.281	0.35	0.413	0.443	0.472	0.501	0.529	0.585	0.641	0.727
K-factor UL	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13	15	17	20
Over Rating	1.02	1.04	1.06	1.08	1.12	1.15	1.17	1.19	1.2	1.22	1.25	1.28	1.33
I1	0.991	0.982	0.972	0.963	0.944	0.924	0.914	0.904	0.894	0.884	0.863	0.842	0.809
I3	0.097	0.137	0.168	0.0252	0.238	0.275	0.291	0.307	0.322	0.336	0.363	0.388	0.423
I5	0.058	0.082	0.101	0.117	0.143	0.165	0.175	0.184	0.193	0.202	0.218	0.233	0.254
I7	0.042	0.059	0.072	0.083	0.102	0.118	0.125	0.132	0.138	0.114	0.156	0.166	0.181
I9	0.032	0.046	0.056	0.065	0.079	0.092	0.097	0.102	0.107	0.112	0.121	0.129	0.141
I11	0.026	0.037	0.046	0.053	0.065	0.075	0.079	0.084	0.088	0.092	0.099	0.106	0.115
I13	0.022	0.032	0.039	0.045	0.055	0.063	0.067	0.071	0.074	0.078	0.084	0.09	0.098
I15	0.019	0.027	0.034	0.039	0.048	0.055	0.058	0.061	0.064	0.067	0.073	0.078	0.085
I17	0.017	0.024	0.03	0.034	0.042	0.048	0.051	0.054	0.057	0.059	0.064	0.069	0.075
I19	0.015	0.022	0.027	0.031	0.038	0.043	0.046	0.048	0.051	0.053	0.057	0.061	0.067
I21	0.014	0.02	0.024	0.028	0.034	0.039	0.042	0.044	0.046	0.048	0.052	0.055	0.06
I23	0.013	0.018	0.022	0.025	0.031	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.047	0.051	0.055
I25	0.012	0.016	0.02	0.023	0.029	0.33	0.035	0.037	0.039	0.04	0.044	0.047	0.051

Таблица.1. Таблица на стойностите на хармоничните изкривявания и амплитуди спрямо основния хармоник, К-фактор и THD

В изследването се разглеждат два вида конструкции на намотки ниско напрежение. Първият вид е стандартна цилиндрична двуслойна намотка с разположение върху ядрото показана на фиг.2, а вторият вид е модифицирана намотка тип зиг-заг, при която всяка фазна намотка се състои от три равни части и разположена по ядрата, така че да имат магнитна и електрическа симетрия (Фиг.3). Двата модела на мантиен трансформатор са с еднаква конструкция на магнитопровода.

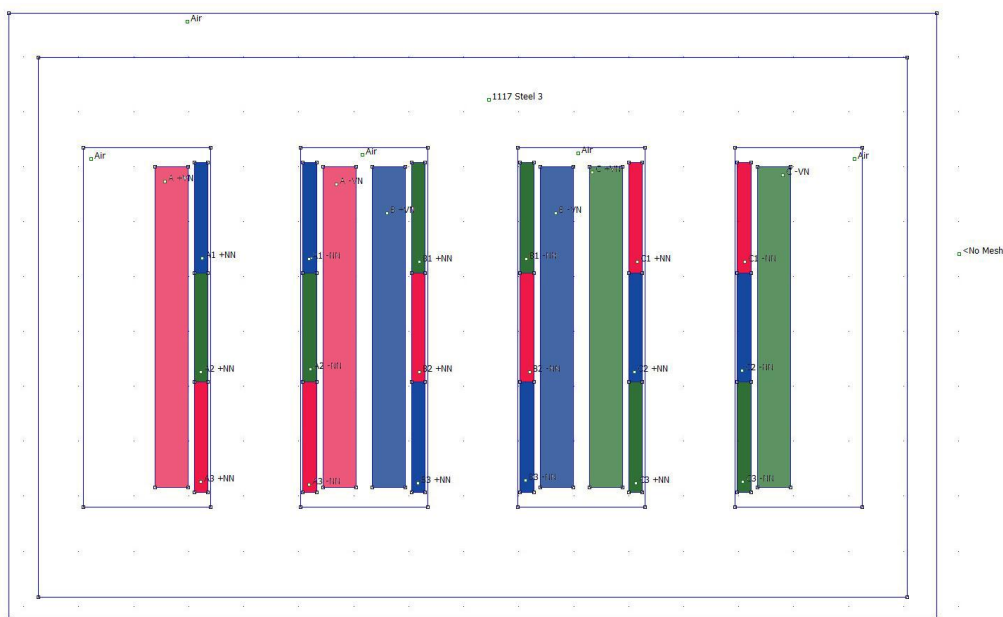
2. Използвани методи за анализ

За генериране на токовите плътности за въвеждани в модела, с различен хармоничният състав (к-фактор), се използва алгоритъм реализиран в Microsoft Excel. Програмата генерира всички токови плътности за намотка ниско напрежение за к-фактор от 2 до 20, със амплитуди на отделните хармоници показани в Таблица 1. За автоматизиране на въвеждането на геометрията на трансформатора са разработени 2D модели в среда AutoCad, които след това се импортират в софтуерната среда FEMM, където се прилага числено моделиране на магнитното поле. Многократните изчисления в FEMM са автоматизирани чрез използване на „lua” скриптове. Получените от FEMM стойности на потокосцепления с помощта на допълнително създадени софтуерни приложения в среда Microsoft Excel се изчисляват електродвижещите напрежения в намотка високо напрежение, както и хармоничният му състав.



- | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------------------------|
|  | - Фаза В -ниско напрежение |  | - Фаза В -високо напрежение |
|  | - Фаза С -ниско напрежение |  | - Фаза С -високо напрежение |
|  | - Фаза А -ниско напрежение |  | - Фаза А -високо напрежение |

Фиг.2. Модел в FEMM на мантиен трансформатор със стандартно разположение на намотка ниско напрежение с разпределение на отделните фази по ядрата.



- | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------------------------|
|  | - Фаза В -ниско напрежение |  | - Фаза В -високо напрежение |
|  | - Фаза С -ниско напрежение |  | - Фаза С -високо напрежение |
|  | - Фаза А -ниско напрежение |  | - Фаза А -високо напрежение |

Фиг.3. Модел в FEMM на мантиен трансформатор със разделена намотка ниско напрежение с разпределение на отделните фази по ядрата.

3. Алгоритъм на работа

Алгоритъма за изследване се състои от следните стъпки:

1. Генериране на крива на токовете плътности в относителни единици за избрания к-фактор. За един период /0.02s/ се изчисляват относителните стойности на токовете плътности за трите фази, като се приемат различни комбинации на началните фази за отделните хармоници. Чрез Фурие анализ се проверява съответствието на хармоничния състав на генерираната крива спрямо стойностите зададени в табл. 1. Формата на кривата на токовата плътност за фаза А (за к-фактор 5) е показана на фиг. 4 и фиг.5.

2. Изчисляват се токовете плътности за всяка една зона в моделите на изследваните трансформатори. За втория модел всяка една от трите части на намотка ниско напрежение е равна на другите две като площ и е равна на една трета от площта на стандартната намотка. Токовете плътности в трите разпределени по ядрата намотки за всяка фаза са с еднакви по големина стойности но не са с еднакви знаци. При разпределението по ядрата въвежданите токови плътности за всяка една фаза по ядро са показани в табл.2.

Автоматизирано се извършват електромагнитните изчисления в софтуерната среда FEMM и от получените стойности на потокосцепления се изчислява електродвижещото напрежение в намотките високо напрежение. На фиг. 6 е показано магнитното поле за една точка от времето за трансформатор с намотки свързани в звезда / модифициран зиг-заг.

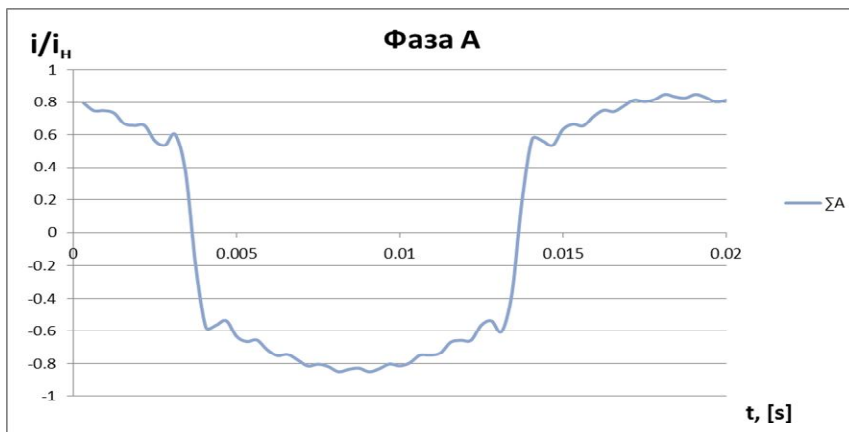
3. Посредством хармоничен анализ на електродвижещите напрежения се оценява ефекта от използване на една или друга конструкция на намотка ниско напрежение.

Намотка №	A1±	A2±	A3±	B1±	B2±	B3±	C1±	C2±	C3±
Токова плътност	JB	-JC	JA	JC	-JA	JB	JA	-JB	JC

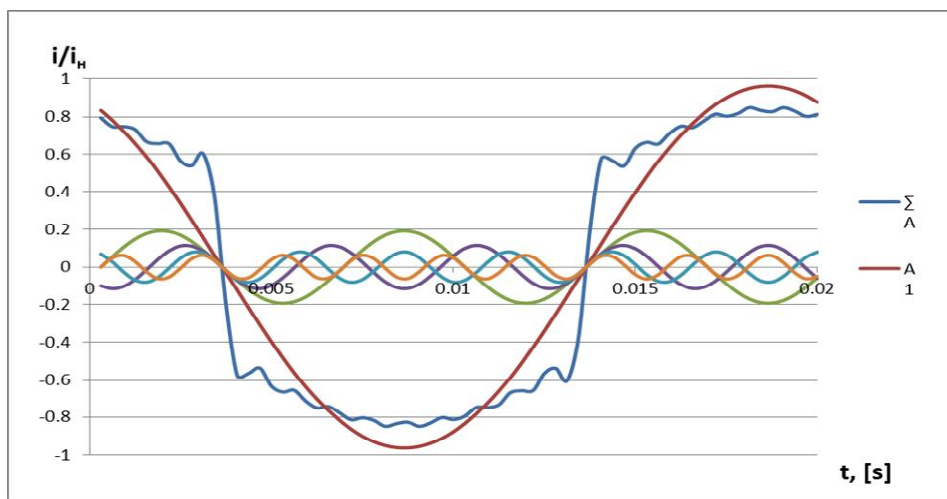
Таблица 2. Разпределение на токовете плътности на отделните фази в намотките по ядрата.

4. Резултати от направените изчисления и симулации

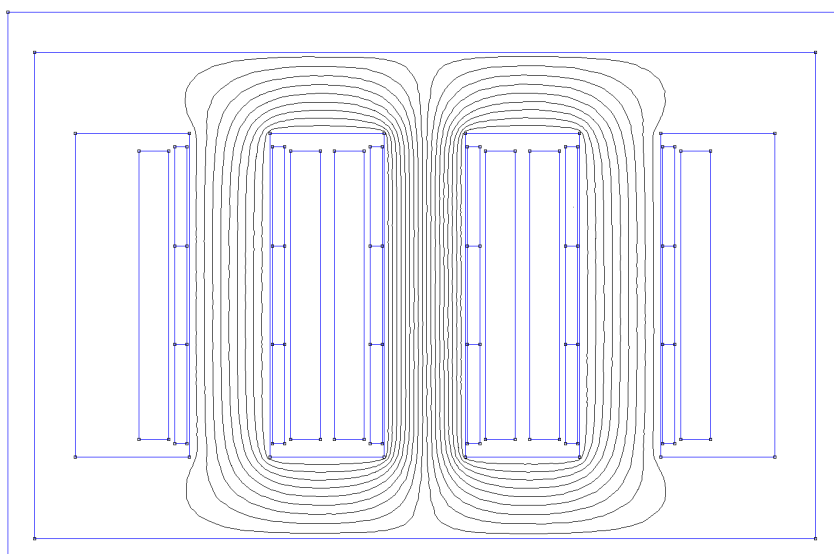
Направени са симулации на работата на разпределителен трансформатор с двата вида намотки при захранване със симетрична система токове с к-фактор от 2 до 12. Графично стойностите на амплитудите на отделните хармоници са показани на фиг. 7. При трансформатора със схема на свързване звезда на първичната намотка хармоничния състав на индуктираното е.д.н., както се и очаква, почти съвпада с този на захранващите токове, докато при трансформатора с модифицирана намотка зиг-заг – амплитудните стойности на трети и кратните му хармоници намаляват почти двойно. Резултатите от изчисленията за хармоничния състав в изходното напрежение за трансформатор с намотка ниско напрежение модифициран зиг-заг са показани на фиг. 8., а на фиг.9 и фиг. 10 са сравнени резултатите за трети и девети хармоник в изходното напрежение за трансформаторите с двата вида намотки.



Фиг.4. Токова плътност в относителни единици за фаза А съставена за к-фактор 5 с пълен хармоничен състав (до 19 хармоник)



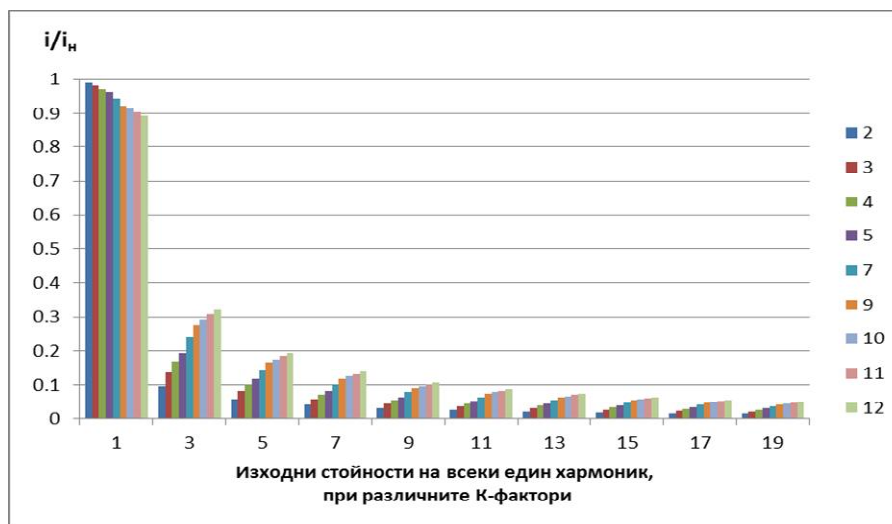
Фиг.5. Хармоничен състав на токовата плътност за фаза А съставена за к-фактор 5.



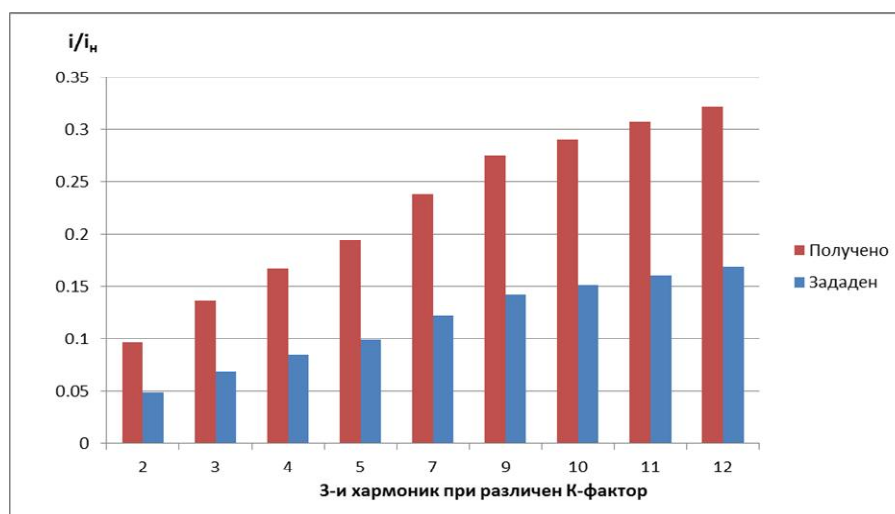
Фиг.6. Разпределение на магнитния поток в модела за $t=0.0084375$ (токът във фаза В е максимален), при к-фактор 5.



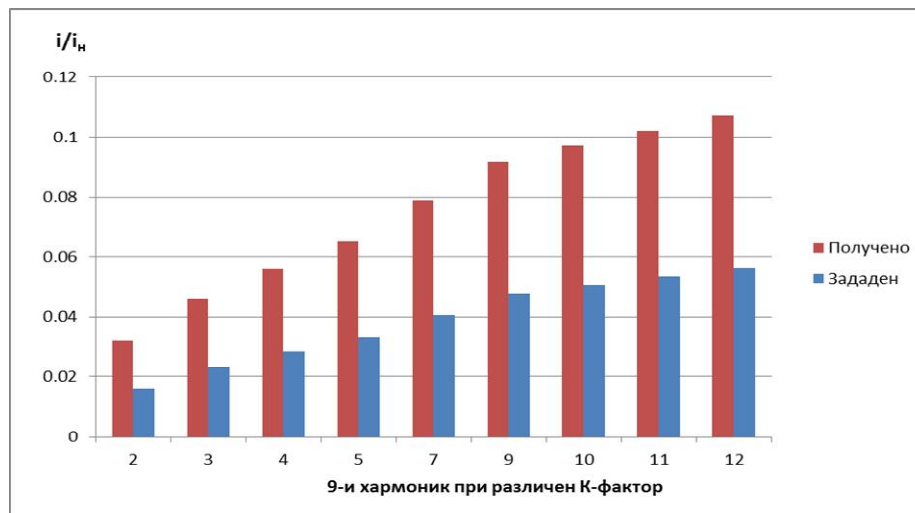
Фиг.7. Входящия хармоничен състав на първичния ток при различен к-фактор



Фиг.8. Хармоничен състав на получените е.д.н. при различен к-фактор за трансформатор с намотки звезда/модифициран зиг-заг.



Фиг.9. Съпоставка между стойностите на 3-и хармоник на е.д.н. при ядрен трансформатор с намотки свързани звезда/звезда и трансформатора с намотка звезда/модифициран зиг-заг при различен к-фактор.



Фиг.10. Съпоставка между стойностите на 9-и хармоник на е.д.н. при ядрен трансформатор с намотки свързани звезда/звезда и трансформатора с намотка звезда/модифициран зиг-заг при различен к-фактор.

5. Анализ на получените резултати

От резултатите на направените изследвания може да се направи извода, че трансформатора с намотка ниско напрежение модифициран зиг-заг силно намалява третия и кратните му хармоници, но цената на това редуциране е увеличените с 50% навивки на намотката. Създадената методика за изследване на хармоничния състав в индуктираното е.д.н. при различна степен на несинусоидалност позволява изследване на трансформатори с друг тип намотки ниско напрежение. Обект на следващи изследвания ще е трансформатор с две намотки ниско напрежение тип зиг-заг, дефазирани на определен ъгъл за ограничаване на пети или седми хармоник в е.д.н. индуктирано в намотка високо напрежение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 3.3, User's Manual
- [2] "Harmonics, Transformers and K-Factors", CDA Publication 144, September 2000
- [3] Hemchandra Madhusudan Shertukde, "Distributed Photovoltaic Grid Transformers"
- [4] Стандарт БДС EN 50160
- [5] Стандарт IEEE 519-92

Автори:

Радослав Лазаров Спасов доц. д-р инж. от ТУ-София, катедра „Електрически машини“, e-mail: rls@tu-sofia.bg; **Пламен Миланов Ризов**, доц. д-р инж. от ТУ-София, катедра „Електрически машини“, e-mail: pmri@tu-sofia.bg; инж. **Виктор Захариев Захариев** докторант от ТУ-София, катедра „Електрически машини“, e-mail: sun_goko@gmail.com; инж. **Цветомир Методиев Стоянов** докторант от ТУ-София, катедра „Електрически машини“, e-mail cecinh@abv.bg;