

# INFLUENCE OF HIGH HARMONICS ON THE OPERATION OF DIGITAL RELAY PROTECTIONS

*Kiril Dzhustrov*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: justrov@mgu.bg*

**ABSTRACT.** The effect of higher harmonics on the operation of digital relay protections has been investigated. Real-measured currents and voltages with harmonic components were modelled under laboratory conditions, and the characteristics of their protective functions were studied. The time error under different measurement modes of two inverse characteristics was evaluated.

**Key words:** higher harmonics, protective functions.

## ВЛИЯНИЕ НА ВИСШИТЕ ХАРМОНИЦИ ПРИ РАБОТАТА НА ЦИФРОВИ РЕЛЕЙНИ ЗАЩИТИ

*Кирил Джустров*

*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София*

**РЕЗЮМЕ.** Изследвано е влиянието на висшите хармоници при работата на цифрови релейни защиты. В лабораторни условия са моделирани реално заснети токове и напрежения с хармонични съставни, като са изследвани характеристиките на защитните им функции. Оценена е времевата грешка при различни режими на измерване на две инверсни характеристики.

**Ключови думи:** висши хармоници, защитни функции.

### Въведение

Основна характеристика на релейните защиты е зависимостта между закъснението на защитата и стойността на въздействащата величина или мястото на повредата. За някои релейни защиты закъснението не зависи от стойността на въздействащата величина. Тези защитите заработват с еднакво закъснение при всички повреди в зоната им и при всички стойности на въздействащата величина в областта на заработването. Това са защитите с независима характеристика. Защити със зависими от тока характеристики се използват в разпределителните мрежи от началото на миналия век. При тях закъснението зависи от стойността на въздействащата величина. Намерили са приложение както при защита на електропроводи, така и за защита на трансформатори и електродвигатели.

При работа на електрическите съоръжения често има наличие на големи стойности на висшите хармоници в напрежението и тока. Когато товарът се състои от мощни вентилни преобразуватели или електродъгови пещи, коефициентът на несинусоидалност THD може да достигне значителни стойности. В изследвания на Chobanov et al. (2013), коефициентът на несинусоидалност THD в напрежението е от порядъка на  $4,2 \div 4,4\%$ , докато в тока THD достига до  $27,4\%$  (Стоилов и др., 2015) на страна средно напрежение и дори до  $63\%$  (Chobanov et al., 2013) на страна ниско напрежение. Лаков (2024) също изследва наличието на висши хармоници в мрежи ниско напрежение, захранващи постояннотокови преобразуватели. Отчетени са коефициенти на несинусоидалност, достигащи до  $5,10\%$  в напрежението. В публикация на S. Taheri et al. (2012) се разглежда проблемът на загряването на силовите трансформатори при наличие на висши хармоници. Често товарът на трансформаторите е с ток, съдържащ висши хармоници, което води до увеличаване на загубите в тях и намаляване на остатъчния им ресурс. Тъй като през трансформатора

протичат токове с хармонични съставни, той може да бъде подложен на допълнителни загуби и нагряване, водещо до намаляване на експлоатационния му срок. Jalil Yaghoobi et al. (2012) разглеждат остатъчния ресурс на трансформаторите, като се отчита спектърът на хармоничните съставни в тока, електрическите характеристики, топлинното поведение и др. В изследване на Матанов и Сидеров (2004) е моделирано влиянието на параметрите на електроснабдителната система върху генерираните хармоници на ток и напрежение от мощни токоизправители. Съставеният от тях модел позволява да се установи степента на претоварване на основни елементи на електроснабдителната система (кондензаторни батерии, силови трансформатори и др.) въз основа на наличието на висши хармоници на тока и напрежението. В публикация на Zabchev A. & R. Alexandrov (2023) е направен аналитичен анализ на висшите хармоници в напрежението и тока на магнитен сепаратор. Дадена е методика за определяне на хармоничния състав при наличие на полупроводникови преобразуватели в мрежата.

Проучвания на Al-Musawi et al. (2015) представят практически тест на хармоничното влияние върху електромеханични и микропроцесорни релета. В тези проучвания е установено, че влиянието на THD е незначително върху защитните релета, докато влиянието на чист сигнал с по-висока от основната честота има значителен ефект върху функцията на защитните релета. В изследване на Wannous & Tomar (2018) е представено сравнението между алгоритъма на защитното реле при необичайни условия и математически модел в програмната среда Matlab Simulink, базиран на моделирани хармоници с високи стойности.

Jedrzejczak et al. (2014) изследват влиянието на висшите хармоници върху работата на цифровите релейни защиты. Доказват, че при различни стойности на THD се получава значително увеличение на времето на изключване.

От друга страна, висшите хармоници в тока увеличават грешката на токовете трансформатори. В свое изследване Indra Nisja (2018) установява, че когато THD на първичната страна се увеличи до 32%, грешката на вторичния ток на токовете трансформатори е 20,58%. Това би довело до неправилно действие на релейните защиты.

Релейните защиты имат възможност да измерват както ефективни стойности (режим RMS), така и стойността на величините по фундаменталния (1-ви) хармоник (режим DFT). От гледна точка на визуализацията на контролираните величини това би довело до грешка, което не е съществен проблем. Но когато защитните функции са настроени в режим на измерване DFT обратно зависимите характеристики ще се отличават от референтните стойности.

### Експериментални изследвания

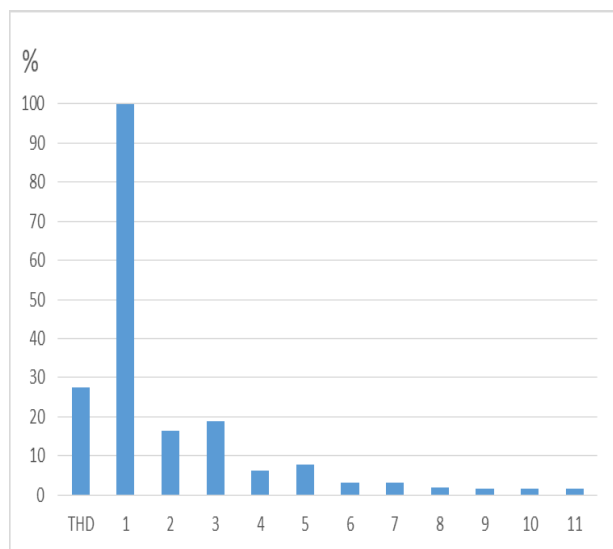
С цел изследване на работата на релейните защиты в лабораторни условия са моделирани токови сигнали с хармонични съставни. Лабораторните тестове са извършени с автоматично тестово устройство ARTES 440.

В таблица 1 са дадени нивата на хармониците за THD=27.6%, регистрирани в Стоилов и др. (2015), а на Фиг. 1 – вида на сигнала с THD=27,6% и вида на фундаменталната съставна. Моделираният сигнал е опростен, като са взети под внимание само хармоници до номер 11-ти.

Таблица 1. Стойности на висшите хармоници при изследването

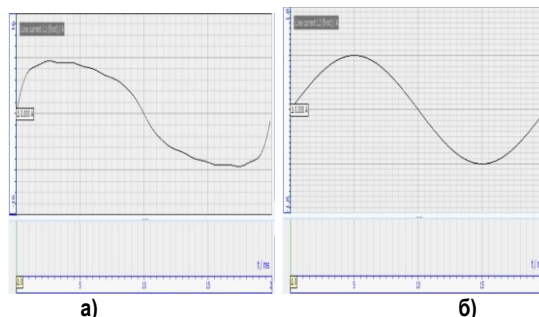
№	THD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
%	27,6	100	16,52	18,9	6,28	7,85	3,19	3,1	1,9	1,75	1,55	1,5

На Фиг. 1 е показан спектърът на висшите хармоници, с които е моделирано изследването.



Фиг. 1. Спектър на моделираните хармоници

На Фиг. 2а) е показана кривата на токовия сигнал, с която са направени експериментите, а на Фиг. 2б) е представен вида на първи хармоник.



Фиг. 2. Форми на вълната на тока по време на еднофазна повреда: а) THD=27,6%; б) основен 1-ви хармоник

При наличие на висши хармоници, несинусоидалният ток е:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{h,rms}^2} \quad (1)$$

където  $I_{h,rms}$  е текущата хармонична амплитуда от порядък  $h$  (т.е.  $h$ -тия хармоник) и  $I_{rms}$  е текущата амплитуда на нормалната честота и хармоничните компоненти:

Общият коефициент на несинусоидалност THD е съгласно израза:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{h,rms}^2}}{I_{rms}} \quad (2)$$

При THD=27,6% в режим на измерване DFT на защитната функция, токът ще бъде 1,0375 пъти по-малък от действителната ефективна стойност.

Когато в релейната защита се въведат обратозависими от времето характеристики, това ще доведе до по-малки отношения  $I/I >$  в израза за зависимостта, даваща връзка между тока и времето.

$$t = \left[ \frac{A}{\left(\frac{I}{I >}\right)^B - 1} + L \right] \cdot T_p \quad (3)$$

Където  $A$ ,  $B$  и  $L$  са коефициенти, зависещи от избраната обратно зависима от времето характеристика, а  $T_p$  е времеви множител, определящ семейството характеристики.

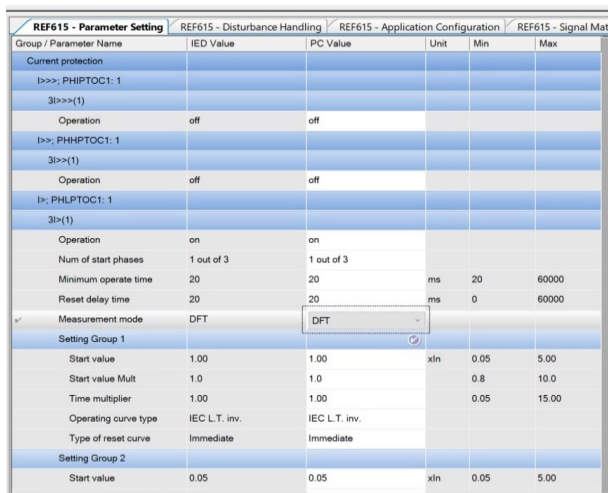
В таблица 2 са дадени коефициентите за два вида характеристики, систематизирани в Джустров (2013), които са изследвани. Изследването е направено с времеви множител  $T_p=1$ .

Таблица 2. Коефициенти за различни характеристики

Семейство токови характеристики	Стандарт	A	B	L
Normal inverse (NIT)	IEC	0,14	0,02	0
Long-time inverse (LIT)	IEC	120,0	1,0	0

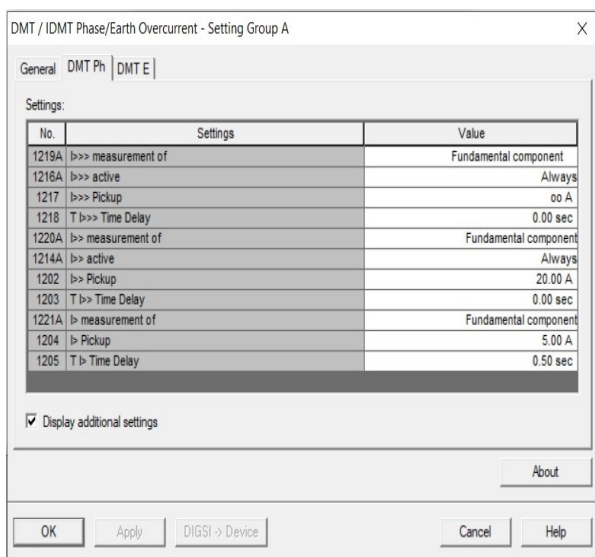
При настройката на релейните защиты на ABB, по подразбиране защитните функции ще работят по

фундаменталната компонента DFT (Фиг. 3). Когато измерваната величина има хармонични съставни е необходимо да бъде променена стойността на „Measurement mode“ в RMS.



Фиг. 3. Екран за настройка при ABB с PSM600

При настройка на защитите на Siemens, също по подразбиране е заложено измерване по „Fundamental component“, но, за да бъде променено, е необходимо да бъде поставена отметка на „Display additional settings“ (Фиг. 4).



Фиг. 4. Екрани за настройка при Siemens с DIGSI 4

В таблица 3 са дадени резултатите от изследванията при различни отношения I/I> за изследвано защитно реле REF615 на ABB. Въведено е отношение на токовете трансформатори 100:1 и по Фиг. 3 са променени „Measurement mode“ в режим DFT или RMS и „Operating curve type“ в IEC NIT или IEC L.T. inv.

С автоматичното тестово товарно устройство са задавани различни отношения на ефективната стойност на токов сигнал (Фиг. 2а) към зададената в защитата стойност (Start value) на I>. Изследвани са два вида характеристики – NIT и LIT по стандарта IEC с времеви множител Tr=1. В същата таблица са дадени референтните времена за двата вида характеристики, определени по формула (3).

Таблица 3. Резултати от изследването

I/I>	Measurement			NIT, Tr=1			LIT, Tr=1		
	RMS, A	DFT, A	Ref. t, s	RMS, s	DFT, s	Ref. t, s	RMS, s	DFT, s	
1.25	125.0	120.5	<b>31.300</b>	31.878	38.248	<b>480.000</b>	483.792	590.797	
1.3	130.0	125.3	<b>26.611</b>	27.008	31.447	<b>400.000</b>	401.661	476.373	
1.5	150.0	144.6	<b>17.194</b>	17.395	19.113	<b>240.000</b>	240.950	270.520	
2	200.0	192.8	<b>10.029</b>	10.073	10.639	<b>120.000</b>	120.212	129.554	
3	300.0	289.2	<b>6.302</b>	6.331	6.550	<b>60.000</b>	60.061	63.491	
4	400.0	385.5	<b>4.980</b>	4.995	5.134	<b>40.000</b>	40.014	42.048	

От таблица 3 е видно, че при настройка на защитните релета в RMS режим, времената им ще съответстват (със съответна минимална грешка) на референтните стойности, но при режим на измерване в релето DFT, т.е. по първи хармоник, имат голяма времева грешка. Това ще доведе до по-бавно изключване на релейната защита при наличие на висши хармоници, което пък от своя страна ще създаде предпоставки за по-продължително по време недопустимо претоварване на електрическите съоръжения.

Относителната грешка за времето на действие ще бъде:

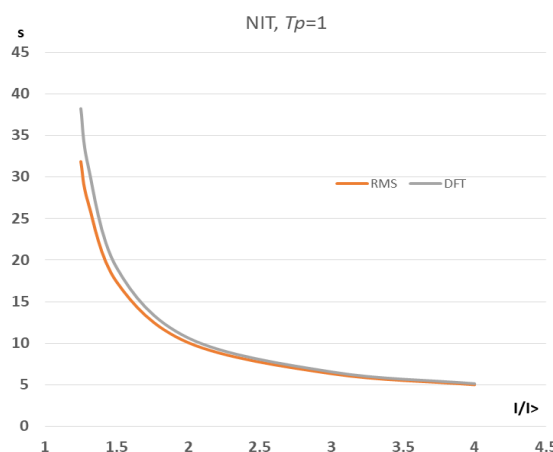
$$\delta_i = \frac{t - t_{ref}}{t_{ref}} \cdot 100, \% \quad (4)$$

където:

t е действителното време на действие на защитата;

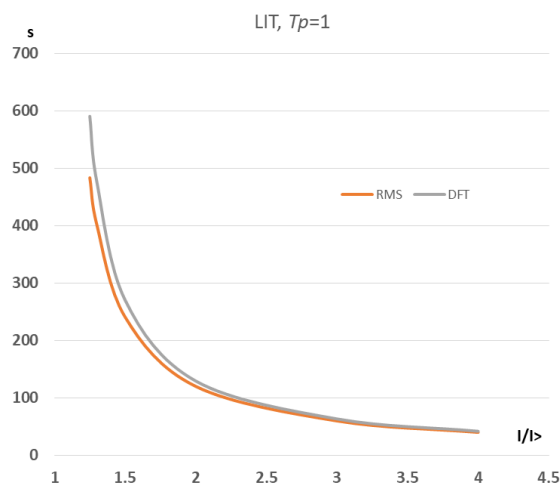
t<sub>ref</sub> – референтното време на действие, съгласно формула (3).

При обратно зависимите характеристики основното предимство е, че при късо съединение близо до източника изключват по-бързо. Но когато се защитават двигатели, характеристиките се избират така, че да има ефективна защита и при претоварване. Замествайки в (4) за характеристика LIT при претоварване с 25% се получава относителна грешка от 22,12%, което е абсолютна грешка от около 107s. В много случаи, това е недопустимо за двигателите и трансформаторите.



Фиг. 5. Характеристики RMS и DFT при Normal inverse (NIT)

На Фиг. 5 са представени графично резултатите от изследването при характеристика NIT с Tr=1, а на Фиг. 6 – за характеристика LIT с Tr=1.



Фиг. 6. Характеристики RMS и DFT при Long-time inverse (LIT)

## Заклучение

Направените изследвания водят да следните изводи:

1. Относителната грешката по време при задействие на защитите не надхвърля 1% в режим на измерване RMS, което е и декларирано от производителя. При работа в режим DFT, времевата грешка достига до 19,98% при характеристика NIT (при  $I/I_p=1,25$ ) и до 22,12% при характеристика LIT (при  $I/I_p=1,25$ ).

2. При въвеждане на защитни функции, обратно зависими от времето, е необходимо измерването за защитната функция на релетата да бъдат в режим RMS за да се отчете влиянието и на висшите хармоници.

3. Препоръчително е въвеждане на обратно зависими характеристики и при отпадане на релетата. Това би осигурило създаване на по-добър топлинен модел в изчислителната логика на защитата.

## Литература

- Al-Musawi, L.; Waye, A.; Yu, W.; Al-Mutawaly, N. (2015). The effects of waveform distortion on power protection relays. In Proceedings of the International Protection Testing Symposium, Feldkirch, Austria, 13–14 October 2015.
- Chobanov St, Drenkov, M., Menteshhev, M. (2013). Experimental study and analysis of high harmonics in the lv mine network with frequency-controlled motors, ANNUAL of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 56, Part III,

Indra Nisja. (2018), Performance of current transformer operate under harmonic condition and their effects on transformer differential protection, MATEC Web of Conferences 159, 02075, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815902075>

Jedrzyczak, J., Anders, G.J., Sekalski, Pr. (2014). Analysis of the Effects of Harmonics on a Digital Protective Relay Operation, Conference: Innovation for Secure and Efficient Transmission GridsAt: Brussels, Belgium

Jalil Yaghoobi et al. (2012). Impact of high-frequency harmonics (0–9 kHz) generated by grid-connected inverters on distribution transformers, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 122, November 2020, 106177, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106177>

Kinan Wannous and Petr Toman, (2018). Evaluation of Harmonics Impact on Digital Relays, *Energies* 2018, 11(4), 893; <https://doi.org/10.3390/en11040893>

Shamsodin Taheri et al. (2012). Modeling and simulation of transformer loading capability and hot spot temperature under harmonic conditions, *Electric Power Systems Research*, Volume 86, May 2012, Pages 68-75, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.12.005>

Wang, F., Bollen, M. (2015), Classification of Component Switching Transients in the Viewpoint of Protective Relays. Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Gцtеborg, Sweden.

Zabchev, A., Alexandrov, R. (2023). Current control of the electromagnetic separator, *SEPRM journal*, Sofia, Bulgaria, p. 76-81.

Джустров, К. (2013), Съвременни цифрови релейни защиты, избор, настройка, експлоатация, София: Изд. къща “Св. Иван Рилски”, 116 стр.

Лаков, Н. (2024). Висши хармоници в мрежи ниско напрежение, захранващи постоянно токови преобразуватели, *Енергиен форум* 2024.

Матанов, Н., Сидеров, С. (2004) Моделиране на влиянието на параметрите на електроснабдителната система върху генерираните хармоници на ток и напрежение от мощни токоизправители, *Год. на Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски”*, том 47, свитък III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, София, стр. 99-104.

Стоилов, Ив., Джустров, К. (2010). Висши хармоници в мрежи с мощни вентилни преобразуватели. *Год. на МГУ „Св. Иван Рилски”*, том 53, София, стр. 121-124.

Стоилов, Ив., Джустров, К., Николов Т. (2015). Изследване хармоничния състав на напрежението и тока при работа на електродъгови стоманодобивни пещи, *Сп. Енергиен форум*, бр. 15/16, 2015г., стр. 65-69.