

УДК 621.316.925

**ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОКОВ ТРАНСФОРМАТОРА  
ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЕГО НА ХОЛОСТОЙ ХОД И ПРИ  
ЗАМЫКАНИЯХ**

**HARMONIC COMPOSITION OF TRANSFORMER CURRENTS  
WHEN IT IS TURNED ON AT IDLE AND DURING SHORT CIRCUITS**

К. И. Савицкий, Д. А. Степанов, М. Р. Хританьков, Д. С. Чурко

Научный руководитель – И. В. Новаш, к. т. н., профессор  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь

K. Savitsky, D. Stepanov, M. Hritankov, D. Churko

Supervisor – Novash I., Candidate of Technical Sciences, Professor  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** проведен в математическом пакете MathCad гармонический анализ токов силового трехфазного трансформатора при его включении на холостой ход и при трехфазном замыкании на стороне низкого напряжения. Значения токов трансформатора в виде массивов мгновенных значений получены с помощью компьютерного программного комплекса для расчета режимов включения и замыканий силового трансформатора. Проведено сопоставление гармонического состава токов для разных режимов.*

***Annotation:** a harmonic analysis of the currents of a three-phase power transformer was carried out in the MathCad mathematical package when it was switched on at idle and with a three-phase short circuit on the low voltage side. Transformer current values in the form of arrays of instantaneous values are obtained using a computer software package for calculating the switching modes and short circuits of a power transformer. A comparison of the harmonic composition of currents for different modes is carried out.*

***Ключевые слова:** трансформатор, гармонический анализ, холостой ход, трехфазное замыкание, MathCad.*

***Keywords:** transformer, harmonic analysis, idling, three-phase short circuit, MathCad.*

### **Введение**

Включение силового трехфазного трансформатора на холостой ход сопровождается так называемым броском тока намагничивания, который протекает по обмоткам высокого напряжения. Максимальное значение этого тока в первый период включения может достигать десятикратного значения тока холостого хода трансформатора. Через несколько периодов ток включения затухает и стремится к току холостого хода. За время затухания этот ток не причиняет вреда трансформатору, поэтому режим включения не является аварийным, и устройства релейной защиты трансформатора не должны его отключать.

Трехфазное замыкание на стороне низкого напряжения силового трансформатора также сопровождается многократным превышением токов, как на стороне низкого напряжения, так и на стороне высокого напряжения. При этом режим замыкания со сверхтоками может быть достаточно продолжительным, за время которого может произойти разрушение трансформатора. Поэтому режим трехфазного замыкания является аварийным и должен быть отключен релейной защитой трансформатора.

Таким образом, оба рассмотренных режима сопровождаются значительными превышениями токов трансформатора над их значениями в рабочих режимах. Однако в первом случае при включении трансформатора его защита не должна срабатывать и тем самым обеспечить нормальное его включение.

Микропроцессорные защиты силовых трансформаторов имеют блокировку от срабатывания при включении трансформатора на холостой ход. Эта блокировка выполняется по наличию в токах включения трансформатора второй гармоники, которая может составлять до 60 % от основной гармоники.

В работе проведен гармонический анализ токов включения и замыкания трансформатора и определено содержание второй гармоники в этих токах.

### Основная часть

Расчет токов при включении и при трехфазном замыкании трансформатора проводился с помощью компьютерного программного комплекса **KZTRANS-2** [1], разработанного на кафедре «Электрические станции» БНТУ. Комплекс предназначен для расчета рабочих и аварийных режимов трехфазного двухобмоточного трансформатора. Результаты расчета режима включения представлены на рис. 1.

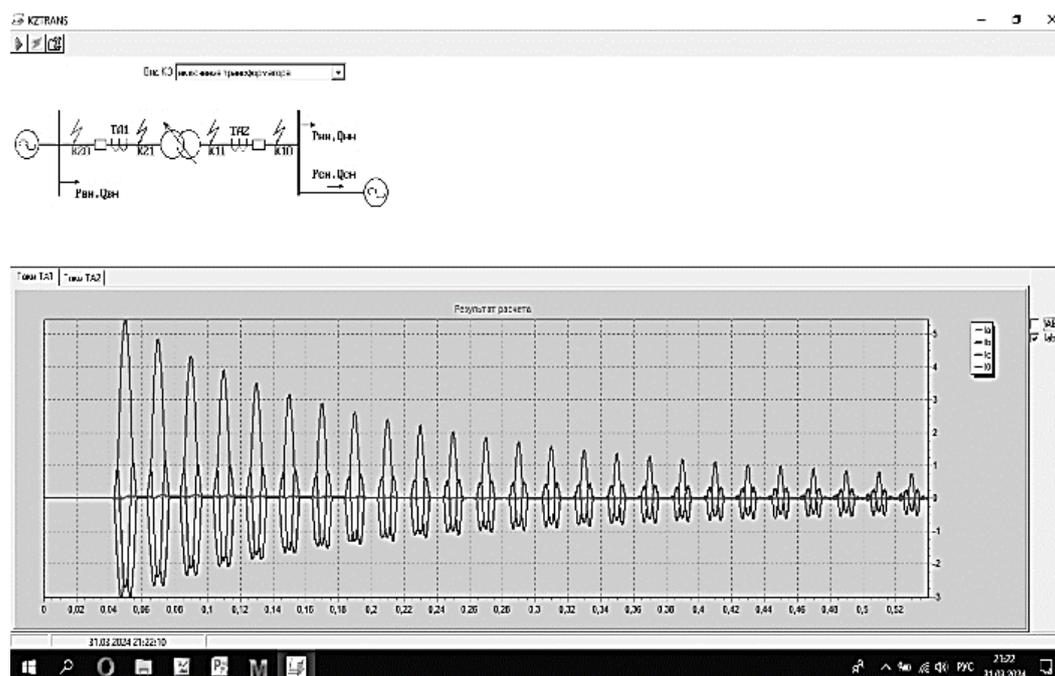


Рисунок 1 – Вторичные токи трансформатора тока ТА1 при включении трансформатора

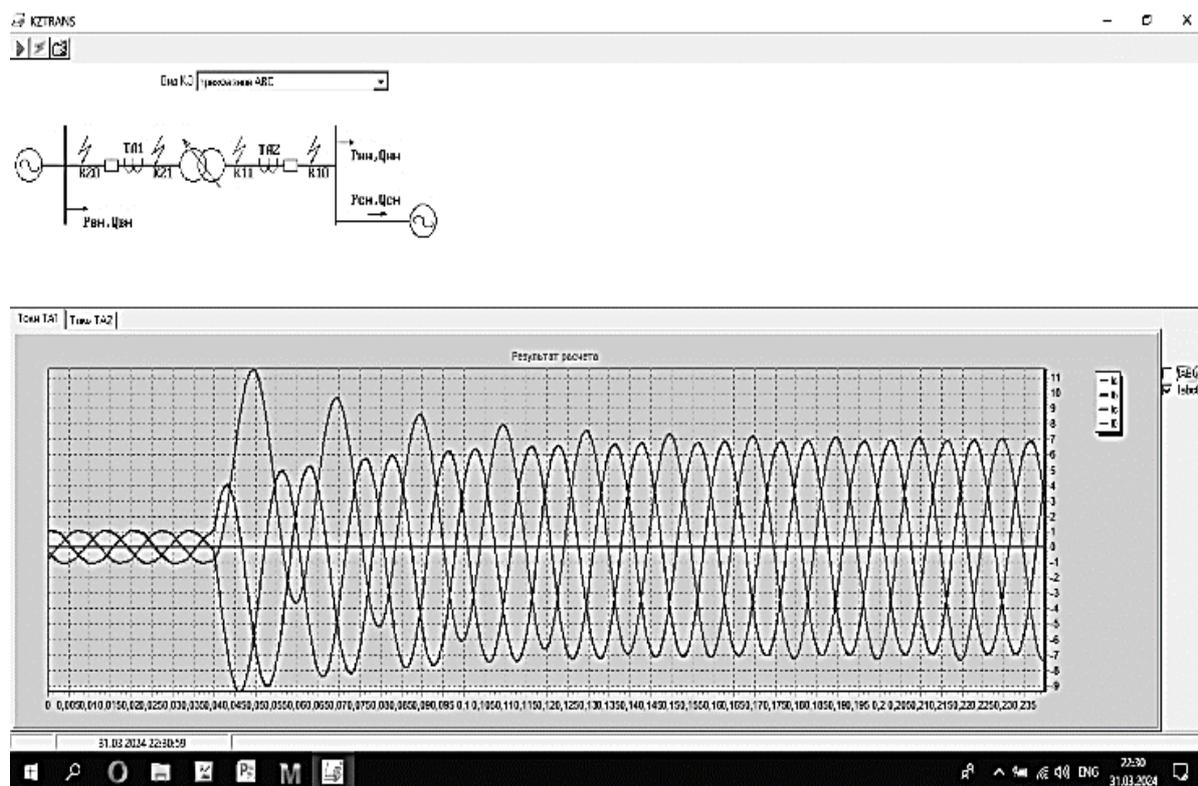


Рисунок 2 – Вторичные токи трансформатора тока ТА1 при замыкании на стороне низкого напряжения трансформатора

Результаты расчета режима трехфазного замыкания на стороне низкого напряжения представлены на рис. 2.

Численные мгновенные значения токов трансформатора при расчетах сохранялись во внешних файлах и использовались при проведении гармонического анализа в математическом пакете MathCad.

При гармоническом анализе использовались непрерывные функции фазных токов, получаемые аппроксимацией в MathCad точечных графиков расчетных токов трансформатора [2].

Этапы аппроксимации в MathCad точечных графиков расчетных токов трансформатора представлены на рис. 3 и 4.

Результаты гармонического анализа тока фазы *A* режима включения представлены на рис. 5. Результаты гармонического анализа тока фазы *A* режима трехфазного замыкания на стороне низкого напряжения представлены на рис. 6.

Сопоставление гармонического состава графиков токов фазы *A* при включении трансформатора и при трехфазном замыкании приведен на рис. 7. Расчеты показывают, что при включении трансформатора, вторая гармоника составляет порядка 37 % от основной (первой) гармоники. В случае трехфазного замыкания вторая гармоника составляет от основной менее 6 %.

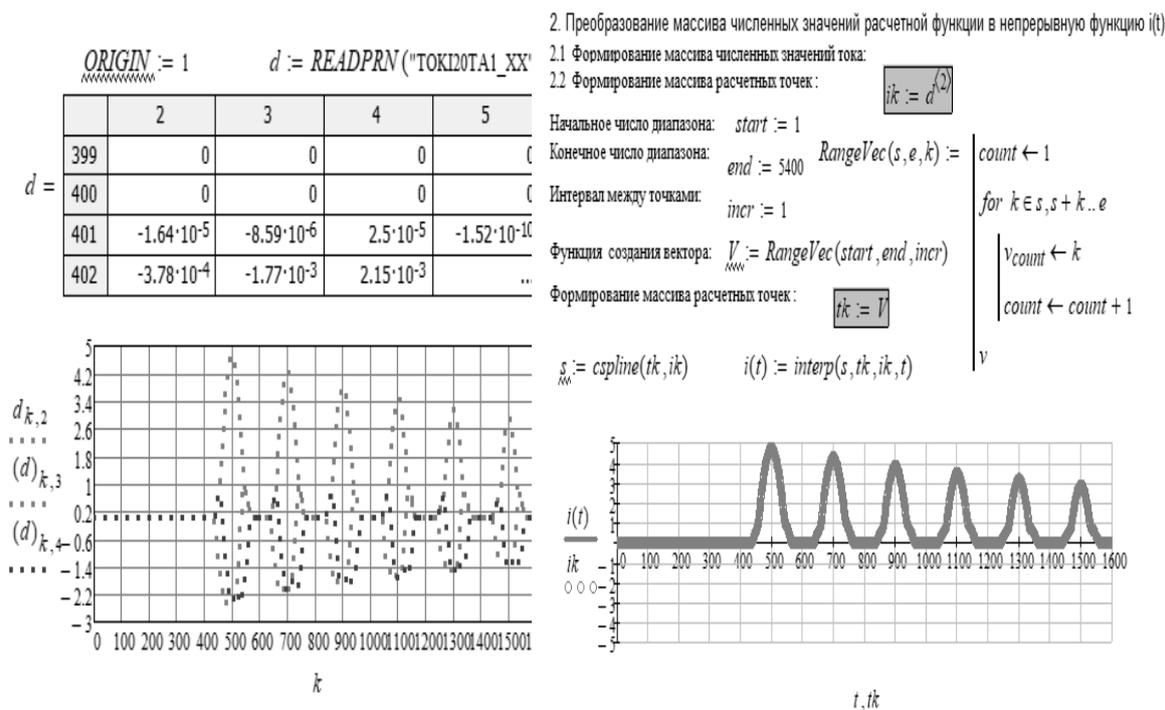


Рисунок 3 – Этапы аппроксимации точечного графика тока фазы A трансформатора при его включении

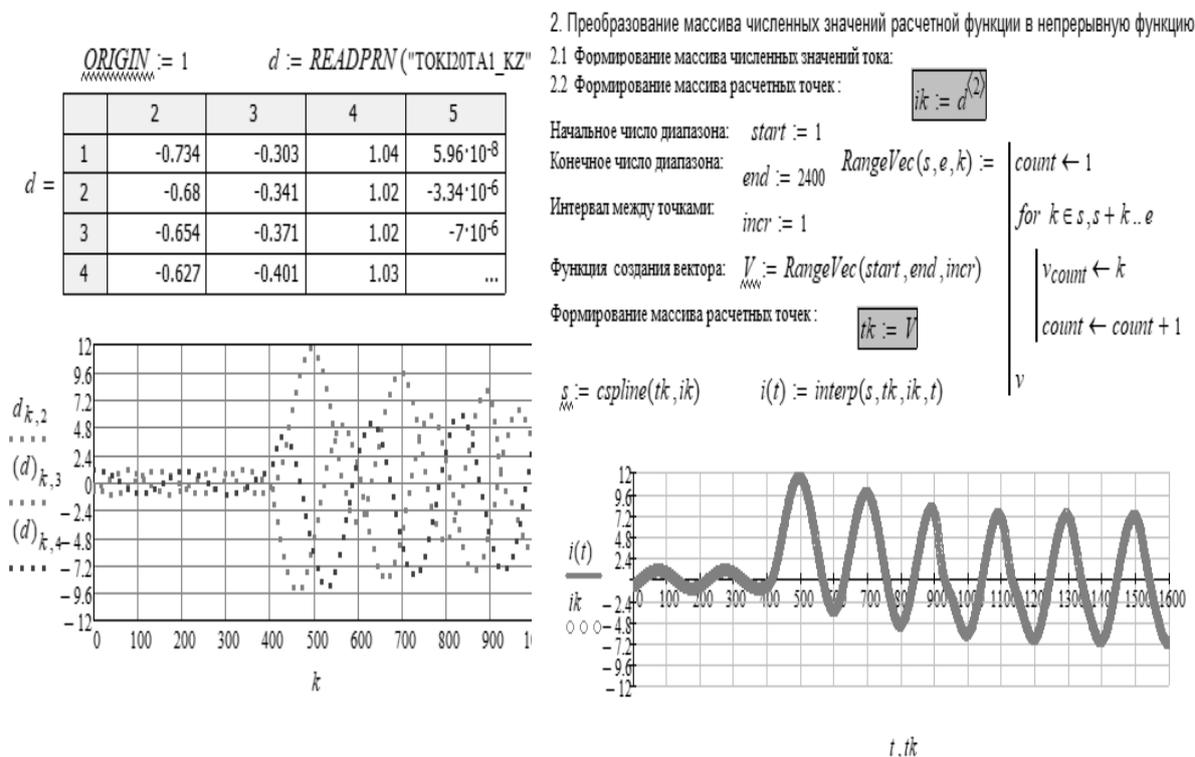


Рисунок 4 – Этапы аппроксимации точечного графика тока фазы A трансформатора при трехфазном замыкании



2. Гармонический анализ функции  $i(t)$

$$t1 := 400 \quad t2 := 600 \quad T_{\text{повт}} := t2 - t1 = 200 \quad \omega := 2 \frac{\pi}{T} \quad j := \sqrt{-1}$$

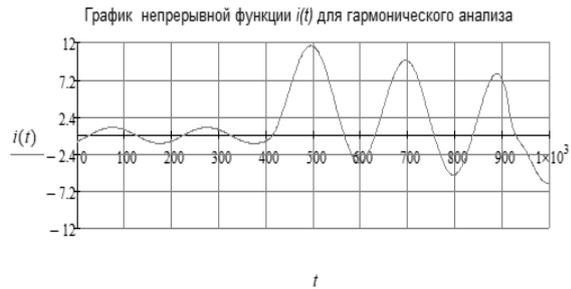
Постоянная составляющая:  $I_0 := \frac{1}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) dt \quad I_0 = 1.58$

Гармонические составляющие до M-ой гармоники:  $M := 10 \quad k := 1..M$

$$Sn_k := \frac{2}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t) dt \quad Cs_k := \frac{2}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t) dt$$

$$I_k := Sn_k + j \cdot Cs_k$$

Рисунок 5 – Гармонический анализ тока фазы A режима включения трансформатора



2. Гармонический анализ функции  $i(t)$

$$t1 := 420 \quad t2 := 620 \quad T_{\text{повт}} := t2 - t1 = 200 \quad \omega := 2 \frac{\pi}{T} \quad j := \sqrt{-1}$$

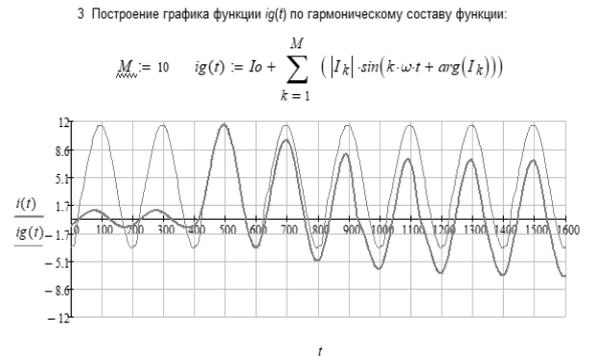
Постоянная составляющая:  $I_0 := \frac{1}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) dt \quad I_0 = 4.415$

Гармонические составляющие до M-ой гармоники:  $M := 10 \quad k := 1..M$

$$Sn_k := \frac{2}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t) dt \quad Cs_k := \frac{2}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t) dt$$

$$I_k := Sn_k + j \cdot Cs_k$$

Рисунок 6 – Гармонический анализ тока фазы A режима замыкания трансформатора



$ I_k $	$\arg(I_k)$	$\frac{ I_k  \cdot 100}{ I_1 }$
1	1	1
2.346	-88.704	100
0.867	95.086	36.969
0.057	-45.261	2.428
0.084	-80.808	3.57
0.061	119.066	2.616
$5.594 \cdot 10^{-3}$	-96.574	0.238
0.06	-70.67	2.544
0.029	100.578	1.236
0.033	113.759	1.399
0.016	-65.257	0.675

$ I_k $	$\arg(I_k)$	$\frac{ I_k  \cdot 100}{ I_1 }$
1	1	1
7.416	-78.748	100
0.422	-69.596	5.695
0.285	-101.595	3.846
0.2	-135.931	2.694
0.15	-173.982	2.016
0.124	145.926	1.669
0.11	110.227	1.487
0.099	74.412	1.332
0.085	38.826	1.14
0.076	1.918	1.022

Рисунок 7 – Сопоставление гармонического состава графиков токов фазы A при включении трансформатора и при трехфазном замыкании

### **Заключение**

Проведен расчет токов силового трехфазного двухобмоточного трансформатора при его включении на холостой ход и при трехфазном замыкании на стороне низкого напряжения. Определен гармонический состав рассчитанных токов и определено процентное содержание в них второй гармоники. Результаты расчетов и гармонический анализ показывают, что процентное содержание второй гармоники в гармоническом составе токов включения трансформатора значительно превосходит содержание второй гармоники в гармоническом составе токов трехфазного замыкания.

### **Литература**

1. Новаш, И. В. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев. – Минск : БНТУ, 2021. – 168 с.
2. Новаш, И. В., Гармонический анализ токов и напряжений, полученных в результате вычислительного эксперимента. / И. В. Новаш, А. А. Мазуренко, А. В. Куцыло // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2011. – № 2. – С. 11-13.