Влияние трансформатора с обмотками «двойной зигзаг с нулевым выводом» на уровень несимметрии и несинусоидальности токов в сети 0,38 кВ

ЮНДИН М.А., ЮНДИН К.М., ИСУПОВА А.М.

The influence of a transformer with «double zigzag with zero output» windings on the level of asymmetry and non-sinusoidal currents in the 0.38 kV network

YUNDIN M.A., YUNDIN K.M., ISUPOVA A.M.

Приведены результаты лабораторных исследований поперечного включения трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулевым выводом» к модели сети напряжением 0,38 кВ с целью повышения пропускной способности электрической сети за счет снижения действующего тока в нулевом рабочем проводнике трехфазной четырехпроводной электрической сети. Выполнен анализ токов, создающих нагрузку нулевого рабочего провода сети напряжением 0,38 кВ. Для нагрузочной стороны силового трансформатора представлены уравнения мгновенных значений наиболее значимых гармонических составляющих токов, полученные по результатам экспериментальных исследований при различных коэффициентах загрузки силового трансформатора. Оценено шунтирующее влияние трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулевым выводом» на коэффициенты несимметрии токов и напряжений обратной и нулевой последовательности, а также на коэффициенты искажения синусоидальности кривых токов и напряжений и коэффициенты третьей гармонической составляющей тока и напряжения. Выявленные закономерности изменения токовой нагрузки нулевого рабочего провода позволяют улучшить эффективность передачи электроэнергии в электрической сети, продлить срок службы кабельных линий, уменьшить пожарную опасность электроустановок.

Ключевые слова: *трансформатор со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулевым выводом», нулевой провод сети, ток нулевой последовательности основной частоты, ток третьей гармоники.*

DOI: 10.53891/00135860_2023_11_77

The results of laboratory studies of the transverse inclusion of a transformer with a circuit for connecting the windings «double zigzag with zero output» to a 0.38 kV network model in order to increase the capacity of the electrical network by reducing the operating current in the zero working conductor of a three-phase four-wire electrical network are presented. The analysis of currents creating a load of the zero working wire of the network with a voltage of 0.38 kV is performed. For the load side of the power transformer, the equations of the instantaneous values of the most significant harmonic components of the currents are presented, obtained from experimental studies with different load coefficients of the power transformer. The shunting effect of a transformer with a «double zigzag with zero terminal» winding connection scheme on the asymmetry coefficients of currents and voltages of the reverse and zero sequence, as well as on the distortion coefficients of the sinusoidal curves of currents and voltages and the coefficients of the third harmonic component of current and voltage is estimated. The revealed patterns of changes in the current load of the zero working wire make it possible to improve the efficiency of electricity transmission in the electrical network, extend the service life of cable lines, and reduce the fire hazard of electrical installations.

Key words: *transformer with a circuit for connecting windings «double zigzag with zero output», zero wire of the network, zero sequence current of the fundamental frequency, third harmonic current.*

В структуре сельского электроснабжения за последние годы произошли существенные изменения – рост электропотребления бытовыми нагрузками на фоне спада электропотребления производственными нагрузками. Увеличение доли однофазных нелинейных электроприемников в узлах нагрузки приводит к росту токов в нулевом рабочем проводе четырехпроводных электрических сетей напряжением 0,38 кВ и силовых трансформаторах 6 – 10/0,4 кВ. Несим-

метрия и несинусоидальность токов являются основными факторами, вызывающими рост токов в нулевом рабочем проводе сети.

Гармонические составляющие токов, кратные трем, близки к синфазности и при суммировании в нулевом рабочем проводе могут образовывать ток, превышающий фазные токи на частоте 150 Гц.

Большая часть кабельных линий в сетях напряжением 0,38 кВ выполнена четырехжильными; нулевая жила такого кабеля может быть меньшего или одинакового сечения с фазными жилами. По условиям нагрева четырехжильный кабель с нулевой жилой меньшего сечения оказывается в худших условиях. В силовых трансформаторах гармоники тока, кратные трем, и ток нулевой последовательности основной частоты приводят к росту дополнительных потерь мощности и снижению срока службы изоляции [1].

Описанная ситуация характерна для сельских и коммунально-бытовых электрических сетей напряжением 0,38 кВ, поэтому задача уменьшения токов нулевой последовательности основной частоты и токов с гармониками, кратных трем, в четырехпроводной сети представляет научный и практический интерес.

Применение в электрических сетях трансформаторов с соединением обмоток в схемы «зигзаг» и «двойной зигзаг с нулевым выводом» [2] показало их перспективность при ограничении токов в нулевом проводе. Цель статьи – исследование возможности повышения пропускной способности электрической сети за счет снижения действующего тока в нулевом рабочем проводнике трехфазной четырехпроводной электрической сети.

Для исследований был изготовлен трансформатор с соединением обмоток в схему «двойной зигзаг с нулевым выводом» ($2Zn$); соотношение чисел витков на каждом стержне составляло 1:0,5:0,5 [3]. Площади поперечного сечения каждого из стержней, на которых размещены обмотки, одинаковы. Трансформатор Т2 с обмотками $2Zn$ подключался автоматическим выключателем QF к модели трехфазной четырехпроводной сети между источником питания и нагрузкой $Z_{н1} - Z_{н3}$ (рис. 1).

Питание модели сети осуществлялось от сило-

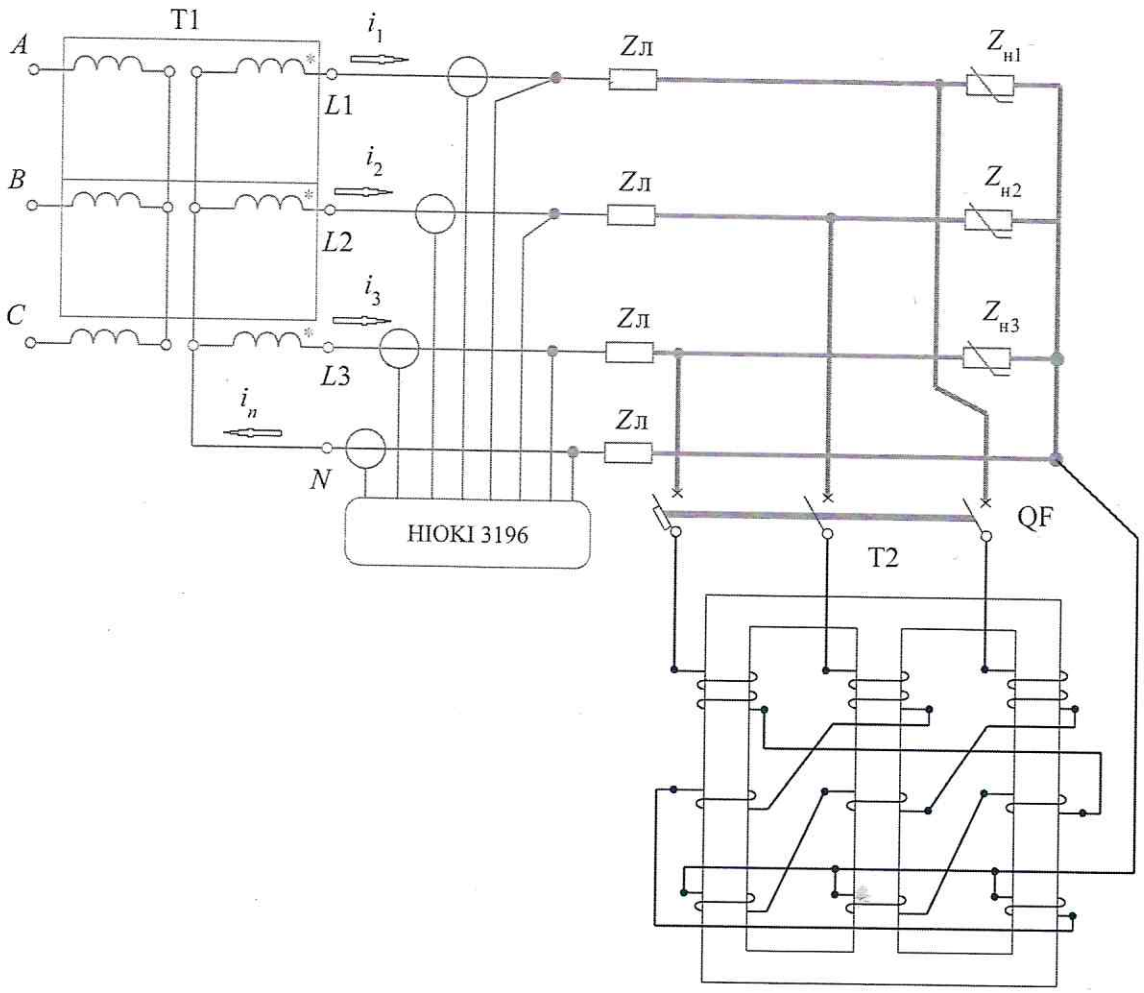


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Таблица 1

Коэффициенты несимметрии и несинусоидальности в зависимости от режима работы модели сети

Показатель	Коэффициент загрузки (β) трансформатора Т1, положение выключателя QF					
	β = 0,81 QF откл.	β = 0,93 QF вкл.	β = 1,29 QF откл.	β = 1,44 QF вкл.	β = 1,31 QF откл.	β = 1,55 QF вкл.
	Характеристики несимметрии					
K_{0U}, %	0,31	0,31	0,35	0,33	0,38	0,34
K_{0I}, %	12,99	3,47	22,34	1,01	26,74	2,89
K_{2U}, %	2,62	3,31	4,20	4,66	4,88	4,91
K_{2I}, %	19,62	3,38	13,76	20,84	30,67	33,60
	Характеристики несинусоидальности					
$K_{U(3)}$, %	0,27 ÷ 0,73	0,26 ÷ 0,68	0,34 ÷ 0,92	0,16 ÷ 0,86	0,52 ÷ 0,76	0,49 ÷ 0,84
$K_{I(3)}$, %	2,62 ÷ 9,22	3,24 ÷ 6,24	3,21 ÷ 7,60	3,04 ÷ 8,67	6,00 ÷ 8,03	2,93 ÷ 9,53
K_U, %	1,28 ÷ 2,09	1,34 ÷ 2,42	2,16 ÷ 2,32	2,47 ÷ 2,60	1,42 ÷ 1,85	1,80 ÷ 2,02
K_I, %	3,14 ÷ 9,64	6,76 ÷ 7,85	4,02 ÷ 8,04	4,72 ÷ 9,03	6,72 ÷ 8,45	5,02 ÷ 9,93
K_{In},%	30,70	140,20	25,12	343,90	26,87	98,71

вого трансформатора Т1 типа ТС-1,5 со схемой соединения обмоток «звезда/звезда с нулевым проводом» (*Y*/*Yn*). Активно-индуктивная нагрузка $Z_{н1} - Z_{н3}$ моделировалась при различных сочетаниях мощностей включаемых газоразрядных ламп ДРЛ; электрические величины регистрировались сертифицированным в России прибором HIOKI 3196. При измерениях токоизмерительные клещи прибора HIOKI 3196 охватывали линейные и нулевой рабочие проводники модели сети. Фазные напряжения измерялись на клеммах силового трансформатора Т1 с нагрузочной стороны.

Исследования выполнены в различных режимах нагрузки: в режиме с симметричной нагрузкой фаз и в режимах с несимметричной и несимметричной нагрузкой, создаваемых путем изменения мощности ламп ДРЛ. В каждом режиме проводилось два опыта: с отключенным и подключенным трансформатором Т2 (посредством выключателя QF), что приводило к изменению коэффициента загрузки трансформатора Т1; основные результаты опытов приведены в табл. 1.

Показатели несимметрии и несинусоидальности токов, полученные в опытах после подключения трансформатора Т2, приведены в табл. 2.

Как следует из данных табл. 1, показатели несимметрии напряжений и токов в опытах изменялись в следующих пределах (табл. 1): коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} от 0,31 до 0,38 %; коэффициент несимметрии токов по нулевой последовательности K_{0I} от 12,99 до 26,74%; коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} от 2,62 до 4,88 %; коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности K_{2I} от 13,76 до 30,67 %.

Таблица 2

Гармонические составляющие тока в нулевом проводе сети при различных режимах работы

Режим	Действующие значения гармонических составляющих тока нулевого провода сети, А			
	$I_{n(1)}$	$I_{n(3)}$	$I_{0(1)}$	I_n
β = 0,81, QF откл.	0,295	0,420	0,098	0,521
β = 0,93, QF вкл.	0,226	0,322	0,075	0,400
β = 1,29, QF откл.	1,911	0,480	0,637	1,972
β = 1,44, QF вкл.	0,107	0,336	0,036	0,391
β = 1,31, QF откл.	2,938	0,531	0,979	2,987
β = 1,55, QF вкл.	0,391	0,290	0,130	0,493

Коэффициенты искажения синусоидальности напряжений (K_U) и токов (K_I) изменялись соответственно: K_U от 1,28 до 2,32 % и K_I от 3,14 до 9,64 %.

В качестве наиболее значимых гармоник напряжений и токов анализировались первая и третья гармоники, в том числе и коэффици-

ент искажения синусоидальности кривой тока в нулевом проводе модели сети K_{In}. Коэффициенты третьей гармонической составляющей напряжения $K_{U(3)}$ находились в диапазоне от 0,27 до 0,92 %; коэффициенты третьей гармонической составляющей тока $K_{I(3)}$ – от 2,62 до 9,22 %.

До подключения трансформатора Т2 к модели сети (*первый опыт*) при коэффициенте загрузки $\beta = 0{,}81$, $K_{0U} = 0{,}31$ %, $K_{2U} = 2{,}62$ %, $K_{0I} = 12{,}99$ %, $K_{2I} = 19{,}62$ % и $K_{In(3)} = 30{,}7$ % мгновенные напряжения и токи наиболее значимых гармоник на участке сети с сопротивлением $Z_л$ от питающего трансформатора Т1 до места подключения трансформатора Т2:

$$u_1 = 302{,}29\sin(\omega t) + 0{,}92\sin(3\omega t + 102^\circ)\text{ В};$$

$$u_2 = 302{,}84\sin(\omega t - 123^\circ) + 0{,}85\sin(3\omega t - 96^\circ)\text{ В};$$

$$u_3 = 285{,}88\sin(\omega t + 118^\circ) + 2{,}01\sin(3\omega t - 73^\circ)\text{ В}.$$

$$i_1 = 2{,}46\sin(\omega t - 50^\circ) + 0{,}24\sin(3\omega t - 20^\circ)\text{ А};$$

$$i_2 = 2{,}97\sin(\omega t - 177^\circ) + 0{,}18\sin(3\omega t - 39^\circ)\text{ А};$$

$$i_3 = 2{,}65\sin(\omega t + 65^\circ) + 0{,}20\sin(3\omega t - 40^\circ)\text{ А};$$

$$i_n = 0{,}42\sin(\omega t - 56^\circ) + 0{,}59\sin(3\omega t + 149^\circ)\text{ А}.$$

После включения автоматического выключателя QF (*второй опыт*) коэффициент загрузки увеличился до $\beta = 0{,}93$ за счет дополнительного подключения трансформатора Т2; изменения остальных коэффициентов при этом режиме работы приведено в третьем столбце табл. 1.

Подключение трансформатора Т2 при одинаковой загрузке фаз модели сети привело к изменению токов в линейных и нулевом проводах:

$$u_1 = 302{,}13\sin(\omega t) + 1{,}90\sin(3\omega t + 131^\circ)\text{ В};$$

$$u_2 = 306{,}06\sin(\omega t - 124^\circ) + 0{,}33\sin(3\omega t - 40^\circ)\text{ В};$$

$$u_3 = 284{,}92\sin(\omega t + 117^\circ) + 1{,}77\sin(3\omega t - 50^\circ)\text{ В}.$$

$$i_1 = 3{,}20\sin(\omega t - 62^\circ) + 0{,}17\sin(3\omega t + 44^\circ)\text{ А};$$

$$i_2 = 3{,}44\sin(\omega t + 179^\circ) + 0{,}23\sin(3\omega t + 104^\circ)\text{ А};$$

$$i_3 = 3{,}10\sin(\omega t + 59^\circ) + 0{,}13\sin(3\omega t + 102^\circ)\text{ А};$$

$$i_n = 0{,}33\sin(\omega t + 15^\circ) + 0{,}45\sin(3\omega t - 97^\circ)\text{ А}.$$

После подключения к модели сети трансформатора Т2 токи первой и третьей гармоник в нулевом проводе снизились в 1,3 раза. Одновременно с этим изменились начальные фазы токов третьих гармоник, как в линейных, так и в нулевом проводе. Действующее значение тока в нулевом проводе на вводе трансформатора Т1 уменьшилось с 0,521 до 0,400 А (табл. 2).

Фазные напряжения практически не изменились, поэтому в дальнейшем обращено внимание на изменения токов наиболее значимых гармоник.

При следующей загрузке с $\beta = 1{,}29$ (*третий опыт*) и отключенном трансформаторе Т2 уравнения токов в модели сети для наиболее значимых гармоник описывались выражениями:

$$i_1 = 3{,}05\sin(\omega t - 54^\circ) + 0{,}23\sin(3\omega t - 35^\circ)\text{ А};$$

$$i_2 = 3{,}82\sin(\omega t + 177^\circ) + 0{,}12\sin(3\omega t - 31^\circ)\text{ А};$$

$$i_3 = 5{,}57\sin(\omega t + 64^\circ) + 0{,}35\sin(3\omega t - 30^\circ)\text{ А};$$

$$i_n = 2{,}70\sin(\omega t - 98^\circ) + 0{,}68\sin(3\omega t + 151^\circ)\text{ А}.$$

Осциллограммы этих токов показаны на рис. 2, при этом коэффициенты, характеризующие несимметрию и несинусоидальность рассматриваемого режима работы сети, составили: $K_{0U} = 0{,}35$, $K_{2U} = 4{,}2$, $K_{0I} = 22{,}34$, $K_{2I} = 13{,}76$, $K_{In(3)} = 25{,}12$ %.

Подключение трансформатора Т2 (*четвертый опыт*) привело к увеличению загрузки до $\beta = 1{,}44$ (табл. 1) и следующим уравнениям для токов:

$$i_1 = 4{,}4\sin(\omega t - 72^\circ) + 0{,}14\sin(3\omega t + 64^\circ)\text{ А};$$

$$i_2 = 4{,}03\sin(\omega t - 169^\circ) + 0{,}35\sin(3\omega t + 117^\circ)\text{ А};$$

$$i_3 = 5{,}58\sin(\omega t + 61^\circ) + 0{,}17\sin(3\omega t + 27^\circ)\text{ А};$$

$$i_n = 0{,}15\sin(\omega t + 172^\circ) + 0{,}52\sin(3\omega t - 97^\circ)\text{ А}.$$

Анализ данных табл. 2 показывает, что ток основной гармоники в нулевом проводе благодаря включению трансформатора Т2 уменьшился в 1,911/0,107 = 17,86 раза, ток третьей гармоники в нулевом проводе в 1,43 раза, ток нулевой последовательности на основной частоте в 17,69 раза.

Как следует из осциллограмм рис. 3, в нулевом проводе преобладает третья гармоника тока, на долю которой приходится почти 86 % от действующего значения тока I_n.

Действующее значение тока в нулевом проводе на вводе трансформатора Т1 уменьшилось с 1,972 до 0,391 А (табл. 2), то есть в пять раз.

Наиболее значимо оказалось снижение коэффициента K_{0I}: с 22,34 до 1,01 %, то есть в 22,1 раза. Формы кривых фазных токов и напряжений незначительно ухудшились, однако в кривых фазных напряжений уменьшилась третья гармоническая составляющая.

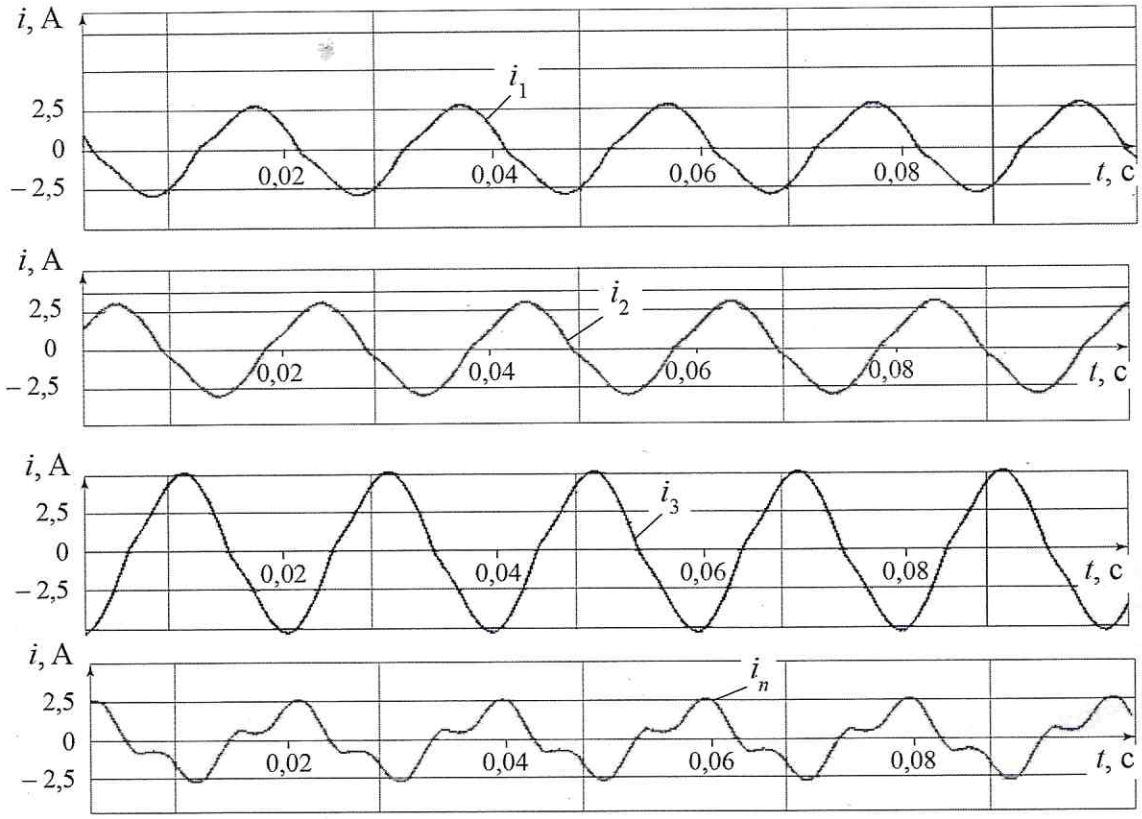


Рис. 2. Осциллограммы токов при начальной загрузке сети с β = 1,29 до включения трансформатора Т2

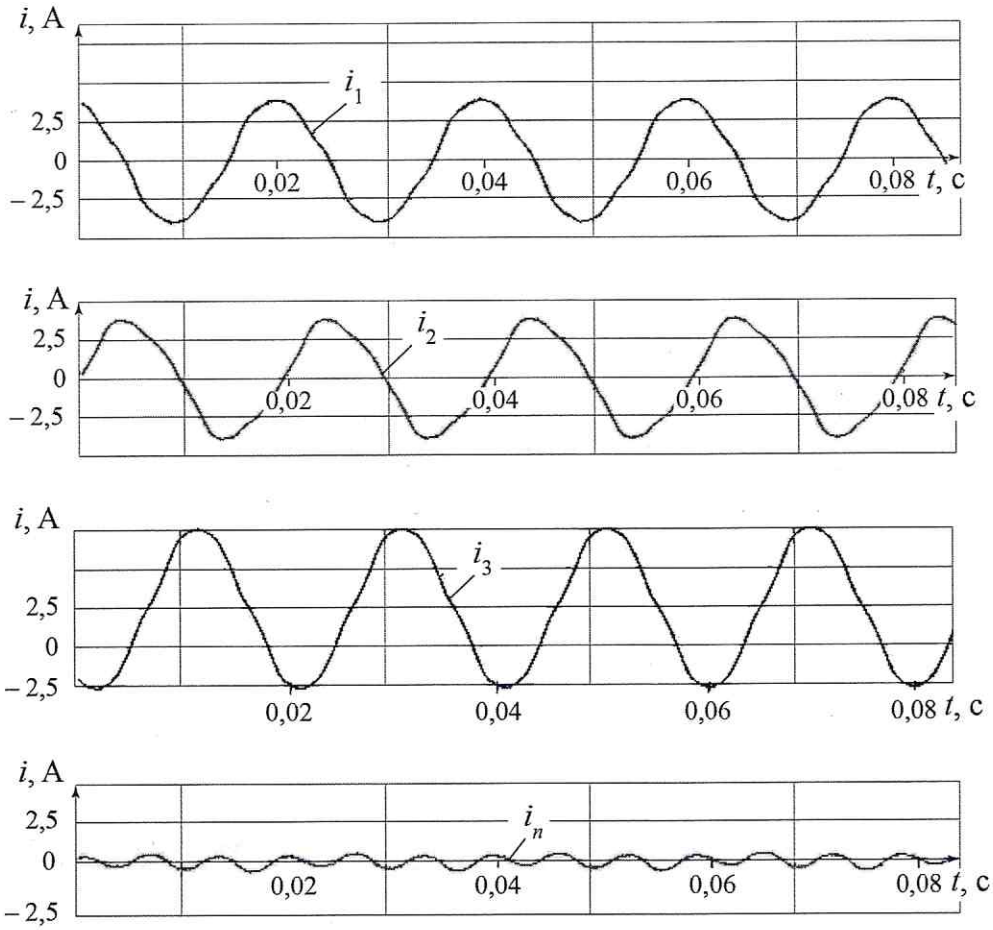


Рис. 3. Осциллограммы токов в сети с подключенным трансформатором Т2 при β = 1,44

При дальнейшем увеличении несимметричной и несинусоидальной нагрузки (β = 1,31, *пятый опыт*) до подключения трансформатора Т2 получены токи:

$$i_1 = 2,71\sin\left(\omega t - 57^\circ\right) + 0,19\sin\left(3\omega t - 48^\circ\right)\text{A};$$

$$i_2 = 2,92\sin\left(\omega t - 164^\circ\right) + 0,24\sin\left(3\omega t + 7^\circ\right)\text{A};$$

$$i_3 = 7,50\sin\left(\omega t + 63^\circ\right) + 0,38\sin\left(3\omega t - 17^\circ\right)\text{A};$$

$$i_n = 4,16\sin\left(\omega t - 120^\circ\right) + 0,75\sin\left(3\omega t + 163^\circ\right)\text{A}.$$

Основной вклад в токовую нагрузку нулевого провода сети при β = 1,31, $K_{0U} = 0,38$, $K_{2U} = 4,88$, $K_{0I} = 26,74$, $K_{2I} = 30,67$ и $K_{In(3)} = 26,87$ % остается за током основной частоты.

После подключения к модели сети трансформатора Т2 при той же нагрузке (*шестой опыт*), произошли изменения следующих величин: β = 1,55, $K_{0U} = 0,34$, $K_{2U} = 4,91$, $K_{0I} = 2,89$, $K_{2I} = 33,60$ и $K_{In(3)} = 98,71$ %. Наиболее заметное изменение в сторону снижения с 26,74 до 2,89 % (то есть в 9,25 раза) оказалось у коэффициента несимметрии токов по нулевой последовательности. Фазные токи i_1 и i_2 незначительно увеличились за счет роста составляющей тока основной гармоники:

$$i_1 = 4,51\sin\left(\omega t - 82^\circ\right) + 0,20\sin\left(3\omega t + 117^\circ\right)\text{A};$$

$$i_2 = 4,53\sin\left(\omega t - 149^\circ\right) + 0,38\sin\left(3\omega t + 114^\circ\right)\text{A};$$

$$i_3 = 7,73\sin\left(\omega t + 60^\circ\right) + 0,28\sin\left(3\omega t - 25^\circ\right)\text{A};$$

$$i_n = 0,55\sin\left(\omega t + 171^\circ\right) + 0,41\sin\left(3\omega t - 91^\circ\right)\text{A}.$$

В нулевом проводе действующее значение тока i_n уменьшилось в 6 раз, при этом ток основной гармоники уменьшился с 2,938 до 0,391 А (в 7,5 раза), а ток третьей гармоники – с 0,531 до 0,29 А (в 1,8 раза). Как следует из приведенных уравнений для рассматриваемого режима работы, после подключения трансформатора Т2 составляющие основной и третьей гармоник тока в нулевом рабочем проводе стали соизмеримы за счет уменьшения тока нулевой последовательности основной гармоники (табл. 2).

Выводы

1. Поперечное подключение трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулевым выводом» к трехфазной четырехпроводной сети при несимметричной нелинейной нагрузке снижает токовую нагрузку в нулевом проводе на участке сети от места подключения трансформатора до источника питания. При этом с увеличением несимметричной нелинейной нагрузки на линии эффект снижения тока в нулевом рабочем проводе проявляется в более значительной степени за счет уменьшения токов основной и третьей гармоник.

2. Подключение трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулевым выводом» приводит к снижению на линии тока нулевой последовательности основной гармоники; степень снижения зависит от характера нагрузки.

3. Подключение трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулевым выводом» приводит к снижению в нулевом проводе линии тока третьей гармоники; степень снижения также зависит от характера нагрузки.

4. Полученные на физической модели результаты могут быть рекомендованы для применения в электрических сетях 380 В с несимметричной нелинейной нагрузкой.

Список литературы

1. **Cazacu E., Petrescu L., Ionita V.** Losses and temperature rise within power transformers subjected to distorted currents / Proc. 15-th intern. conf. on electrical machines, drives and power systems (ELMA). 2017.

2. **Topolski L., Woźny K., Hanzelka Z.** Kompensacja asymetrii prądów i napięć powodowanej odbiornikami i odnawialnymi źródłami energii za pomocą transformatora symetryzującego w sieciach niskich napięć // Przeglad Elektrotechniczny. 2019. № 1 (9).

3. **Патент RU 2399139.** Способ защиты электрической сети от гармоник тока кратных трем / Юндин М.А., Таранов М.М., Юндин К.М. // БИ. 2010. № 25.