

наладчика можно определить потребность в мастерах-наладчиках. Так как техобслуживание тракторов проводится с участием трактористов, то число мастеров-наладчиков для хозяйства будет

$$n_{м.н} = \frac{H}{2\Phi},$$

где Φ - годовой фонд рабочего времени мастера-налад-

чительно превышен, то производится перерасчет плановых затрат денежных средств на фактически выполненный объем работ и определяется фактическая экономия денежных средств.

Сегодня на содержание машинно-тракторного парка расходуется более одной трети стоимости производимой с.-х. продукции.

☛ Заинтересовать механизаторов в бережном отноше-

6. Оперативная трудоемкость проведения технического обслуживания тракторов, чел.-ч

Вид ТО	ЕТО	ТО-1	ТО-2	ТО-3
Марка трактора				
Беларус 320	0,056	0,7883	2,91491	5,36675
Беларус 920,952 МТЗ-80/82	0,067	0,8153	3,5261	6,9311
Беларус 1025	0,0658	0,7766	1,5066	7,0116
Беларус 1221	0,074	0,857	3,34	7,49
Беларус 1523	0,074	0,807	3,29	7,44
Беларус 2025, Беларус 2522	0,06391	0,6916	3,5209	6,89

чика, ч.

Затраты денежных средств на ремонт и техническое обслуживание конкретного трактора определяются, исходя из планового объема механизированных работ ($I_{п}$), нормы амортизационных отчислений на ремонт и техобслуживание (a_{top}) и балансовой стоимости трактора ($B_{т}$) из выражения

$$S_{то} = \frac{B_{т} \cdot a_{top}}{100}.$$

Разница в плановых и фактических затратах на ремонт и техобслуживание представляет собой экономию денежных средств, 40% от которой имеет право получить тракторист, ее сэкономивший, но при условии выполнения планового объема работ.

Если плановый объем механизированных работ зна-

нии к вверенной им технике - наиболее простой и верный путь в ее сохранности и высокой технической готовности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добыш Г.Ф., Кункевич П.А., Тимошенко В.Я. Справочник по эксплуатации машинно-тракторного парка. – Мн.: Ураджай, 1987.
2. Усс И.Н., Сурмило В.В., Бобровник А.И. Оперативная трудоемкость выполнения операций технического обслуживания (ТО) тракторов. Минский тракторный завод, 2005.
3. Добыш Г.Ф. и др. Потенциальные резервы экономии топливно-энергетических ресурсов в агропромышленном комплексе: Методическое пособие. – Мн.: ГУ «Учебно-методический центр Минсельхозпрода», 2005. – 137 с.

УДК 621.314.2

АНАЛИЗ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА У/Δ С ЗИГЗАГОМ ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЗКИ

В.М. Збродыго, инженер (УО БГАТУ)

Искажение синусоидальности напряжения неблагоприятно влияет на работу электрических сетей и электроприемников, вызывая дополнительные потери энергии, снижая срок службы изоляции и т.д. Причиной искажения синусоидальности формы напряжения являются элементы электрических систем с нелинейными

вольт- и вебер-амперными характеристиками, в том числе электроприемники. Они вызывают появление токов высших гармоник, падения напряжений от которых на сопротивлениях элементов сети накладываются на основную синусоиду напряжения и искажают ее.

Для снижения несинусоидальности напряжения автор

предлагает осуществлять электроснабжение нелинейных электроприемников от трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом [1].

Рассмотрим работу трансформатора с точки зрения способности его улучшать форму кривой напряжения в цепи первичной и вторичной сторон. При проведении анализа будем считать, что трансформатор работает на трехфазную нагрузку с нелинейной вольт-амперной характеристикой и в спектре тока вторичной стороны будут присутствовать все четные и нечетные высшие гармоники. При этом токи и напряжения первой, четвертой, седьмой и т.д. гармоник являются гармониками прямой последовательности и сдвиг между фазами у них равен 120° . Токи и напряжения второй, пятой, восьмой и т.д. гармоник являются гармониками обратной последовательности со сдвигом по фазам в 240° . Третья и кратные трем гармоники являются гармониками нулевой последовательности с углом сдвига по фазам 0° . Для упрощения анализа также примем следующие допущения:

1. Система первичных напряжений трансформатора симметрична независимо от режима его работы.
 2. Вторичные обмотки трансформатора приведены к первичным.
 3. Трансформатор понижающий.
 4. Напряжение питания трансформатора синусоидальное.
 5. Каждая из гармоник относится к определенной последовательности.
 6. Нагрузка трансформатора носит активный характер.
- Анализ работы трансформатора при нелинейном характере нагрузки начнем с рассмотрения условий протекания токов высших гармоник нулевой последовательности.

Обмотки высшего напряжения трансформатора соединены в звезду. Ввиду отсутствия нулевого провода токи гармоник нулевой последовательности по ним протекать не могут. Сумма фазных токов будет равна сумме основных гармоник токов и высших гармонических составляющих прямой и обратной последовательности. Токи трех фаз каждой из этих гармоник создают симметричную трехфазную систему. Их сумма в обмотке высшего напряжения будет равна нулю:

$$\begin{aligned} & \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum I_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum I_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \sum I_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum I_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где I_{mA} , I_{mB} , I_{mC} - амплитуды гармоник тока фаз А, В, С соответственно;

φ - угол, на который смещена гармоника по отношению к началу отсчета;

$\omega_1 t$ - угловая частота в данный момент времени для основной гармоники.

Фазные напряжения обмотки высшего напряжения трансформатора могут содержать все гармоники, включая третью и кратные трем:

$$\begin{aligned} u_A = & \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_B = & \sum U_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum U_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} u_C = & \sum U_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum U_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}], \end{aligned}$$

где U_{mA} , U_{mB} , U_{mC} - амплитудные значения гармоник напряжения фаз А, В, С соответственно.

В линейных напряжениях третья и кратные трем высшие гармоники равны нулю.

Обмотки низшего напряжения трансформатора соединены в треугольник. В фазных токах могут присутствовать все гармоники:

$$\begin{aligned} i_a = & \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_b = & \sum I_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum I_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \end{aligned} \quad (3)$$

$$i_c = \sum I_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] +$$

$$+ \sum I_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\ + \sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}].$$

В фазных напряжениях вторичной стороны гармоники, кратные трем, отсутствуют:

$$u_a = \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ + \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}];$$

$$u_b = \sum U_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\ + \sum U_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}]; \quad (4)$$

$$u_c = \sum U_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\ + \sum U_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}].$$

Первые гармоники, а также все высшие гармоники токов трех фаз вторичной стороны, кроме третьей и кратных трем, образуют симметричную трехфазную систему. Их сумма будет равна нулю:

$$\sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ + \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ + \sum I_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\ + \sum I_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\ + \sum I_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\ + \sum I_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] = 0. \quad (5)$$

Фазные токи третьей и кратных трем гармоник во всех трех фазах равны и равнонаправлены в любой момент времени:

$$\sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ = \sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ = \sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]. \quad (6)$$

Вторичные обмотки трансформатора соединены в треугольник. Поэтому токи гармоник, кратных трем, замыкаются по нему, потому что соединение треугольником представляет для них короткозамкнутую цепь.

Эквивалентные сопротивления обмоток высшего напряжения и полуобмоток низшего напряжения для каждой из гармоник можно определить из выражений:

$$z_{1(3n+e)} = r_{1(3n+e)} + jx_{1(3n+e)} = r_{1(3n+e)} + \\ + j2\pi f_{(3n+e)} (L_1 - M_{12} - M_{13} + M_{23}); \\ z_{2(3n+e)} = r_{2(3n+e)} + jx_{2(3n+e)} = r_{2(3n+e)} + \\ + j2\pi f_{(3n+e)} (L_2 - M_{12} - M_{23} + M_{13}); \quad (7) \\ z_{3(3n+e)} = r_{3(3n+e)} + jx_{3(3n+e)} = r_{3(3n+e)} + \\ + j2\pi f_{(3n+e)} (L_3 - M_{13} - M_{23} + M_{12}),$$

где r_1, r_2, r_3 - активные сопротивления обмотки высшего напряжения и половин 2 и 3 обмотки низшего напряжения токам гармоник;

x_1, x_2, x_3 - соответственно реактивные сопротивления обмоток;

L_1, L_2, L_3 - индуктивности обмоток;

M_{12}, M_{13}, M_{23} - взаимная индуктивность пары обмоток;

f - частота тока каждой из гармоник.

На основании закона Кирхгофа для обмотки высшего напряжения фазы «А» справедливо выражение:

$$u_A = -\sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ - \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ - \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] + \\ + \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{1(3n+1)} + \\ + \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{1(3n+2)}, \quad (8)$$

где E_{ma} - амплитуда ЭДС фазы «А».

На основании выражений (2) и (8) запишем:

$$\sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ + \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ + \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ = -\sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ - \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ - \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] + \\ + \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{1(3n+1)} + \\ + \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{1(3n+2)}. \quad (9)$$

Из выражения (9) определим сумму высших гармоник напряжения первичной стороны фазы «А» прямой и обратной последовательностей:

$$\begin{aligned} & \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\ & = - \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ & - \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{1(3n+1)} + \\ & + \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{1(3n+2)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда для третьей и кратных трем высших гармоник напряжения получим:

$$\begin{aligned} & \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = - \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]. \end{aligned} \quad (11)$$

Пользуясь законом Кирхгофа, для обмотки низшего напряжения получим:

$$\begin{aligned} u_a = & \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{2-3(3n+1)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{2-3(3n+2)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot z_{2-3(3n+3)}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $z_{2-3(3n+e)} = z_{2(3n+e)} + z_{3(3n+e)}$.

На основании выражений (4) и (12) получим:

$$\begin{aligned} & \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\ & = \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{2-3(3n+1)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{2-3(3n+2)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot z_{2-3(3n+3)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Из выражения (13) определяем сумму высших гармоник напряжения низкой стороны фазы «А» прямой и

обратной последовательностей:

$$\begin{aligned} & \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\ & = \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{2-3(3n+1)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{2-3(3n+2)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для третьей и кратных трем высших гармоник низкой стороны фазы «а» из выражения (13) получим:

$$\begin{aligned} & \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot z_{2-3(3n+3)} = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Напряжение вторичной стороны трансформатора равно геометрической сумме напряжений двух половин обмотки, находящихся на разных стержнях магнитопровода. Обе половины обмотки имеют одинаковое количество витков. Следовательно, фазное напряжение равно сумме равных векторов напряжений двух частей обмотки, сдвинутых на 60° .

Токи третьей и кратных трем гармоник, обусловленные нелинейным характером нагрузки, протекают по вторичным обмоткам трансформатора, не выходя в линии, т.к. соединенная в треугольник вторичная обмотка представляет для них короткозамкнутый контур. Эти токи равны и имеют одинаковое направление во всех трех фазах в любой момент времени. Т.к. половины фазных обмоток вторичной стороны разделены на различных стержнях магнитопровода, то токи гармоник нулевой последовательности обтекают полуфазы вторичных обмоток, расположенные на каждом из стержней, в противоположных направлениях. Магнитные потоки полуфаз вторичной обмотки Φ'_{3n} и Φ''_{3n} , обусловленные этими токами, в каждом из стержней магнитопровода также будут иметь противоположное напряжение. При условии симметричного выполнения полуфаз эти потоки в стержнях магнитопровода будут полностью компенсировать друг друга:

$$\sum \dot{\Phi}_{3n} = \sum \dot{\Phi}'_{3n} + \sum \dot{\Phi}''_{3n} = 0, \quad (16)$$

где $\sum \dot{\Phi}_{3n}$ - результирующий магнитный поток третьей и кратных трем гармоник в стержнях магнитопровода.

Токи гармоник нулевой последовательности могут создавать только поля рассеяния. Причем, поля рассеяния будут тем меньше, чем ближе расположены обмотки полуфаз друг к другу.

Т.к. магнитные потоки гармоник нулевой последовательности в стержнях будут равны нулю, то и ЭДС,

создаваемые ими, также будут равны нулю, т.е.:

$$\sum E_{m\alpha(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = 0. \quad (17)$$

Тогда, с учетом выражения (11), получим:

$$\sum U_{m\alpha(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] = 0. \quad (18)$$

Учитывая равенство (17), из выражения (15) получим:

$$\sum I_{m\alpha(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = 0. \quad (19)$$

Из выражений (18) и (19) следует, что система фазных напряжений высшей стороны не содержит гармоник нулевой последовательности, и что система фазных токов низшей стороны не содержит гармоник нулевой последовательности. Следовательно, третья и кратные трем гармоники будут отсутствовать в токах и напряжениях как первичной, так и вторичной стороны.

С учетом допущения, что вторичные обмотки трансформатора приведены к первичным, в обмотках высшего и низшего напряжения фазы «А» будет иметь место следующее соотношение высших гармоник прямой и обратной последовательностей:

$$\begin{aligned} & \sum U_{m\alpha(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{m\alpha(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ & - \sum I_{m\alpha(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{1(3n+1)} - \\ & - \sum I_{m\alpha(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{1(3n+2)} = \\ & = - \sum U_{m\alpha(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ & - \sum U_{m\alpha(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum I_{m\alpha(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{2-3(3n+1)} + \\ & + \sum I_{m\alpha(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{2-3(3n+2)}. \end{aligned} \quad (20)$$

Гармоники тока прямой и обратной последовательности трансформируются из низшей стороны на высшую.

Принимая во внимание, что сопротивление короткого замыкания трансформатора высшим гармоникам равно:

$$z_{к.з(3n+e)} = z_{1(3n+e)} + z_{2-3(3n+e)}, \quad (21)$$

уравнение (20) имеет вид:

$$\begin{aligned} & \sum U_{m\alpha(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{m\alpha(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ & - \sum I_{m\alpha(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{к.з(3n+1)} - \\ & - \sum I_{m\alpha(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{к.з(3n+2)} = \\ & = - \sum U_{m\alpha(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ & - \sum U_{m\alpha(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}]. \end{aligned} \quad (22)$$

С учетом выражения (4) уравнение (22) примет вид:

$$\begin{aligned} u_a = & - \sum U_{m\alpha(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ & - \sum U_{m\alpha(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum I_{m\alpha(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{к.з(3n+1)} + \\ & + \sum I_{m\alpha(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{к.з(3n+2)}. \end{aligned} \quad (23)$$

Аналогичным образом получим фазные напряжения низшей стороны трансформатора для фаз «В» и «С»:

$$\begin{aligned} u_b = & - \sum U_{m\beta(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ & - \sum U_{m\beta(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum I_{m\beta(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{к.з(3n+1)} + \\ & + \sum I_{m\beta(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{к.з(3n+2)}. \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} u_c = & - \sum U_{m\gamma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ & - \sum U_{m\gamma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum I_{m\gamma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot z_{к.з(3n+1)} + \\ & + \sum I_{m\gamma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot z_{к.з(3n+2)}. \end{aligned} \quad (25)$$

По результатам анализа работы трансформатора Y/Δ с зигзагом на нелинейную нагрузку будут справедливы следующие выводы:

1. Магнитная система трансформатора уравновешена относительно всех гармоник вследствие компенсации потоков гармоник нулевой последовательности в стержнях магнитопровода. Причем соединение вторичных обмоток в треугольник дополнительно способствует этому.

2. Улучшение формы кривой напряжения происходит вследствие компенсации гармоник нулевой последовательности. Они отсутствуют в спектрах напряжений. Величины гармоник прямой и обратной последовательностей связаны со значением сопротивления короткого замыкания трансформатора.

3. Получены выражения, характеризующие спектр напряжений трансформатора при работе его на нелинейную активную нагрузку.

С учетом вышесказанного можно утверждать, что трансформатор будет успешно работать на нелинейную нагрузку, поддерживая при этом высокие показатели качества электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2244 (РФ) "Трехфазный трансформатор"/ А.П. Сердешнов, Г.И. Янукович, Е.А. Сердешнов, Д.Г. Янукович. Оpubл. в Б.И., 1998г., №3(18).