

П.Д. Андриенко, О.В. Немыкина, А.А. Андриенко

## ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА НА ВЫБОР ТОКОПРОВОДОВ СИСТЕМ ПИТАНИЯ КРАНОВ

*У статті проведено дослідження впливу вищих гармонік струму на втрати напруги і потужності в струмопроводах систем живлення кранів. Отримані необхідні розрахункові співвідношення для визначення параметрів струмопроводів при наявності вищих гармонік. На прикладі найбільш розповсюджених частотно-регульованих приводів показано, що в тролейних лініях зі сталевих матеріалів втрати напруги і потужності зростають до 4 разів і до 1,43 рази, відповідно. Показано, що наявність нелінійної залежності активного опору сталевих струмопроводів від струму навантаження і частоти призводить до збільшення розрахункової величини втрат потужності в порівнянні з розрахунком через коефіцієнт спотворення струму. Встановлено, що величина  $\text{tg}\varphi_{\omega 1}$  може бути використана як конструктивний показник струмопроводу. Наявність втрат потужності призводить до зниження ККД систем живлення кранів до 7 %, що необхідно враховувати при виборі систем електроприводу і його терміну окупності. Бібл. 12, табл. 2, рис. 4.*

**Ключові слова:** вищі гармоніки, втрати напруги, втрати потужності, струмопроводи, сталеві матеріали, алюмінієві шини, системи живлення кранів.

*В статье проведено исследование влияние высших гармоник тока на потери напряжения и мощности в токопроводах систем питания кранов. Получены необходимые расчетные соотношения для определения параметров токопроводов при наличии высших гармоник. На примере наиболее часто встречающихся частотно-регулируемых приводов показано, что в тролейных линиях из стальных уголков потери напряжения и мощности возрастают до 4 раз и до 1,43 раза, соответственно. Показано, что наличие нелинейной зависимости активного сопротивления стальных токопроводов от тока нагрузки и частоты приводит к увеличению расчетной величины потерь мощности по сравнению с расчетом через коэффициент искажения тока. Установлено, что величина  $\text{tg}\varphi_{\omega 1}$  может быть использована как конструктивный показатель токопровода. Наличие потерь мощности приводит к снижению КПД систем питания кранов до 7 %, что необходимо учитывать при выборе систем электропривода и его срока окупаемости. Библ. 12, табл. 2, рис. 4.*

**Ключевые слова:** высшие гармоники, потери напряжения, потери мощности, токопроводы, стальные уголки, алюминиевые шины, системы питания кранов.

**Введение.** Основная масса кранов питается переменным током промышленной частоты, что является определяющим при выборе типа используемых электроприводов кранов. Современное состояние краностроения характеризуется внедрением полупроводниковых преобразователей, существенно изменяющих качество кранового электропривода, обеспечивающего равноускоренный пуск и остановку механизмов, что способствует повышению надежности и долговечности их механических конструкций и подвижных элементов при существенной экономии электроэнергии [1-3]. В большинстве случаев преимущество отдается применению частотно-регулируемому приводу (ЧРП). Наличие полупроводниковых преобразователей приводит к появлению в системе питания кранов (СПК) токов высших гармоник, что в свою очередь отрицательно влияет на качество электроэнергии, электромагнитную совместимость, приводит к падению напряжений и потерь мощности. При выборе вида регулируемого привода экономическая оценка производится путем сравнения их КПД, стоимости, без учета потерь в СПК переменного тока, которые вызывают ухудшения КПД системы «СПК – ЧРП» [4-6].

**Целью статьи** является исследования влияния высших гармоник тока на потери мощности и напряжения в токопроводах систем питания кранов и разработка методики учета этого влияния в практических расчетах.

### Основной материал исследований.

**1. Исходные данные.** В существующей практике в основном применяется система питания переменного тока, а для реализации регулируемых электроприводов в крановых установках используются управляемые выпрямители с двигателями постоянного тока или ЧРП на основе двухзвенного преобразователя

частоты с автономным инвертором напряжения, имеющих в своем составе неуправляемый, управляемый или активный мостовой выпрямитель. Наличие мостовых выпрямителей приводит к появлению высших гармоник  $n=6k\pm 1$  порядка ( $k$  – натуральное число  $k = 1, 2, 3, 4, \dots$ ) в сети переменного тока, которые приводят к увеличению расчетного тока на величину, учитываемую коэффициентом искажения  $\nu$  либо коэффициентом гармоник  $THD_I$  в соответствии с требованиями международных стандартов IEEE 519-1992 или IEC 61000-3-12:2012 [5-7].

Для оценки влияния высших гармоник в СПК переменного тока с использованием двухзвенного преобразователя частоты (ПЧ) использована схема замещения (рис. 1). Источник питания (G) в схеме замещения – симметричная система напряжений ограниченной мощности. Питающая сеть имитируется последовательными  $R_i L_i$  цепочками.

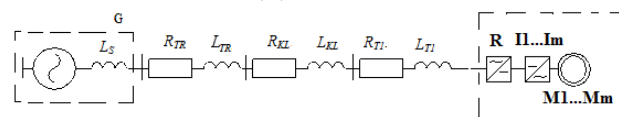


Рис. 1. Схема замещения СПК переменного тока

Каждая цепочка включает соответствующую индуктивность и активное сопротивление: трансформатора –  $R_{TR} L_{TR}$ , кабельной линии –  $R_{KL} L_{KL}$ , участка токопровода  $R_{TI} L_{TI}$  – соответственно к первому крану в полете.

При модернизации кранов наиболее часто используется схема ЧРП с общим выпрямителем (R), который размещен на кране. В зависимости от типа крана используются токопроводы из профильной стали, алюминиевых шин, гибких кабелей.

© П.Д. Андриенко, О.В. Немыкина, А.А. Андриенко

При выполнении анализа приняты следующие допущения:

- постоянство амплитуды, синусоидальность формы и симметрия трех фазных напряжений на вторичной обмотке силового трансформатора;
- индуктивные и активные сопротивления всех элементов сети, кроме основного токопровода считаются постоянными и не зависящими от тока;
- учет влияния высших гармоник тока производится по результатам моделирования СПК с ЧРП или по аналитическим соотношениям, при этом параметры токопровода зависят от частоты и тока нагрузки.

Выбор сечений токопроводов производится по условию нагрева и проверяется на потерю напряжения в самой удаленной точке [8, 9].

Расчетный ток токопровода при несинусоидальной нагрузке определяется исходя из значения расчетной мощности ( $P$ ) по соотношению [9]:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \lambda \cdot U_{nom}} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_1 \cdot v \cdot U_{nom}}, \quad (1)$$

где  $U_{nom}$  – номинальное напряжение,  $U_{nom} = 380$  В;  $\lambda$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $v$  – соответственно коэффициент мощности для несинусоидальной цепи, коэффициент мощности основной гармоники и коэффициент искажения.

Для крановых установок с управляемыми выпрямителями и двигателями постоянного тока или двухзвенными преобразователями частоты и ЧРП, работающих в повторно-кратковременном режиме, входной коэффициент мощности  $\lambda = 0,5 \div 0,6$  [2]. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) преобразователя частоты (ПЧ) с питающей сетью достигается путем установки входного, сглаживающего реактора и (или) активного выпрямителя. При этом входной коэффициент мощности основной гармоники возрастает и может достичь единицы. В дальнейшем исследовании выполнены при  $\cos \varphi_1 = 0,5 \div 1$  [4].

В случае генерации высших гармоник расчетный ток токопровода определяются соотношением [10]:

$$I = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_n^2}, \quad (2)$$

где  $I_n$  – значение расчетного тока гармоники  $n$ -порядка в токопроводах.

Для мостового выпрямителя относительные значения высших гармоник входного тока определяются из соотношения:

$$I_n^* = k_n \cdot \frac{I_n}{I_1} = k_n \cdot \frac{1}{n} = k_n \cdot \frac{1}{f_n^*}, \quad (3)$$

где  $k_n$  – коэффициент, учитывающий относительное значение амплитуды  $n$ -гармоники при разных пульсации выпрямленного тока.

Для идеального выпрямителя  $L_d = \infty$ ,  $k_n = 1$  коэффициент искажения входного тока  $v = 0,955$ .

Для трехфазного мостового выпрямителя во входном звене ПЧ и емкостным фильтром значения токов высших гармонических получены методом имитационного моделирования [11], которое было выполнено в программном пакете Matlab (табл. 1).

Соотношение (2) в относительных единицах с учетом (3) принимает вид:

$$I^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( k_n \cdot \frac{1}{f_n^*} \right)^2}. \quad (4)$$

Таблица 1

Значения высших гармонических входного тока

$I_n/I_1$ , %	$n=5$	$n=7$	$n=11$	$n=13$	$n=17$	$n=19$	$v$
	38,3 %	2,2 %	7 %	3 %	3 %	2 %	0,926
$L_d = \infty$ , $k_n = 1$	20 %	14 %	9 %	7 %	6 %	5 %	0,955
$k_n$	1,91	0,87	0,77	0,42	0,5	0,4	–

**2. Определение параметров токопроводов с учетом высших гармоник.** Особенностью токопроводов в условиях генерации высших гармоник является зависимость их активного сопротивления от величины магнитной проницаемости стального токопровода и частоты тока.

Величина активного сопротивления токопроводов из угловой стали определяется соотношениями [9]:

$$\left. \begin{aligned} R_w &= K_w R_0 = K_w \cdot \rho_{50} \cdot \frac{l}{S_t} \\ K_w &= 1 + 0,84 \cdot \beta_w, \quad \text{при } \beta_w < 1 \\ K_w &= 0,758 + \sqrt{1,34 \cdot \beta_w - 0,83}, \quad \text{при } 1 < \beta_w < 3 \\ K_w &= 0,758 + 1,159 \beta_w, \quad \text{при } \beta_w \geq 3 \\ \beta_w &= 2 \cdot 10^{-2} \frac{S}{P} \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho_{50}}} \mu \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $S$ ,  $P$ ,  $l$  – соответственно сечение,  $\text{cm}^2$ , периметр,  $\text{cm}$ , длина,  $\text{m}$ ;  $R_0$  – омическое сопротивление стального токопровода постоянному току,  $\Omega/\text{km}$ ;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость стального токопровода, которая определяется по кривым [10] в зависимости от напряженности магнитного поля  $H = 0,4 \cdot \pi \cdot I / P$ ,  $\text{A}/\text{cm}$ ;  $\rho_{50}$  – удельное сопротивление постоянному току,  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;  $I$  – ток токопровода,  $\text{A}$ ;  $S_t$  – сечение,  $\text{mm}^2$ .

Для троллейных линий из угловой стали  $50 \times 50 \times 5$  и  $75 \times 75 \times 10$ , по условию допустимого нагрева значения напряженности магнитного поля  $H$  находятся в пределах  $6 \div 23,5$   $\text{A}/\text{cm}$ , которому соответствует значения  $\mu = 1500 \div 750$ . Согласно соотношениям (5)  $\beta_w$  для частоты 50 Hz (первая гармоника) принимает значения  $\beta_{w1} = 3,6 \div 3,2$  и  $\beta_{w1} = 6,5 \div 5,8$ , соответственно. Указанные значения  $\beta_{w1}$  соответствуют коэффициенту  $K_{w1} = 5 \div 4,5$  и  $K_{w1} = 8,25 \div 7,6$ . Активное сопротивление переменному току  $R_{w1} = 1,5 \div 1,4$   $\Omega/\text{km}$  и  $R_{w1} = 0,85 \div 0,78$   $\Omega/\text{km}$  для угловой стали  $50 \times 50 \times 5$  и  $75 \times 75 \times 10$ , в то время как омическое сопротивление уголков постоянному току меньше в 5 и 8,25 раз соответственно (табл. 2).

Значение индуктивного сопротивления троллейных линий из угловой стали для первой гармоники определяется по соотношению [9]:

$$X_{w1} = X^1 + X^{11} \approx X^1 + 0,56 R_{w1}, \quad (6)$$

где  $X^1$  и  $X^{11}$  – внутреннее и внешнее индуктивные сопротивления троллейных линий соответственно.

Значения активного и внутреннего индуктивного сопротивлений троллейных линий из угловой стали  $R_{w1}$  и  $X^{11}$  согласно соотношениям (5), (6) зависят от тока нагрузки и частоты. Значение внутреннего индуктивного сопротивления  $X^1$  не зависит от тока нагрузки.

Параметры исследуемых токопроводов

	Размер, mm	Ток нагрузки, А	$R_0$ , Ω/km	$R_{\omega 1}$ , Ω/km	$X_{\omega 1}$ , Ω/km		$I_{\max}$ , А	$\operatorname{tg}\varphi_{\omega 1}$
					$X^1$ , Ω/km	$X^{11}$ , Ω/km		
Троллей	50×50×5	100/170	0,3	1,5/1,36	0,216	0,85/0,77	328	0,71/0,725
	75×75×10	200/360	0,103	0,85/0,78	0,18	0,49/0,44	542	0,788/0,795
Шины	40×4	–	0,192	0,222	0,214		475	0,96
	120×10	–	0,0255	0,0331	0,153		2070	4,6

Параметры наиболее применяемых токопроводов в виде стальных троллейных линий и алюминиевых шин для первой гармоники приведены в табл. 2. Анализ данных табл. 2 показывает, что для троллейных линий из угловой стали  $\operatorname{tg}\varphi_{\omega 1}$  изменяется в диапазоне 0,71÷0,795 и практически не зависит от их сечения, с незначительной погрешностью можно принять  $\operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} \approx 0,75 = \text{const}$ , в то время как для шин  $\operatorname{tg}\varphi_{\omega 1}$  увеличивается с увеличением сечения шин.

Внутреннее индуктивное сопротивление для уголков 50×50×5 и 75×75×10 находится в диапазоне 0,216÷0,18 Ω/km с незначительной погрешностью можно принять  $X^1 \approx 0,195 = \text{const}$ .

При генерации токов высших гармоник  $n \geq 5$  в стальном токопроводе коэффициент  $\beta_w > 3$ , выражение (5), поэтому с точностью до 10 % можно принять  $K_{\omega n} \approx 1,159 \cdot \beta_{wn}$ .

Относительное значение активного сопротивления токопровода для гармоник  $n$ -порядка, с учетом выражений (5):

$$R_{\omega n}^* = \frac{R_{\omega n}}{R_{\omega 1}} = \frac{K_{\omega n}}{K_{\omega 1}} \approx \frac{\beta_{wn}}{\beta_{w1}} = \sqrt{f_n^*}, \quad (7)$$

где  $f_n^* = f_n/f_1$  – относительная частота гармоники  $n$ -порядка;  $f_n, f_1$  – частота гармоники  $n$ -порядка, частота основной гармоники, соответственно.

Активное и индуктивное сопротивление троллейных линий для гармоник  $n$ -порядка:

$$R_{\omega n} = R_{\omega 1} \cdot \sqrt{f_n^*}, \quad (8)$$

$$X_{\omega n} = X_{\omega 1} \cdot f_n^* = \left( X^1 + 0,56 R_{\omega 1} \cdot \sqrt{f_n^*} \right) \cdot f_n^*. \quad (9)$$

Используя соотношения (8) и (9) выразим значение:

$$\operatorname{tg}\varphi_{\omega n} = \frac{X_{\omega n}}{R_{\omega n}} = \frac{\left( 0,195 + 0,56 \cdot R_{\omega 1} \cdot \sqrt{f_n^*} \right) \cdot f_n^*}{R_{\omega 1} \cdot \sqrt{f_n^*}}. \quad (10)$$

При  $f_n^* > 5$  значение внутреннего индуктивного сопротивления троллейных линий мало по сравнению с внешним индуктивным сопротивлением, поэтому, с достаточной для практики точностью, возможно использовать соотношение:

$$\operatorname{tg}\varphi_{\omega n} = \operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} \cdot f_n^* \approx 0,56 \cdot f_n^*. \quad (11)$$

Отметим, что для алюминиевых шин и медных токопроводов в диапазоне исследуемых частот проявление поверхностного эффекта незначительно, поэтому активное сопротивление шин неизменно  $R_{\omega n} = R_{\omega 1}$ .

Значение  $\operatorname{tg}\varphi_{\omega n}$  для гармоник  $n$ -порядка алюминиевых шин и медных токопроводов определяется соотношением  $\operatorname{tg}\varphi_{\omega n} = \operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} \cdot f_n^*$ .

**3. Определение потери напряжения в токопроводах с учетом высших гармоник.** В общем случае потери напряжения определяются соотношением [10]:

$$\Delta U = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta U_n^2}, \quad (12)$$

где  $\Delta U_n$  – потери напряжения для гармоник  $n$ -порядка в токопроводах:

$$\begin{aligned} \Delta U_n &= \frac{\sqrt{3} k_{\max} \cdot I_n \cdot (R_{\omega n} \cdot l \cdot \cos\varphi_1 + X_{\omega n} \cdot l \cdot \sin\varphi_1)}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 = \\ &= \frac{\sqrt{3} k_{\max} \cdot I_n \cdot R_{\omega n} \cdot l (\cos\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_{\omega n} \cdot \sin\varphi_1)}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $I_n, \varphi_1$  – значение тока  $n$ -гармоники и угол сдвига основной гармоники соответственно;  $l$  – длина токопровода;  $k_{\max}$  – коэффициент, учитывающий увеличение пикового тока относительно расчетного значения тока.

Значение  $\cos\varphi_1$  определяется углом коммутации  $\gamma$  для выпрямителей, установленных во входном звене ПЧ.

Используя ранее принятые допущения, преобразуем соотношение (12). Для стальных токопроводов соотношение принимает вид:

$$\begin{aligned} \Delta U^* &= \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta U_n^2}}{\Delta U_1} = \\ &= \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{n=6k \pm 1} (k_n)^2 \frac{1}{f_n^*} \left( \frac{\cos\varphi_1 + 0,56 \cdot f_n^* \cdot \sin\varphi_1}{\cos\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} \cdot \sin\varphi_1} \right)^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для алюминиевых шин соотношение (15) имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta U^* &= \\ &= \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{n=6k \pm 1} (k_n)^2 \frac{1}{(f_n^*)^2} \left( \frac{\cos\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} \cdot f_n^* \cdot \sin\varphi_1}{\cos\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} \cdot \sin\varphi_1} \right)^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

При исследовании потери напряжения в условиях генерации высших гармоник установлено, что ее величина определяется в основном произведением  $\operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} \cdot f_n^* \cdot \sin\varphi_1$ , входящим в функцию  $f(\varphi) = (\cos\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} \cdot f_n^* \cdot \sin\varphi_1)$ .

Зависимости функции  $f(\varphi) = (\cos\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} \cdot \sin\varphi_1)$  для основной гармоники показаны на рис. 2.

Для троллейных линий ( $\operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} = 0,75$ ) при изменениях  $0,6 < \cos\varphi_1 < 0,95$  функция  $f(\varphi)$  может быть с достаточной для практики точностью функция аппроксимирована значением  $f(\varphi) \approx 1,2$ , что значительно упрощает расчеты. Максимальное значение функция  $f(\varphi) = 1,25$  принимает при  $\cos\varphi_1 = 0,8$ .

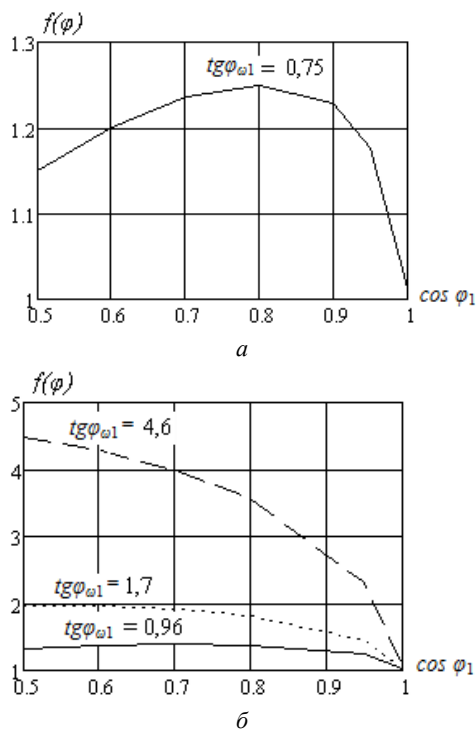


Рис. 2. Зависимости  $f(\varphi) = (\cos\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} \cdot \sin\varphi_1)$  для токопроводов, выполненных троллейными линиями (а) и шинами (б)

При использовании шин  $\operatorname{tg}\varphi_{\omega 1}$  изменяется в диапазоне  $0,96 \div 4,6$ .

Для значений  $\operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} = 0,96$ , при  $0,5 < \cos\varphi_1 < 0,95$  значения  $f(\varphi) \approx 1,37$ . Для значений  $\operatorname{tg}\varphi_{\omega 1} \geq 1,7$ , что характерно для шин размером  $50 \times 6 \text{ mm}$  и более, функция монотонно возрастает при уменьшении  $\cos\varphi_1$ . Минимальное значение функция  $f(\varphi)$  принимает при  $\cos\varphi_1 = 1$ .

Зависимости относительного значения  $\Delta U^* = f(\cos\varphi_1)$  для троллейных линий и шин, рассчитанные по соотношениям (15) и (16), приведены на рис. 3. Анализ зависимостей показывает, что при одинаковом гармоническом составе тока относительное значение потери напряжения в токопроводах из стального уголка значительно выше, чем в шинах. Это объясняется тем, что для троллейных линий составляющая  $\Delta U_n^*$  обратно пропорциональна  $f_n^*$ , а для шин  $(f_n^*)^2$ . При уменьшении коэффициента сдвига до величины  $\cos\varphi_1 = 0,5$ , что характерно для управляемых выпрямителей, потери напряжения увеличиваются в 4 раза для стальных уголков, и в 2,5 раза для шин.

Указанное обстоятельство подтверждает необходимость учитывать влияние высших гармонических при расчете потери напряжения.

Уменьшение коэффициента искажения  $\nu$  с  $0,955$  до  $0,926$  приводит к снижению потери напряжения в токопроводах, что свидетельствует о нелинейной зависимости  $\Delta U^*$  от амплитуд гармонических составляющих кривой тока.

Поэтому при проектировании СПК, которые имеют полупроводниковые преобразователи (выпрямители, ПЧ, регуляторы напряжения) необходимо определять гармонический состав имитационным моделированием. Зависимости  $\Delta U^*$  имеют ряд характерных точек.

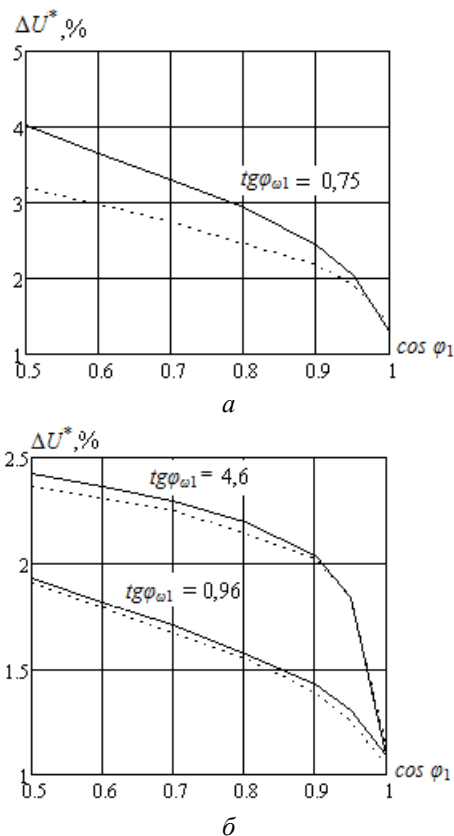


Рис. 3. Зависимости  $\Delta U^* = f(\cos\varphi_1)$  для токопроводов при  $\nu = 0,955$  (сплошная линия) и  $\nu = 0,926$  (пунктирная линия), выполненных троллейными линиями (а) и шинами (б)

Для токопроводов из угловой стали соотношение (15) принимает вид:

- при  $\nu \leq 0,95$  и  $\cos\varphi_1 = 1$

$$\Delta U^* = \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{n=6k+1} (k_n)^2 \frac{1}{f_n^*}}, \quad (17)$$

- при  $\sin\varphi_1 = 1$  ( $\cos\varphi_1 = 0$ )

$$\Delta U^* = \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{n=6k+1} (k_n)^2}, \quad (18)$$

- при  $k_n = 1$ ,  $\Delta U^* \rightarrow \sqrt{2}$ .

Абсолютное значение потери напряжения пропорционально расчетному значению  $I_n$  и активному сопротивлению  $R_{\omega n}$  согласно (13). Поскольку активное сопротивление шин меньше, чем стальных уголков, то при равном значении расчетного тока абсолютное значение падения напряжения в шинах существенно меньше.

Отметим, что использование кабельных токопроводов для питания порталных [12] и козловых кранов, обеспечивает существенное уменьшение потерь напряжения благодаря относительно низкому их  $\operatorname{tg}\varphi_{\omega 1}$ .

**4. Определение потерь мощности в токопроводах с учетом высших гармоник.** Потери мощности в токопроводах переменного тока для первой гармоники определяются соотношением [9]:

$$\Delta P_1 = 3(I_1)^2 R_{\omega 1} = 3 \left( \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \cos\varphi_1 \cdot U_{ном}} \right)^2 R_{\omega 1}, \quad (19)$$

где  $I_1$  – расчетное значение тока основной гармоники.

Относительное значение добавочных потерь в токопроводе переменного тока в условиях генерации высших гармоник определяется из соотношения:

$$\Delta P_{\Sigma}^* = \frac{\sum_{k=1}^{n=6k\pm 1} \Delta P_n}{\Delta P_1} = \sum_{k=1}^{n=6k\pm 1} R_{\text{ом}}^* \cdot (I_n^*)^2, \quad (20)$$

где  $\Delta P_1$  – потери мощности на основной гармонике в токопроводе переменного тока.

С учетом выражений (3) и (7) относительное значение добавочных потерь в токопроводе:

$$\Delta P_{\Sigma}^* = \sum_{k=1}^{n=6k\pm 1} k_n \cdot \frac{\sqrt{f_n^*}}{(f_n^*)^2}. \quad (21)$$

Относительные суммарные потери с учетом первой гармоники:

$$\Delta \Sigma P^* = (1 + \Delta P_{\Sigma}^*). \quad (22)$$

Произведя суммирование ряда (21) для рассматриваемого токопровода при  $\nu = 0,955$  получим значение  $\Delta P_{\Sigma}^* = 0,26$ . Относительные суммарные потери  $\Delta \Sigma P^* = 1,26$  согласно (22).

При расчете с использованием коэффициента искажения  $\nu$  относительные суммарные потери:

$$\Delta \Sigma P^* = \Delta P_1 / \nu^2 = 1 / \nu^2 = 1 / 0,95 = 1,11.$$

Полученное значение по соотношению (22) в  $1,26 / 1,11 = 1,135$  раза больше по сравнению с известным общепринятым подходом.

При коэффициенте искажения  $\nu = 0,926$  по данным табл. 1 относительное значение добавочных потерь согласно выражению (21)  $\Delta P_{\Sigma}^* = 0,436$ . Относительные суммарные потери с учетом основной гармоники  $\Delta \Sigma P^* = 1,436$ .

При расчете с использованием коэффициента искажения:  $\Delta \Sigma P^* = 1 / 0,93^2 = 1,15$ .

Значение относительных суммарных потерь увеличиваются в  $1,436 / 1,15 = 1,25$  раза.

В токопроводах, выполненных алюминиевыми шинами (например, для питания порталных кранов), величина активного сопротивления не существенно зависит от наличия высших гармоник, поэтому с достаточной для практики точностью потери мощности можно определить, используя общепринятую методику:  $\Delta \Sigma P^* = \Delta P_1 / \nu^2 = 1 / \nu^2$ .

Указанное обстоятельство подтверждает необходимость учитывать влияние высших гармонических при расчете потерь мощности в токопроводах.

**5. Влияние потерь мощности в токопроводах на КПД систем питания кранов.** На рис. 4 представлена зависимость относительного значения потерь мощности основной гармоники ( $\Delta P_1^* = \Delta P_1 / P_1$ ) в токопроводах длиной 100 м при токах нагрузки и параметрах токопроводов, приведенных в табл. 2 при изменении значений  $\cos \varphi_1 = 0,5 \div 1$ .

Анализ зависимостей (рис. 4) показывает, что при  $\cos \varphi_1 = 1$  и  $l = 100$  м относительные потери мощности в троллейных линиях составляют 5 % и 6,1 %, соответственно для уголков  $50 \times 50 \times 5$  и  $75 \times 75 \times 10$ , для алюминиевых шин – 1,4 % и 1,03 %, соответственно для сечений  $40 \times 4$  мм и  $120 \times 10$  мм. При  $\cos \varphi_1 = 0,5$  относительные потери в троллейных линиях составляют 20 % и 25 %, соответственно для  $50 \times 50 \times 5$  и  $75 \times 75 \times 10$ , потери в шинах – 4,1 % и 5,5 %, соответственно для сечений  $120 \times 10$  мм и  $40 \times 4$  мм.

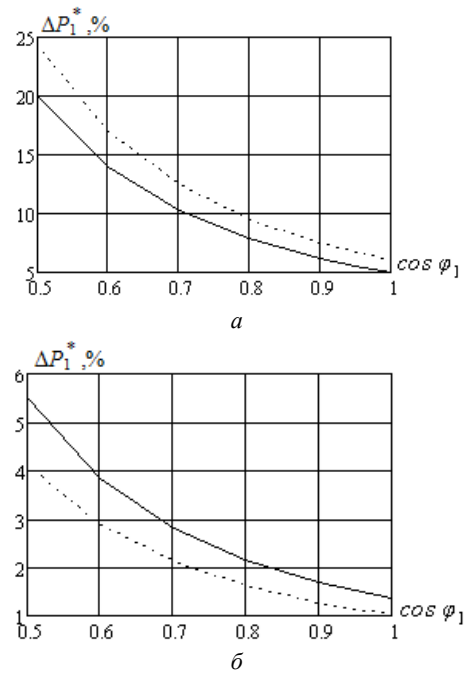


Рис. 4. Зависимости  $\Delta P_1^* = f(\cos \varphi_1)$  для токопроводов, выполненных троллейными линиями (а)  $50 \times 50 \times 5$  мм при  $P = 59$  кВт (сплошная линия) и  $75 \times 75 \times 10$  мм при  $P = 125$  кВт (пунктирная линия); и выполненных шинами (б),  $40 \times 4$  мм при  $P = 100$  кВт (сплошная линия) и  $120 \times 10$  мм при  $P = 500$  кВт (пунктирная линия)

Таким образом, относительные потери в троллейных линиях увеличиваются в 3-3,5 раза по сравнению с шинами. При реальных длинах 60-70 м и расположении узлов подпитки троллейных линий потери в них составляют 3-5 % в зависимости от сечения уголка. С учетом добавочных потерь от высших гармоник и реальных коэффициентах мощности потери мощности возрастают до 4,5-7 %.

При длинах шины до 300 м, что характерно для порталных кранов, потери составляют до 4,2 %, с учетом добавочных потерь потери мощности возрастают до 5 %.

Указанное обстоятельство приводит к снижению КПД СПК с ЧРП, что необходимо учитывать при обосновании срока окупаемости системы электропривода.

#### Выводы.

1. Наличие высших гармоник в токопроводах систем питания кранов при изменении значений  $\cos \varphi_1 = 0,5 \div 0,95$  вызывает:

- увеличение потери напряжения в 1,8-2,5 раза по сравнению с синусоидальным током для шин  $0,96 \leq \text{tg} \varphi_{\omega 1} \leq 4,6$  и в 3,2-4 раза для стальных троллейных линий;

- увеличение потерь мощности в 1,26-1,43 раза по сравнению с синусоидальным током при использовании стальных троллейных линий.

2. Показано, что определяющим параметром, влияющим на потери напряжения и мощности, является тангенс токопровода  $\text{tg} \varphi_{\omega 1}$ , который может быть использован как конструктивный параметр токопровода. Наименьшими потерями обладают токопроводы с минимальным  $\text{tg} \varphi_{\omega 1}$ .

3. Наличие потерь мощности в токопроводах, выполненными троллейными линиями, с учетом добавочных потерь приводит к снижению КПД систем

питания кранов до 4,5-7 % при использовании троллейных линий и до 5 % при использовании шин, что необходимо учитывать при технико-экономическом обосновании систем электропривода. Наличие добавочных потерь от высших гармоник в системах питания кранов переменного тока приводит к увеличению затрат на реализацию токопроводов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимьяк Р.П., Бушер В.В., Калинин А.Г. Электроприводы и системы управления крановых механизмов: уч. пособие. – Одесса: Наука и Техника, 2014. – 202 с.
2. Волков И.В. Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов // Технічна електродинаміка. – 1999. – №4. – С. 21-26.
3. Тищенко В.Н., Колотило В.И. Современное состояние электроприводов грузоподъемных механизмов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – 2005. – №45. – С. 303-306.
4. Немыкина О.В. Выбор системы питания кранов с частотно-регулируемым приводом // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – №19. – С. 54-57.
5. IEEE 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, USA, New York, 1993.
6. IEC 61000-3-12:2012. Electromagnetic compatibility (EMC) of technical equipment. International Standard, 2012.
7. IEC 61000-3-12:2004. Limitation of emission of harmonic currents in low voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A per phase. International Standard, 2004.
8. Рудницький В.Г. Внутрішньощехове електропостачання. Навчальний посібник для студ. вищих навч. закладів. Суми. Університетська книга, 2007. – 280 с.
9. Справочник энергетика промышленных предприятий. Т.1. Электроснабжение. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 840 с.
10. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
11. Андриенко П.Д., Немыкина О.В., Андриенко Д.С. Электромагнитная совместимость систем питания кранов с частотно-регулируемым приводом // Електротехніка і електромеханіка. Спеціальний випуск до XXII Міжнародної науково-технічної конференції «Силова електроніка та енергоефективність». – 2016/4(2). – Т.2. – С. 109-112.
12. Радимов С.Н. Экспериментальное определение фактических электрических параметров крановых шинопроводов – информационная основа оптимизации их функционирования // Вісник Одеського національного морського університету. – 2001. – №7. – С. 161-168.

#### REFERENCES

1. Gerasimyak R.P., Busher V.V., Kalinin A.G. *Elektroprivody i sistemy upravleniia kranovykh mekhanizmov* [Electric drives and control systems of crane mechanisms]. Odessa, Science and Technology Publ., 2014. 202 p. (Rus).
2. Volkov I.V. The new concept of building power circuits of frequency-controlled asynchronous electric drives. *Technical electrodynamic*, 1999, no.4, pp. 21-26. (Rus).
3. Tishchenko V.N., Kolotilo V.I. The current state of electric lifting mechanisms. *Transactions of NTU «KhPI». Chapter «Problems of automated electric drive». Theory and practice*, 2005, no.45, pp. 303-306. (Rus).
4. Nemykina O.V. The choice of the power supply system of cranes with variable frequency drive. *Electrotechnic and computer systems*, 2015, no.19, pp. 54-57. (Rus).
5. IEEE 519-1992. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, USA, New York, 1993.

6. IEC 61000-3-12:2012. *Electromagnetic compatibility (EMC) of technical equipment*. International Standard, 2012.
7. IEC 61000-3-12:2004. *Limitation of emission of harmonic currents in low voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A per phase*. International Standard, 2004.
8. Rudnitskiy V.G. *Vnutrishnotsehave elektropostachannya*. [Innerly electric power supply]. Sumy, University Book Publ., 2007. 280 p. (Ukr).
9. *Spravochnik energetika promyishlennykh predpriyatiy. T.1. Elektrosnabzheniye*. [Reference energy industry enterprises. Vol.1. Power supply]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1961. 840 p. (Rus).
10. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva i ih kontrol na promyishlennykh predpriyatiyah* [Quality indicators and their control at industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p. (Rus).
11. Andrienko P.D., Nemykina O.V., Andrienko D.S. Electromagnetic compatibility of power supply systems of cranes with variable frequency drives. *Electrical Engineering and Electromechanics. Special edition of the XXII scientific-technical conference Power electronics and energy efficiency*, 2016/4(2), vol.2, pp. 109-112. (Rus).
12. Radimov S.N. Experimental determination of the actual electrical parameters of crane busbars – an informational basis for optimizing their operation. *Bulletin of the Odessa National Maritime University*, 2001, no.7, pp. 161-168. (Rus).

Поступила (received) 07.01.2019

Андриенко Петр Дмитриевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Немыкина Ольга Владимировна<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Андриенко Андрей Андреевич<sup>1</sup>, аспирант,  
<sup>1</sup> Запорожский национальный технический университет,  
69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64,  
e-mail: andrpd@ukr.net, olganemikina@ukr.net

P.D. Andrienko<sup>1</sup>, O.V. Nemykina<sup>1</sup>, A.A. Andrienko<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Zaporozhye National Technical University,  
64, Zhukovsky Str., Zaporozhye, 69063, Ukraine.

#### High current harmonics influence on the choice of conductors of crane power supply systems.

**Purpose.** To study the effect of high current harmonics on the power and voltage losses in the conductive lines of the crane power supply systems and the development of an account method for this influence in practical calculations. **Methodology.** For research analytical methods and methods of simulation are used. **Results.** Analytical calculations have been performed for power losses and voltage losses for the conductors of crane power supply systems in the conditions of high harmonic generation for frequency-controlled drives. **Originality.** For the first time, the authors have obtained the analytical expressions and graphical dependencies in relative units for practical calculations that allow determining the effect of high harmonics on the values of power losses and voltage losses for crane supply systems, while the parameters of steel conductors are nonlinear for load current and frequency. We have established that the values of power losses and voltage losses increase for crane power supply systems. It is shown that the power losses lead to a decrease the efficiency of crane supply systems up to 7 %, which must be taken into account when choosing electric drive systems and its payback period. **Practical value.** The obtained theoretical expressions can be used for calculations, design, optimization of crane power supply systems in terms of high harmonic generation. References 12, tables 2, figures 4.

**Key words:** high harmonics, voltage losses, power losses, conductors, steel materials, aluminum tires, crane power systems.