

П.Д. Андриенко, О.В. Немыкина, А.А. Андриенко, Р.Э. Мохнач

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТОКОПРОВОДОВ В СИСТЕМАХ ПИТАНИЯ КРАНОВ С ИНДУКЦИОННОЙ ПОДПИТКОЙ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА

У статті викладена методика розрахунку розподілу струму по струмопроводам, втрат напруги і потужності з урахуванням вищих гармонік струму в системах живлення кранів з індукційним підживленням. Отримані необхідні аналітичні залежності, що пов'язують параметри струмопроводів з відносними значеннями частоти вищих гармонійних і визначають їх вплив на струморозподіл, втрати напруги та потужності. Показано, що зі збільшенням перетину шин підживлення відбувається зниження втрат напруги і додаткових втрат, в тому числі і від струмів вищих гармонік, за рахунок перерозподілу цих струмів і втрат від них в шину подачі, що має практично незалежний від частоти активний опір. Показано, що основна частина додаткових втрат визначається амплітудами гармонік з порядком $n \leq 7$. Методика може бути застосована для систем живлення залізничного транспорту і розподільних систем, виконаних з застосуванням сталемідних і сталелюмінієвих струмопроводів. Бібл. 13, табл. 4, рис. 6.

Ключові слова: система індукційного живлення, тролля, шина живлення, розподіл струму, втрати потужності та напруги.

В статье изложена методика расчёта токораспределения по токопроводам, потерь напряжения и мощности с учётом высших гармоник тока в системах питания кранов с индукционной подпиткой. Получены необходимые аналитические зависимости, связывающие параметры токопроводов с относительными значениями частоты высших гармонических и определяющие их влияние на токораспределение, потери напряжения и мощности. Показано, что с увеличением сечения шин подпитки происходит снижение потерь напряжения, потерь мощности, в том числе и от токов высших гармоник, за счёт перераспределения этих токов и потерь от них в шину подпитки, обладающей практически независимым от частоты активным сопротивлением. Показано, что основная часть добавочных потерь определяется амплитудами гармоник с порядком $n \leq 7$. Методика применима для систем питания железнодорожного транспорта и распределительных систем, выполненных с применением сталемедных и сталелюминиевых токопроводов. Библ. 13, табл. 4, рис. 6.

Ключевые слова: система индукционной подпитки, тролля, шина подпитки, токораспределение, потери мощности и напряжения.

Введение. Энергосбережение в электрических сетях является приоритетным направлением, как во всем мире, так и в Украине. Широкое внедрение полупроводниковых преобразователей приводит к увеличению высших гармоник тока и искажению напряжения, что увеличивает потери напряжения и мощности в электрических сетях и приводит к ухудшению показателей качества электроэнергии [1-3], а также оказывает существенное влияние на работу подключенных к этим сетям преобразователей [4]. Определение состава и амплитуды высших гармоник тока осуществляется расчетными, экспериментальными и методами моделирования [5-9]. Для определения влияния высших гармоник тока на питающую сеть необходимо знать параметры схемы замещения. Для низковольтных цеховых сетей значения активных и индуктивных сопротивлений определяются в основном аналитическим методом. Для сложных проводных систем токопроводов, содержащих ферромагнитные элементы и защитные экраны аналитический расчёт затруднителен. Для этих случаев используются методы моделирования [5, 10].

Для наиболее распространённых и типовых схем используется, как правило, аналитические методы расчёта потерь напряжения и мощности [2, 11]. К таким схемам можно отнести крановые установки, где используются частотно-регулируемые приводы (ЧРП) при модернизации старых или проектировании новых. Использование ЧРП с полупроводниковыми преобразователями в системах питания кранов приводит к значительному содержанию токов высших гармонических в питающей сети, которые учитываются коэффициентом нелинейных искажений (THD_i) в соответствии с требованиями международных стан-

дартов IEEE 519-1992, IEC 61000-3-12:2012 и IEC 61000-3-12:2004. Токи высших гармонических приводят к добавочным потерям напряжения и мощности в цеховых сетях [6]. Указанное обстоятельство привлекает всё большее внимание к исследованию режимов работы нелинейных нагрузок с учётом высших гармоник тока [4-9, 12, 13].

Реализация требований ограничения генерации высших гармоник в сеть потребовало проведения исследований и разработок схемных решений преобразователей, пассивных активных фильтров [1, 3]. С экономической точки зрения компенсация мощности искажений осуществляется в узлах нагрузки: распределительных устройств 6, 10 кВ или 0,4 кВ. Однако в цеховых сетях, питающих электроприёмники с преобразователями влияние высших гармоник оказывается существенным [5] и требует своего решения.

В [6, 7] авторами был предложен метод исследования влияния высших гармоник тока в системах питания крановых установок, использующих для токопровода стальные троллеи и алюминиевые шинопроводы. Показано, что наличие высших гармоник тока приводит к увеличению потери напряжения в 3,2-4 раза и потери мощности в 1,26-1,43 раза по сравнению с синусоидальным током для стальных троллей.

В системе питания кранов большой грузоподъёмности и относительно длинными рабочими пролётами для обеспечения рабочего напряжения в допустимых пределах используется подпитка основной троллеи. Наибольшее распространение получила индукционная система подпитки, как наименее затратная. При индукционной подпитке параллельно троллеи прокладывается, как правило, алюминиевая шина [11].

© П.Д. Андриенко, О.В. Немыкина, А.А. Андриенко, Р.Э. Мохнач

Наличие высших гармоник тока в системах питания кранов приводит к изменению полных сопротивлений отдельных токопроводов и, соответственно, токораспределения в них.

Цель статьи – исследовать влияние высших гармоник токов на токораспределение, потери напряжения и мощности в токопроводах системы индукционной подпитки кранов, и предложить рекомендации по снижению потерь от высших гармонических.

Основной материал исследований.

Исходные данные. Согласно общепринятой методике, ток основной гармоники троллей I_t определяется из условия допустимой потери напряжения на рабочем участке работы крана, согласно соотношения [6, 11]:

$$\begin{cases} I_t = \frac{\Delta U_{\max}}{l_t \cdot \Delta U_{t1}} = \frac{\Delta U_{\max}}{\sqrt{3} \cdot l_t \cdot R_t \cdot (\cos \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_{t1} \cdot \sin \varphi_1)}; \\ I_s = I_{\max} - I_t, \end{cases} \quad (1)$$

где ΔU_{\max} , ΔU_{t1} – допустимая потеря напряжения и потеря напряжения на 1 м длины участка троллей, соответственно, при заданном токе троллей; l_t – рабочая длина троллей; I_{\max} , I_s – максимальный ток системы и шины подпитки, соответственно; $\operatorname{tg} \varphi_{t1} = X_{t1}/R_{t1}$; где X_{t1} , R_{t1} – индуктивное и активное сопротивление троллей для основной гармоники частотой 50 Гц; φ_1 – угол сдвига основной гармоники.

Для обеспечения допустимой потери напряжения $\Delta U_{\max} \leq 5\%$ на рабочем участке работы крана параллельно троллеи прокладывается алюминиевая шина. Токораспределение по токопроводам в системе подпитки определяется отношением полных сопротивлений на основной гармонике [11].

Соотношение токов в токопроводах, используя метод суперпозиции для составляющих с гармоникой n

$$\gamma_n = \frac{Z_{sn}}{Z_{tn}} = \frac{R_{sn}}{R_{tn}} \cdot \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{sn}}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{tn}}}, \quad (2)$$

где $Z_{s(t)n} = \sqrt{R_{s(t)n}^2 + X_{s(t)n}^2}$ – полное сопротивление соответствующего токопровода (s – шины, t – троллей) для n гармоники; $X_{tn} = X'_{tn} + X''_{tn} + X'''_{tn}$; $X_{sn} = X'_{sn} + X'''_{sn}$ – индуктивное сопротивление: X' – внутреннее; X'' – внешнее; X''' – сопротивление взаимоиндуктивности троллей и шины подпитки.

Параметры токопроводов наиболее распространённых систем индукционной подпитки приведены в табл. 1, для расстояния между троллеями 250 мм, выполненными уголком 50×50×5 мм.

Индуктивное сопротивление токопроводов указано с учётом взаимоиндуктивности троллей и шины подпитки [11].

Таблица 1

Параметры токопроводов систем подпитки

Размер, мм	Параметры						
	R_{t1} , Ом/км	X_{t1} , Ом/км	Z_{t1} , Ом/км	$X'_{t1} + X''_{t1}$, Ом/км	X'''_{t1} , Ом/км	$\operatorname{tg} \varphi_{t1}$	γ_1 , о.е.
Стальной уголок 50×50×5 мм	1,65	1,263	2,08	0,339	0,924	0,765	
Алюминиевая шина	R_{s1} , Ом/км	X_{s1} , Ом/км	Z_{s1} , Ом/км	—	—	$\operatorname{tg} \varphi_{s1}$	
20×3	0,513	0,277	0,583	—	—	0,54	0,28
30×3	0,342	0,253	0,425	—	—	0,74	0,204
40×3	0,256	0,237	0,348	—	—	0,926	0,161
50×3	0,205	0,225	0,32	—	—	0,11	0,147
60×4	0,128	0,213	0,248	—	—	1,664	0,119
80×5	0,077	0,195	0,21	—	—	2,53	0,101

Наиболее распространёнными источниками высших гармоник являются неуправляемые (для частотно-регулируемых приводов) и управляемые (для приводов постоянного тока) выпрямители. Относительные значения гармоник n -порядка входного тока мостового выпрямителя 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 отношение амплитуды пульсации в реальном выпрямителе к идеальному [6] (при индуктивности L_d в звене выпрямления $L_d = \infty$ $K_n = 1$); I_n , I_1 – значение тока гармоники n -порядка и основной гармоники в токопроводах соответственно; $f_n^* = f_n / 50$ – относительная частота гармоники n -порядка.

В [6] было показано, что сопротивление алюминиевых шин связано такими соотношениями для n гармонической составляющей относительно основной:

$$\begin{cases} R_{sn} = R_{s1}; & X_{sn} = X_{s1} f_n^*; \\ \operatorname{tg} \varphi_{sn} = \frac{X_{sn}}{R_{sn}} = \operatorname{tg} \varphi_{s1} f_n^*. \end{cases} \quad (4)$$

Сопротивление стальных уголков связано соотношениями для n гармонической составляющей относительно основной:

$$\begin{cases} R_{tn} = R_{t1} \sqrt{f_n^*}; & X_{tn} = (X'_{t1} + X''_{t1} + X'''_{t1}) f_n^*; \\ \operatorname{tg} \varphi_{tn} = \frac{X_{tn}}{R_{tn}} = \frac{(X'_{t1} + 0,56 R_{t1} \sqrt{f_n^*} + X'''_{t1}) \sqrt{f_n^*}}{R_{t1}}. \end{cases} \quad (5)$$

Максимальный ток с учётом высших гармоник определяется соотношением [2, 6]

$$I_{\max}^* = \sqrt{\sum_{k=0}^{n=6k \pm 1} K_n^2 I_n^{*2}} = \sqrt{\sum_{k=0}^{n=6k \pm 1} K_n^2 \frac{1}{f_n^{*2}}}, \quad (6)$$

где k – ряд целых чисел 1, 2, 3 и т.д. При этом полагаем, что основная гармоника равна основной гармонике синусоидального тока троллей без подпитки.

Результаты исследований.

1. Распределение токов в токопроводах подпитки. Преобразуя выражение (2) с учетом рассмотренных соотношений (3) имеем:

$$\gamma_n = \frac{R_{s1}}{R_{t1}\sqrt{f_n^*}} \sqrt{\frac{1 + (\operatorname{tg}\varphi_{s1}f_n^*)^2}{1 + \frac{(X'_{t1} + 0,56R_{t1}\sqrt{f_n^*} + X''_{t1})^2 f_n^*}{R_{t1}^2}}}. \quad (7)$$

Анализ соотношения (7) с учетом значений параметров расчета токопроводов сведенных в табл. 1 показал, что при $f_n^* \geq 7$ соотношение (7) с достаточной точностью может быть приведено к виду:

$$\gamma_n = \frac{X_{s1}}{0,56R_{t1}\sqrt{f_n^*}}. \quad (8)$$

Таким образом, распределение токов по токопроводам практически прямо пропорционально индуктивному сопротивлению шин подпитки на основной гармонике и обратно пропорционально корню квадратному от частоты f_n^* , т.е. с увеличением частоты γ_n монотонно убывает, что свидетельствует об увеличении высокочастотных составляющих в шине подпитки (рис. 1).

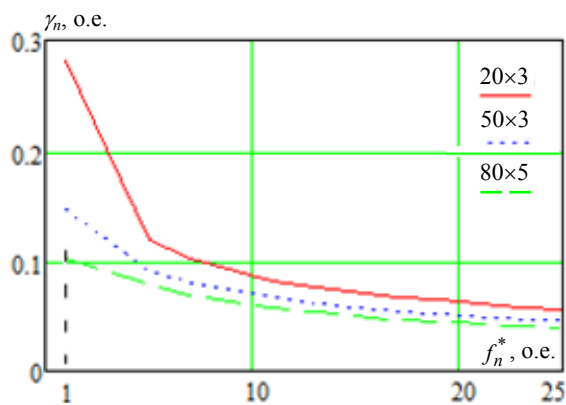


Рис. 1. Зависимости $\gamma_n = f(f_n^*)$ для стального уголка $50 \times 50 \times 5$ мм, с шиной подпитки 20×3 , 50×3 , 80×5 мм

Не трудно показать, используя второе уравнение в выражении (1) и соотношение (2), относительное значение тока шины I_{sn}^* и троллей I_{tn}^* для n гармонической составляющей имеет вид:

$$\begin{cases} I_{sn}^* = \frac{I_{sn}}{I_{\max}} = \frac{1}{1 + \gamma_n} \cdot \frac{1}{f_n^*}; \\ I_{tn}^* = \frac{I_{tn}}{I_{\max}} = \frac{\gamma_n}{1 + \gamma_n} \cdot \frac{1}{f_n^*}. \end{cases} \quad (9)$$

$$\Delta U_t^* = \frac{\sqrt{\Delta U_{t1}^2 + \Delta U_{t5}^2 + \dots + \Delta U_{t13}^2}}{\Delta U_{t1}} = \sqrt{\sum_{k=0}^{n=6k \pm 1} \Delta U_{tn}^{*2}} = \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{n=6k \pm 1} K_n^* \frac{1}{f_n^*} \left(\frac{\gamma_n}{1 + \gamma_n} \right)^2 \left(\frac{1 + \gamma_1}{\gamma_1} \right)^2 \frac{(\cos \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_{t1} f_n^* \sin \varphi_1)^2}{(\cos \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_{t1} \sin \varphi_1)^2}}, \quad (10)$$

где $\Delta U_{t1} = \frac{\sqrt{3} I_{t1} R_{t1} l_t (\cos \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_{t1} \sin \varphi_1)}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%$;

$$I_{t1} = I_{\max} \left(\frac{\gamma_1}{1 + \gamma_1} \right); \quad \operatorname{tg} \varphi_{t1} = X'_{t1} + 0,56R_{t1} + X''_{t1};$$

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение троллей.

На рис. 2 представлены относительные значения токов в системе индукционной подпитки: уголок $50 \times 50 \times 5$ мм с шиной подпитки 80×5 мм для n гармонической составляющей.

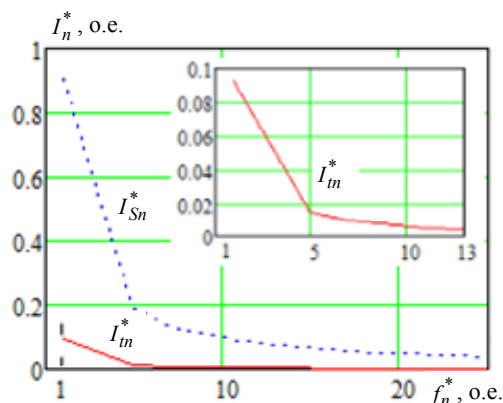


Рис. 2. Зависимости $I_n^* = f(f_n^*)$ для стального уголка $50 \times 50 \times 5$ мм с шиной подпитки 80×5 мм

В табл. 2 приведены относительные значения токов в троллеи выполненной уголком $50 \times 50 \times 5$ мм с шиной подпитки.

Таблица 2

Размер шины, мм	Относительные значения токов					
	Параметр					
	I_{s1}^* , о.е.	$I_{s\Sigma}^*$, о.е.	$I_{sn\Sigma}^*$, $n \geq 5$, о.е.	I_{t1}^* , о.е.	$I_{t\Sigma}^*$, о.е.	$I_{tn\Sigma}^*$, $n \geq 5$, о.е.
20×3	0,781	0,819	0,024	0,219	0,221	0,026
50×3	0,872	0,908	0,252	0,128	0,13	0,021
80×5	0,908	0,943	0,255	0,092	0,094	0,018

Анализ табл. 2 показывает, что с увеличением сечения шины подпитки ток троллей $I_{t\Sigma}^*$ существенно уменьшается, в том числе уменьшается высокочастотная составляющая $I_{tn\Sigma}^*$.

2. Потери напряжения.

Так как троллеи выбираются по допустимой потере напряжения при заданном токе (1), то проверку влияния высших гармонических проводим для троллей.

При наличии высших гармоник относительное увеличение потери напряжения в троллеи относительно потери напряжения на основной гармонике ΔU_{t1} определяется с учетом выражений (1), (9):

Для случая идеального неуправляемого выпрямителя $K_n = 1$, $\cos \varphi_1 \approx 1$, что соответствует выпрямителю с LC-фильтром (коэффициент искажения $v = 0,955$, что соответствует $THD_I = 31,05\%$), потеря напряжения:

$$\Delta U_t^* = \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{n=6k\pm 1} \frac{1}{f_n^*} \left(\frac{\gamma_n}{1+\gamma_n} \right)^2 \left(\frac{1+\gamma_1}{\gamma_1} \right)^2}. \quad (11)$$

Зависимость относительных значений потери напряжения в троллеи с шиной подпитки в функции частоты f_n^* приведены на рис. 3.

Относительные значения ΔU_{15}^* и ΔU_{17}^* составляют около 22 % и 16 % от потери напряжения на основной гармонике, а относительные значения ΔU_{11}^* и ΔU_{125}^* составляют 10 % и 5 % соответственно.

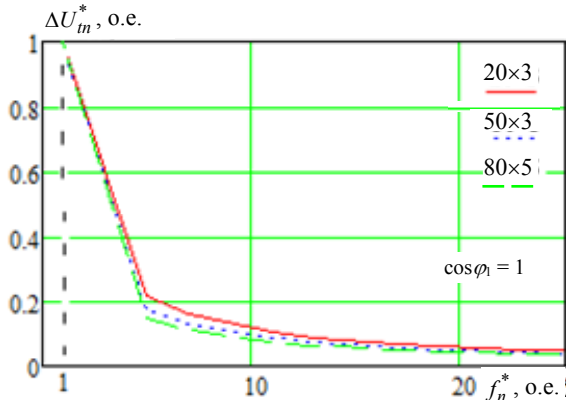


Рис. 3. Зависимости $\Delta U_m^* = f(f_n^*)$ в троллеи с шиной подпитки 20×3, 50×3, 80×5 мм; $\cos\varphi_1 = 1$

Зависимость относительных значений потери напряжения в троллеи с шиной подпитки от частоты f_n^* приведены на рис. 4 при $\cos\varphi_1 = 0,5$.

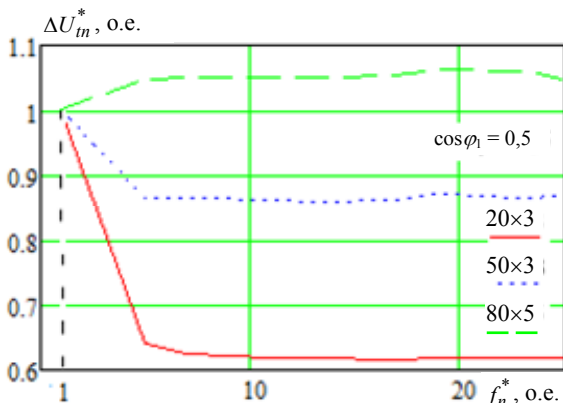


Рис. 4. Зависимости $\Delta U_m^* = f(f_n^*)$ в троллеи с шиной подпитки 20×3, 50×3, 80×5 мм; $\cos\varphi_1 = 0,5$

Как следует из рис. 4 относительные значения потери напряжения ΔU_m^* для $n \geq 5$ гармонических составляющих при $\cos\varphi_1 = 0,5$ существенно возрастают, что объясняется влиянием составляющей $(\cos\varphi_1 + \text{tg}\varphi_{11} \cdot f_n^* \cdot \sin\varphi_1)$ в выражении (10). Отмечается увеличение ΔU_m^* для $n \geq 5$ с увеличением сечения шины подпитки, что вызвано перераспределением соотношения относительных значений токов основной гармоники троллеи I_{11}^* , и высокочастотных составляющих $I_{m\Sigma}^*$. Это соотношение по мере уменьшения сечения шины подпитки возрастает.

В табл. 3 приведены относительные значения потери напряжения в троллеи при $\cos\varphi_1 = \text{var}$, выполненной уголкоем 50×50×5 мм для некоторых сочетаний подпитки при $f_n^* \leq 25$.

Таблица 3

Относительное значение потери напряжения			
шина, мм	20×3	50×3	80×5
$\cos\varphi_1 = 1$	1,051	1,033	1,025
0,9	1,36	1,63	2,081
0,8	1,54	1,91	2,31
0,7	1,69	2,16	2,53
0,6	1,853	2,39	2,83
0,5	2,022	2,65	3,14

Анализ табл. 3 показывает, что относительное значение потери напряжения уголка при $\cos\varphi_1 = 1$ с шиной 20×3 мм увеличивается на 5,1 %, а с шиной 80×5 мм – на 2,5 %. Относительное значение потери напряжения достигает максимального значения при $\cos\varphi_1 = 0,5$: с шиной 20×3 мм увеличивается в 2,022 раза, а с шиной 80×5 мм – в 3,14 раза. Следовательно, ΔU_{\max} в выражении (1) следует уменьшить на соответствующую величину.

Зависимости $\Delta U_t^* = f(\cos\varphi_1)$ в троллеи с шиной подпитки приведены на рис. 5.

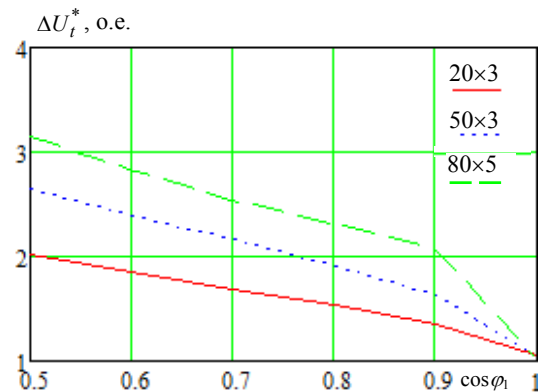


Рис. 5. Зависимости $\Delta U_t^* = f(\cos\varphi_1)$ в троллеи с шиной подпитки 20×3, 50×3, 80×5 мм

Анализ зависимости $\Delta U_t^* = f(\cos\varphi_1)$ для троллеи с шиной подпитки показывает, что с уменьшением $\cos\varphi_1$ значения относительных потерь напряжения в троллеи возрастают с увеличением сечения шины подпитки.

Отметим, что относительное значение потери напряжения в троллеи с шиной подпитки в зависимости от $\cos\varphi_1$ ниже в такой же троллеи без шины подпитки при наличии высших гармоник [6].

3. Потери мощности.

Потери мощности в системе индукционной подпитки имеют две составляющие: потери в троллеи ΔP_t и шине подпитки ΔP_s , которые равны соответственно:

$$\Delta P_t = 3 \cdot \sum_{k=0}^{n=6k\pm 1} R_{tm} I_{tm}^2 \quad \text{и} \quad \Delta P_s = 3 \cdot \sum_{k=0}^{n=6k\pm 1} R_{s1} I_{sn}^2.$$

В относительных единицах потери мощности определяются с учётом выражений (1), (5), (9):

$$\Delta P^* = \Delta P_t^* + \Delta P_s^* = \frac{\Delta P_t + \Delta P_s}{\Delta P_1} = \sum_{k=0}^{n=6k\pm 1} K_n^2 \frac{\sqrt{f_n^*}}{f_n^{*2}} \left(\frac{\gamma_n}{1+\gamma_n} \right)^2 + \frac{R_{s1}}{R_{t1}} \sum_{k=0}^{n=6k\pm 1} \left(\frac{1}{1+\gamma_n} \right)^2 \frac{K_n^2}{f_n^{*2}}, \quad (12)$$

где $\Delta P_1 = 3R_{t1}I_{t1}^2$ – потери в троллеях без подпитки.

Относительные значения потери мощности в системе индукционной подпитки приведены на рис. 6.

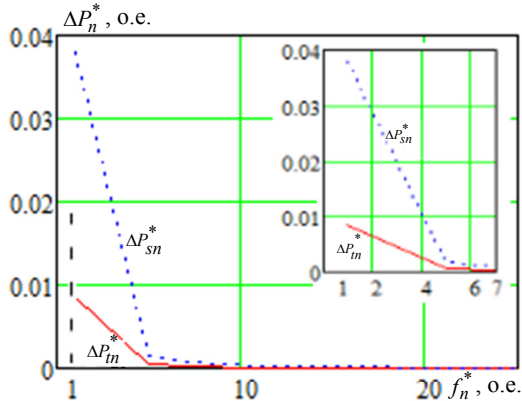


Рис. 6. Зависимости $\Delta P_n^* = f(f_n^*)$ в троллеи с шиной подпитки 80×5 мм

Относительные значения потерь мощности в троллеи с шиной подпитки для идеального неуправляемого выпрямителя $K_n = 1$ сведены в табл. 4.

Таблица 4

Относительные значения потерь мощности

Размер шины, мм	Параметр, о.е.						
	ΔP_{t1}^*	$\Delta P_{m\Sigma}^*, n \geq 5$	ΔP_t^*	ΔP_{s1}^*	$\Delta P_{sn\Sigma}^*, n \geq 5$	ΔP_s^*	ΔP^*
20×3	0,048	0,0018	0,0498	0,189	0,012	0,2	0,248
50×3	0,016	0,0007	0,0167	0,118	0,0061	0,118	0,135
80×5	0,0084	0,00044	0,00884	0,038	0,0018	0,039	0,047

Анализ табл. 4 показывает, что относительно первой гармоники тока системы потери мощности в системах индукционной подпитки ΔP^* уменьшаются в зависимости от сечения шин подпитки в 4; 7,4 и 21,3 раза соответственно. При этом относительные добавочные потери мощности ($\Delta P_{m\Sigma}^* + \Delta P_{sn\Sigma}^*$) составляют 5,5÷4,6 % от полных потерь.

Анализ потерь от высокочастотных составляющих показывает, что основную долю добавочных потерь составляют потери от гармоник $n \leq 7$. Учёт коэффициента K_n^2 , согласно данным [6], приводит к увеличению добавочных потерь примерно в 1,5 раза. Поэтому расчёт потери следует производить с учётом реальных значений высших гармоник, полученных опытным путём [8] либо моделированием [6].

Отметим, что для снижения потерь напряжения и мощности в системах с крановыми установками, которые работают в тяжёлых режимах с большим числом включений, используются относительно дорогие системы безындукционной подпитки, у которых шина подпитки выполнена алюминиевыми проводами, проложенными в трубах [11]. Анализ данных систем подпитки показывает, что при сечении проводов 50-150 мм² и с количеством жил равным 3, индуктивные сопротивления уменьшаются в 2-3 раза. Это приводит, согласно выражению (12), к уменьшению добавочных потерь напряжения и мощности в троллеях. Указанное обстоятельство частично или полностью компенсирует первичные капитальные затраты на построение системы безындукционной подпитки, которые определяются технико-экономическим расчётом.

Предложенная методика расчёта потерь напряжения и мощности может быть использована при расчёте потерь напряжения и мощности в сталеалюминиевых и сталеалюминиевых проводах, применяемых в железнодорожном транспорте и распределительных сетях.

Особенностью систем питания переменным током на железнодорожном транспорте является существенная величина токов 3 и 5 гармоник, которые достигают соответственно 60 и 30 % от основной [13], что существенно влияет на распределение токов и величину добавочных потерь мощности и потери напряжения.

Выводы.

Результаты исследований показывают, что в системах индукционной подпитки благодаря перераспределению токов высших гармонических между шиной подпитки и троллей происходит уменьшение потери напряжения, основных и добавочных потерь мощности.

При определении допустимой потери напряжения следует использовать коэффициент снижения значения допустимой потери напряжения 1,051÷1,025, и 2,022÷3,14 в зависимости от изменения коэффициента мощности в пределах $\cos \varphi_1 = 1,0 \div 0,5$ и в зависимости от сечения шин подпитки, соответственно.

Использование системы индукционной подпитки позволяет снизить полные потери мощности в 4÷21,3 раза в зависимости от сечения, при этом относительные добавочные потери мощности составляют не более 5,5 % от полных потерь мощности.

Предложенная методика расчёта токораспределения, потери напряжения и потери мощности может быть использована и для расчёта режимов сталеалюминиевых и сталеалюминиевых токопроводов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lumbreras D., Gálvez E., Collado A., Zaragoza J. Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: a review. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 21, p. 5792. doi: <https://doi.org/10.3390/en13215792>.
- Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
- Kalair A., Abas N., Kalair A.R., Saleem Z., Khan N. Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 78, pp. 1152-1187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.121>.
- Егоров А.Н., Харитонов Я.С., Шевчук В.А., Семёнов А.С. Влияние высших гармоник на работу преобразователя частоты в условиях подземного рудника. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2020, Т. 331, № 6, С. 141-151. doi: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/6/2683>.
- Zmieva K.A. Modeling of an industrial enterprise power supply system using direct current. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 5, pp. 239-245. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068371215050120>.
- Andrienko P.D., Nemykina O.V., Andrienko A.A. High current harmonics influence on the choice of conductors of crane power supply systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 3, pp. 24-29. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2019.3.04>.
- Андриенко П.Д., Немыкина О.В., Андриенко А.А. Сравнительный анализ крановых электротехнических комплексов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*.

Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, 2019, № 2, С. 3-7. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.2.01>.

8. Proykov M., Simeonova N. Investigation of the influence of current harmonics generated by crane systems on some parameters of the power supply systems. *2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 2021, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/elma52514.2021.9503048>.

9. Semenov A.S., Semenova M.N., Fedorov O.V. The results of the implementation of the system for monitoring the quality of electricity in mining enterprises. *2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, 2019, pp. 644-649. doi: <https://doi.org/10.1109/summa48161.2019.8947601>.

10. Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of electromagnetic parameters and phase relations in turbo-generators by the automated calculation of the magnetic field in the software environment FEMM. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 1, pp. 26-32. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.1.05>.

11. Бенерман В.И., Ловцкий Н.Н. Проектирование силового электрооборудования промышленных предприятий. – М.-Л.: ГЭИ, 1960. – 385 с.

12. Shevyrev Y.V., Pichuev A.V., Shevyreva N.Y. Improving energy performance in networks with semiconductor converters. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2019, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/icieam.2019.8743020>.

13. Сиченко В.Г., Кузнецов В.Г., Босий Д.О., Саблін О.І. Енергетика тягових мереж : монографія. – Дніпро : ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. – 210 с. doi: <https://doi.org/10.15802/978-617-73-82-04-0>.

REFERENCES

1. Lumberras D., Gálvez E., Collado A., Zaragoza J. Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: a review. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 21, p. 5792. doi: <https://doi.org/10.3390/en13215792>.

2. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva i ikh kontrol na promyshlennykh predpriyatiyah* [Quality indicators and their control at industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p. (Rus).

3. Kalair A., Abas N., Kalair A.R., Saleem Z., Khan N. Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 78, pp. 1152-1187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.121>.

4. Egorov A.N., Kharitonov Y.S., Shevchuk V.A., Semenov A.S. Influence of high harmonics on a frequency converter operation in underground mining. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 6, pp. 141-151. (Rus). doi: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/6/2683>.

5. Zmieva K.A. Modeling of an industrial enterprise power supply system using direct current. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 5, pp. 239-245. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068371215050120>.

6. Andrienko P.D., Nemykina O.V., Andrienko A.A. High current harmonics influence on the choice of conductors of crane power supply systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 3, pp. 24-29. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2019.3.04>.

7. Andrienko P.D., Nemykina O.V., Andrienko A.A. Comparative analysis of crane electrotechnical complexes. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 2019, no. 2, pp. 3-7. (Rus). doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.2.01>.

8. Proykov M., Simeonova N. Investigation of the influence of current harmonics generated by crane systems on some parameters of the power supply systems. *2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 2021, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/elma52514.2021.9503048>.

9. Semenov A.S., Semenova M.N., Fedorov O.V. The results of the implementation of the system for monitoring the quality of electricity in mining enterprises. *2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, 2019, pp. 644-649. doi: <https://doi.org/10.1109/summa48161.2019.8947601>.

10. Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of electromagnetic parameters and phase relations in turbo-generators by the automated calculation of the magnetic field in the software environment FEMM. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 1, pp. 26-32. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.1.05>.

11. Бенерман В.И., Ловцкий Н.Н. *Проектирование силового электрооборудования промышленных предприятий* [Design of power electrical equipment for industrial enterprises]. Moscow-Leningrad, GEI Publ., 1960. 385 p. (Rus).

12. Shevyrev Y.V., Pichuev A.V., Shevyreva N.Y. Improving energy performance in networks with semiconductor converters. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2019, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/icieam.2019.8743020>.

13. Sychenko V.H., Kuznetsov V.H., Bosyi D.O., Sablin O.I. *Enerhetyka tiahovykh merezh* [Power engineering of traction networks]. Dnipro, Standart-Servis Publ., 2017. 210 p. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15802/978-617-73-82-04-0>.

Надійшла (Received) 11.07.2021

Прийнята (Accepted) 23.09.2020

Опублікована (Published) 26.10.2021

Андрієнко Петро Дмитрієвич¹, д.т.н., проф.,
Нємыкіна Ольга Владиміровна¹, к.т.н., доц.,
Андрієнко Андрєй Андрєєвич¹, аспірант,
Мохнач Річард Едуардович¹,

¹ Національний університет «Запорізька Політехніка»,
69063, Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.

e-mail: andrpd@ukr.net (Corresponding author),

olganemikina@ukr.net,

vamoseandrey@mail.ru,

etkmpk@gmail.com

P.D. Andrienko¹, O.V. Nemykina¹, A.A. Andrienko¹, R.E. Mokhnach¹

¹Zaporizhzhia Polytechnic National University,
64, Zhukovsky Str., Zaporizhzhia, Ukraine, 69063.

Research of operating modes of conductors in power supply systems of cranes with induction feed, taking into account the influence of higher harmonics of the current.

Purpose. Investigation of the influence of higher harmonics of current on current distribution, voltage and power losses in the supply systems of crane trolleys and development of a calculation method for practical use. **Methodology.** The analytical method and the results of the modeling method were used for research.

Results. Analytical relationships have been obtained that make it possible to determine the current distribution, voltage and power losses in the systems of induction feeding of crane trolleys, taking into account the composition and amplitude of the higher harmonics of the current. **Originality.** For the first time, analytical dependences are obtained that take into account the effect of changing the trolley parameters on the frequency in the feed systems. Numerical values have been determined for the most commonly used induction feed systems for cranes. It is shown that with an increase in the cross-section of the feed bar there is a decrease in the main, and especially additional, losses. **Practical value.** Theoretical relationships have been obtained that can be used to calculate the optimization of induction feed systems in the presence of higher harmonic currents arising in power systems during operation of crane semiconductor controlled electric drives. References 13, tables 4, figures 6.

Key words: induction feed system, trolleys, feed bus, current distribution, power and voltage losses.