

## II. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.019:62.83

І. В. Авдєєв<sup>1</sup>, О. В. Немикіна<sup>2</sup>, О. М. Климко<sup>3</sup>, В. Л. Пріхно<sup>4</sup>, В. В. Баранець<sup>5</sup>

<sup>1,3</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорізького національного технічного університету

<sup>2</sup>Асистент Запорізького національного технічного університету

<sup>4</sup>Старший викладач Запорізького національного технічного університету

<sup>5</sup>Студент Запорізького національного технічного університету

### ВПЛИВ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВХІДНОЇ ІНДУКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ, ЩО ЖИВИТЬ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ПРИВОД

У зв'язку із застосуванням частотно-регульованих приводів спостерігається генерація у живлячу мережу вищих гармонійних складових, тому визначення значення вищих гармонійних складових кривої струму та напруги та засобів для їх зниження згідно з ГОСТ 13109-97 є актуальною та затребуваною практикою.

**Ключові слова:** 4qs-перетворювач, вищі гармоніки, живильна мережа, коефіцієнт спотворення, діод, IGBT-транзистор, математична модель, вхідний дросель.

#### ВСТУП

Позитивний досвід ряду портів України, Росії, держав Балтики свідчить про техніко-економічну доцільність модернізації існуючого парку кранів, основна мета якої полягає в заміні системи релейно-контакторного керування на систему частотного керування асинхронного електропривода механізмів. В результаті модернізації істотно знижуються динамічні навантаження на металоконструкції кранів і кінематичні ланки, що дозволяє продовжити їх строк служби при зменшенні витрат на поточний ремонт і обслуговування. Існуючі системи керування крановим електроприводом на основі релейно-контакторного керування характеризуються нераціональним споживанням енергії. Перехід на частотне керування приводними двигунами підйомно-транспортних механізмів (ПТМ) дозволяє суттєво знизити споживання енергії в пуско-гальмівних режимах (ППР), які для електроприводів ПТМ є основними [1].

Для отримання максимального енергозберігаючого ефекту та забезпечення електромагнітної сумісності з мережею живлення перетворювачі частоти (ПЧ) необхідно оснащувати мережними дроселями.

#### ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виникає необхідність дослідження електромагнітної сумісності частотно-регульованого приводу з мережею живлення та забезпечення нормованих показників якості електроенергії.

#### МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Загальний рекуперативний випрямляч виконаний на діодах, шунтованих IGBT транзисторами за трифазною мостовою схемою. Керування IGBT транзисторами виконується синхронно з відповідними діодами (по першій

гармонійній складовій), тобто перетворювач стає «прозорим» і обмін енергією відбувається в залежності від напруги джерела живлення і конденсатора фільтра [1]. Потужність загального рекуперативного випрямляча вибирається за сумарною потужністю двигунів, що підлягають модернізації (двигун підйому, двигун повороту, двигун вильоту стріли).

Для побудови моделі та отримання числових характеристик мережі живлення складено її схему заміщення, куди входить трансформатор, кабельна лінія, шинопровід (рис. 1).

Живлення порталного крану здійснюється від однотрансформаторної КТП з трансформатором ТМ-1600/10 через кабельну лінію АБ 6(3x120+1x50) та магістральний шинопровід ШМА4-2500 за схемою блок «трансформатор-магістраль». Система задана нескінченною потужністю. Сумарний активний та індуктивний опори мережі живлення:

$$R_{\Sigma} = 5,62 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \quad X_{\Sigma} = 7,06 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Ці опори були приведені до базисних умов:

$$R'_{\Sigma} = R_{\Sigma} \cdot \frac{S_{\text{ПЧ}}}{S_T} = 1,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \quad (1)$$

$$X'_{\Sigma} = X_{\Sigma} \cdot \frac{S_{\text{ПЧ}}}{S_T} = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \quad (2)$$

де  $S_{\text{ПЧ}}$  – повна потужність, що споживається з мережі системою ПЧ-АД, кВА;  $S_T$  – повна потужність трансформатора, кВА.

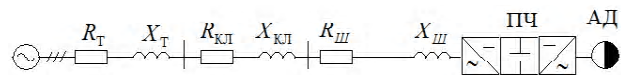


Рис. 1. Схема заміщення мережі

За базисні умови було прийнято потужність перетворювача частоти та діючу фазну напругу  $S_6 = S_{ПЧ}$ ,  $U_6 = U_{д.ф.} = 220 \text{ В}$ .

Повна потужність ПЧ

$$S_{ПЧ} = \frac{P_{ПЧ}}{PF}, \quad (3)$$

$$S_{ПЧ} = \frac{320}{0,6} = 533 \text{ кВА},$$

$$PF = \frac{I_1}{I_{\Sigma}} = \frac{I_1}{\sum_{n=0}^{40} I_n^2} \cdot \cos \varphi_1, \quad (4)$$

де  $PF$  – коефіцієнт потужності системи ПЧ-АД,  $PF=0,6$ ;  $P_{ПЧ}$  – активна потужність, що споживається з мережі системою ПЧ-АД;  $I_1$  – діюче значення першої гармоніки струму;  $I_{\Sigma}$  – діюче значення струму, що споживається з мережі системою ПЧ-АД;  $I_n$  – діюче значення  $n$ -гармонійної складової струму живлення  $n=1, 5, 7, 11, 13, 17, 19$  і т. д.;  $\cos \varphi_1$  – коефіцієнт потужності при живленні АД від промислової мережі  $\cos \varphi_1 = 0,95$ .

Активний та індуктивний опір у відносних одиницях

$$X'_{\Sigma} = \frac{X'_{\Sigma}}{(U_{д.ф.})^2} \cdot \frac{S_{ПЧ}}{10^{-3}} \cdot 100 \% = 2,58 \%, \quad (5)$$

$$R'_{\Sigma} = \frac{R'_{\Sigma}}{(U_{д.ф.})^2} \cdot \frac{S_{ПЧ}}{10^{-3}} \cdot 100 \% = 2 \%. \quad (6)$$

Із формули (4) видно, що чим більше діюче значення вищих гармонік, тим гірший коефіцієнт потужності. Істотно подавляє вищі гармоніки реактивний опір мережі живлення. Аналіз електромагнітних процесів був виконаний для різних значень реактивного опору мережі живлення, розбитого на чотири етапи: 1) до  $3,3 \% U_{кз}$ ; 2) до  $6,6 \% U_{кз}$ ; 3) до  $10 \%$ ; 4) до  $13,3 \%$ .

Максимальний реактивний опір  $13,3 \% U_{кз}$  був перевірений на допустимий спад напруги на ньому при максимальному струмі [4]

$$X'_{\Sigma} \cdot I_{\max} \leq 5\% \cdot U_{д.ф.}$$

Далі збільшувати індуктивний опір недоцільно, тому що це призводить до збільшення спаду напруги на дроселі ( $>5-10 \% U_{ном}$ ).

Аналітичне дослідження електромагнітних процесів викликає ускладнення, тому розрахунки були проведені в середовищі MatLAB/Simulink, рис. 2. Шаг дискретизації

обирається рівним  $10^{-6}$  с. Показання напруги та струму в колі випрямленого струму визначаються за допомогою приладів  $U_{zpt}$  та  $I_{zpt}$ . Внаслідок симетрії мережі вимірювання проводяться для однієї фази (фаза А). Розкладення в ряд Фур'є було проведено за допомогою FFT-аналізу. Керування IGBT транзисторами здійснюється за допомогою fsp-функції. АІН-ШІМ замінений джерелом струму, що працює в режимі споживання або генерації. Високочастотна пульсація струму не враховується через її незначність. Номінальний струм в випрямному режимі та в режимі рекуперації був розрахований із циклограми навантаження [3]. Максимальний струм визначається із переважувальної здатності інвертора. Дослідження проводяться при номінальному струмі.

На рис. 3 наведена узагальнена залежність величини гармонійних складових і сумарного вхідного струму системи ПЧ-АД від індуктивного опору мережі живлення, приведенного до потужності ПЧ при номінальному струмі у випрямному режимі.

Збільшення індуктивного опору до  $3,3 \% U_{кз}$  не суттєво зменшує рівні вищих гармонійних складових струму живильної мережі. При  $10 \% U_{кз}$  вони пригнічуються в значній мірі, а діюче значення сумарного струму наближується до величини струму основної гармоніки. При подальшому збільшенні індуктивного опору пригнічення гармонійних складових відбувається в незначній мірі.

Вищі гармоніки в струмі живильної мережі викликають спотворення синусоїдної кривої напруги, що регламентується ГОСТ 13109-97 [1].

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}{U_1}} \cdot 100 \leq 8 \%, \quad (7)$$

де  $K_U$  – коефіцієнт спотворення синусоїдної кривої напруги,  $U_n$  – діюче значення напруги  $n$ -ої гармоніки,  $U_1$  – діюче значення напруги основної частоти.

Значення вищих гармонійних в кривій напруги на вході ПЧ в залежності від індуктивності живильної мережі при номінальному струмі в режимі випрямлення наведені на рис. 4.

Значення вищих гармонійних в кривій напруги на вході ПЧ в залежності від індуктивності живильної мережі при номінальному струмі в режимі рекуперації електричної енергії наведені на рис. 5.

На рис. 6, 7 наведені криві струму ( $i_A$ ) та напруги ( $u_A$ ) у фазі А для одного періоду при рекупераційному гальмуванні для індуктивного опору  $6,6 \% U_{кз}$ .

Коефіцієнти  $n$ -их гармонійних складових та коефіцієнти спотворення синусоїдної кривої напруги для номінального струму навантаження в режимі споживання та в режимі рекуперації електричної енергії при різних значеннях вхідного індуктивного опору та їх нормоване значення [2] наведені в табл. 1 та табл. 2.

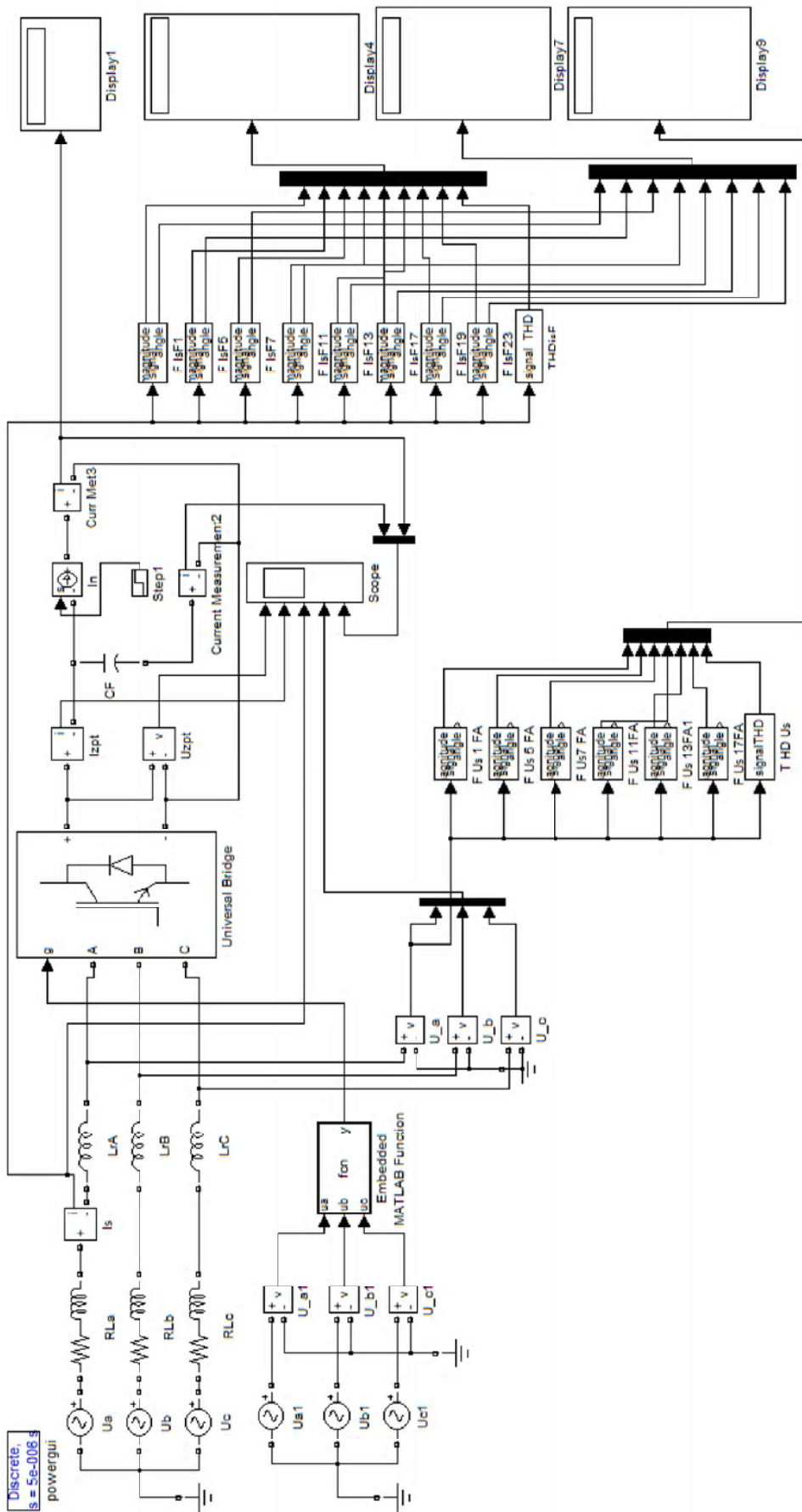


Рис. 2. Модель в середовищі MatLAB/Simulink

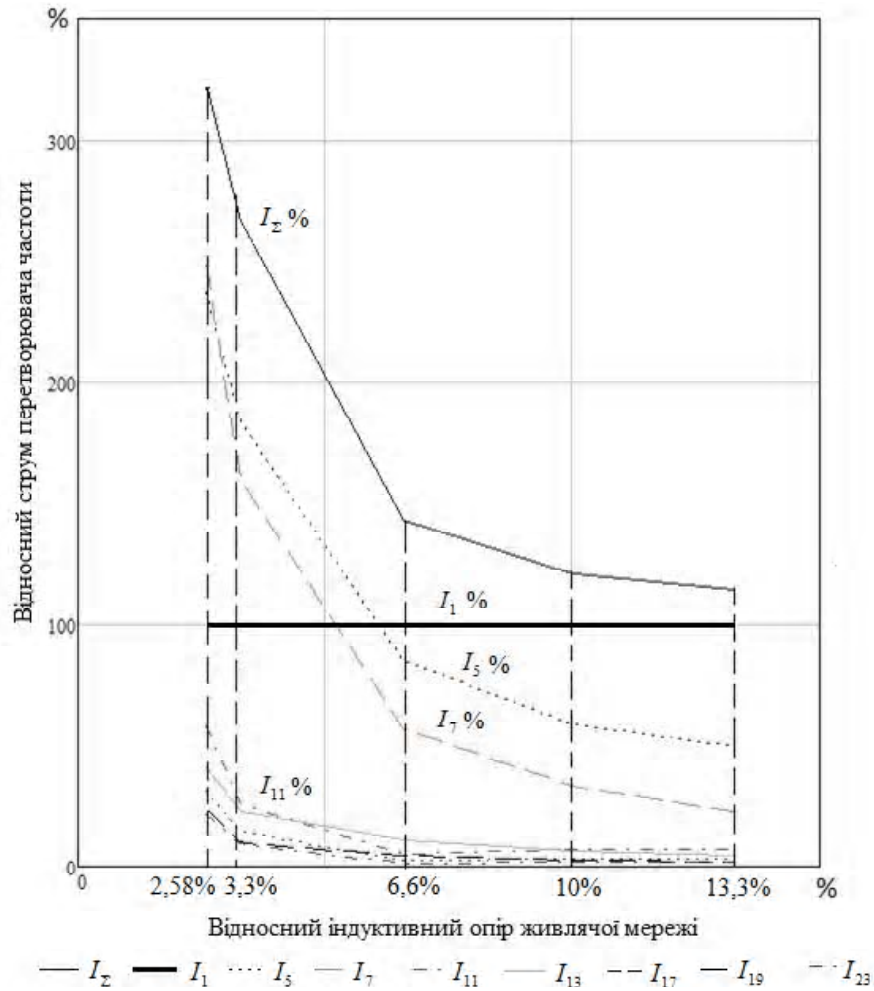


Рис. 3. Залежність відносного сумарного струму ПЧ ( $\frac{I_{\Sigma}}{I_1} \cdot 100\%$ ) і його гармонійних складових ( $\frac{I_n}{I_1} \cdot 100\%$ ) від відносного індуктивного опору живильної мережі

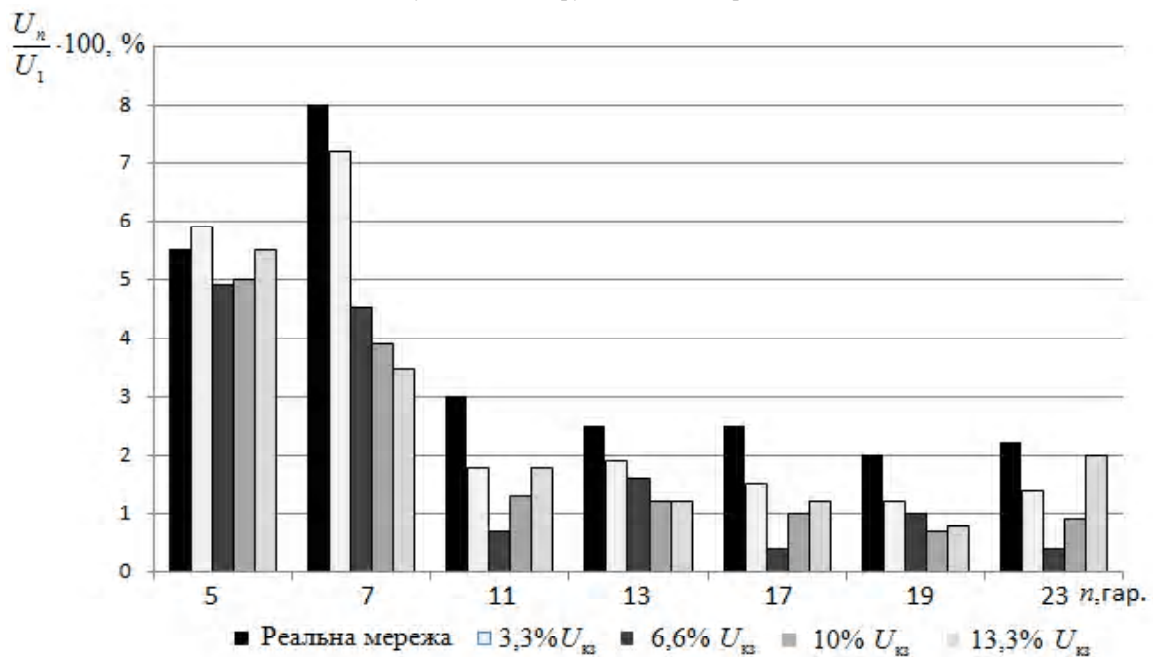
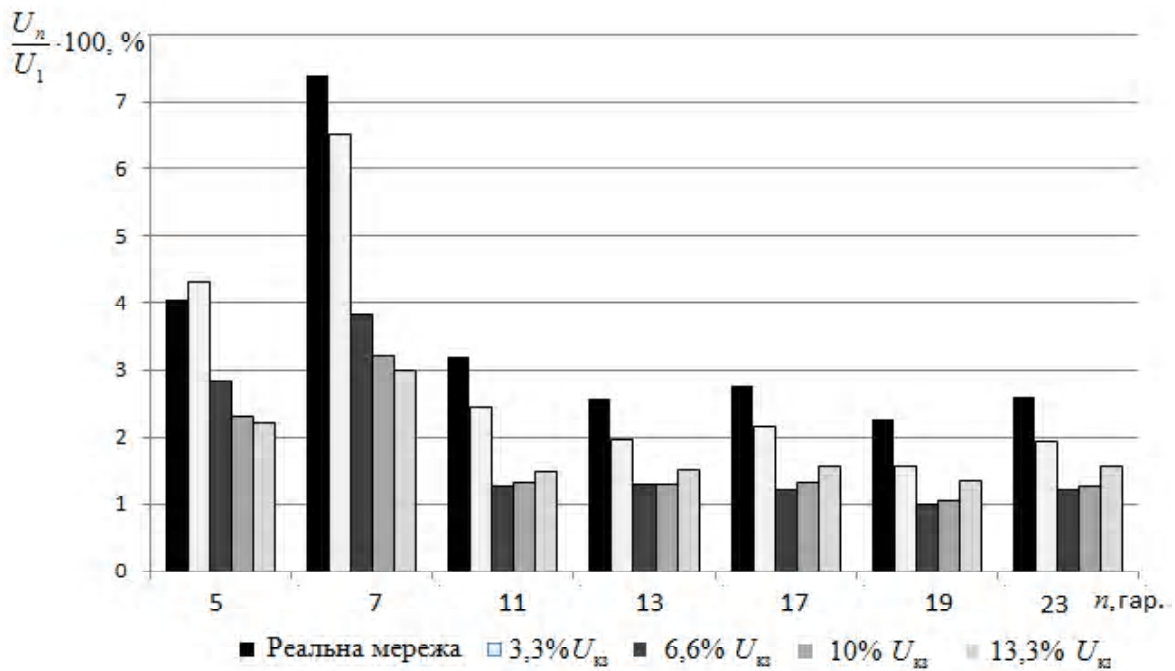


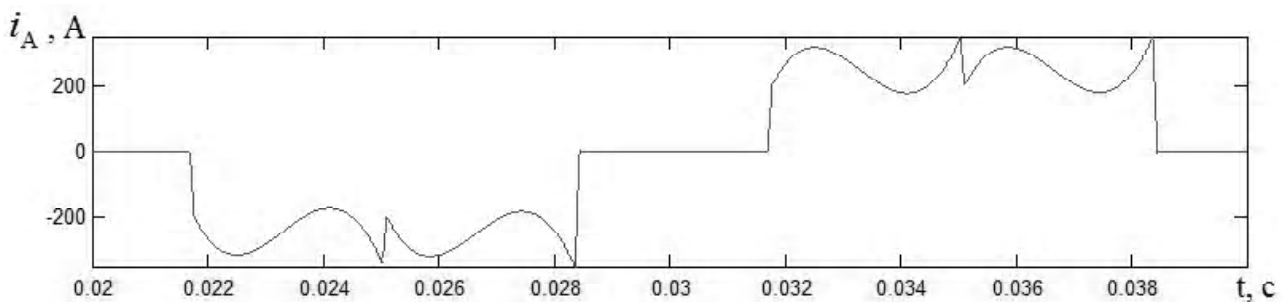
Рис. 4. Рівні вищих гармонійних складових струму живильної мережі у випрямному режимі

**Таблиця 1.** Коефіцієнти  $n$ -их гармонійних складових  $K_{U(n)}$  та коефіцієнти спотворення синусоїдної кривої напруги  $K_U$  для номінального струму навантаження в режимі споживання електричної енергії при різних значеннях вхідного індуктивного опору

№ гарм.	$K_{U(n)}, \%$					ГОСТ-13109-97
	$x_{\Sigma} = 2,58 \%$	$x_{\Sigma} = 3,3 \%$	$x_{\Sigma} = 6,6 \%$	$x_{\Sigma} = 10 \%$	$x_{\Sigma} = 13,3 \%$	
5	5,52	5,90	4,92	5,00	5,52	6,0
7	8,00	7,21	4,50	3,90	3,51	5,0
11	3,05	1,80	0,74	1,30	1,78	3,5
13	2,48	1,90	1,59	1,20	1,20	3,0
17	2,50	1,52	0,42	1,01	1,20	2,0
19	2,00	1,19	1,00	0,71	0,78	1,5
23	2,21	1,40	0,42	0,90	1,98	1,5
25	1,94	1,04	0,61	0,48	0,70	1,5
29	2,15	1,28	0,37	0,77	0,82	1,32
31	1,96	0,97	0,42	0,45	0,69	1,25
35	2,10	1,25	0,36	0,65	0,60	1,13
37	1,97	0,92	0,31	0,48	0,66	1,07
$K_U, \%$	17,68	14,67	7,17	7,19	7,60	8,0



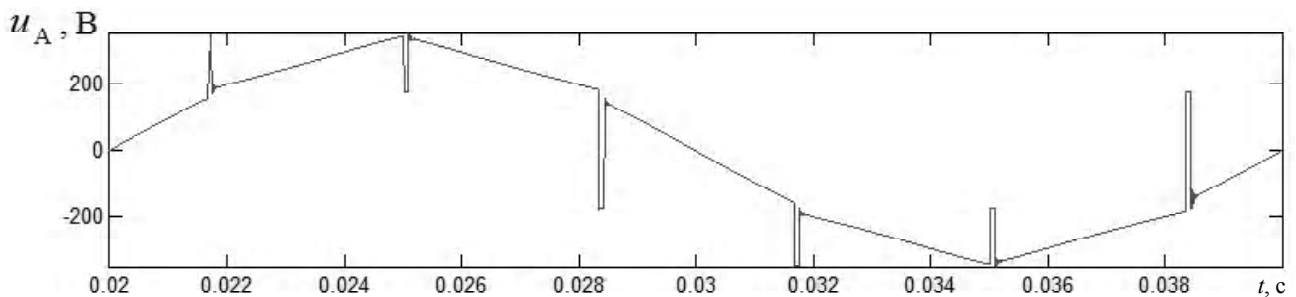
**Рис. 5.** Рівні вищих гармонійних складових струму живильної мережі в режимі рекуперації електричної енергії



**Рис. 6.** Зображення кривої струму при рекуперативному гальмуванні

**Таблиця 2.** Коефіцієнти  $n$ -их гармонійних складових  $K_{U(n)}$  та коефіцієнти спотворення синусоїдної кривої напруги  $K_U$  для номінального струму навантаження в режимі рекуперації електричної енергії при різних значеннях вхідного індуктивного опору

№ гарм.	$K_{U(n)}, \%$					ГОСТ-13109.97
	$x_{\Sigma}=2,58 \%$	$x_{\Sigma}=3,3 \%$	$x_{\Sigma}=6,6 \%$	$x_{\Sigma}=10 \%$	$x_{\Sigma}=13,3 \%$	
5	4,05	4,30	2,84	2,32	2,20	6,0
7	7,38	6,51	3,82	3,20	3,00	5,0
11	3,19	2,45	1,27	1,31	1,49	3,5
13	2,56	1,97	1,28	1,30	1,50	3,0
17	2,75	2,15	1,20	1,33	1,57	2,0
19	2,26	1,57	1,00	1,06	1,36	1,5
23	2,59	1,94	1,20	1,27	1,57	1,5
25	2,28	1,53	0,89	1,09	1,35	1,5
29	2,49	1,88	1,11	1,30	1,55	1,32
31	2,28	1,49	0,89	1,11	1,35	1,25
35	2,45	1,79	1,11	1,30	1,53	1,13
37	2,22	1,54	0,90	1,07	1,36	1,07
$K_U, \%$	18,07	16,15	7,90	10,94	13,09	8,0



**Рис. 7.** Зображення кривої напруги при рекуперативному гальмуванні

### ВИСНОВОК

Коефіцієнти спотворення синусоїдної кривої напруги в режимі споживання електричної енергії при  $x_{\Sigma}=2,58 \%$   $U_{кз}$  і  $x_{\Sigma}=3,3 \%$   $U_{кз}$  не відповідають вимогам ГОСТ 13109-97, а при  $x_{\Sigma}=6,6 \%$   $U_{кз}$  і вище відповідають вимогам, але мінімальне значення коефіцієнта спотворення синусоїдної кривої напруги спостерігається при  $x_{\Sigma}=6,6 \%$   $U_{кз}$  та при  $x_{\Sigma}=10 \%$   $U_{кз}$ . При подальшому збільшенні індуктивного опору спостерігається незначне збільшення коефіцієнтів  $n$ -их гармонійних складових і коефіцієнтів спотворення синусоїдної кривої напруги. Остаточний вибір дроселя із ряду індуктивного опору  $x_{\Sigma}=6,6 \%$   $U_{кз}$ ,  $x_{\Sigma}=10 \%$   $U_{кз}$ ,  $x_{\Sigma}=13,3 \%$   $U_{кз}$  проводиться на основі техніко-економічного порівняння. Порівнюючи коефіцієнти спотворення при рекуперативному гальмуванні з наведеними в ГОСТ 13109-97, бачимо, що оптимальним індуктивним опором живильної мережі є  $x_{\Sigma}=6,6 \%$   $U_{кз}$ . При подальшому збільшенні індуктивного опору значення коефіцієнта спотворення синусоїдної

кривої напруги значно збільшується у зв'язку зі збільшенням кута комутації IGBT транзисторів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андриенко, П. Д. Анализ электромагнитных процессов выпрямительно-инверторного преобразователя на математической модели / П. Д. Андриенко, О. В. Немыкина // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2004. – Ч. 6. – С. 122–125.
2. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97. – Введ. в Украине с 01.01.2000.
3. Андриенко, П. Д. Разработка модели выпрямителя с рекуперацией для группового питания электроприемников / П. Д. Андриенко, А. Н. Клишко, А. А. Шрам, О. В. Немыкина // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика : Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 28. – С. 438–439.

4. Лукевски, М. Повышение энергосбережения электроприводов переменного тока с преобразователями частоты за счет использования дросселей фирмы ELHAND TRFNSFORMANORY / М. Лукевски, А. Осетер, А. Хебровски, В. И. Ткачук, Б. Л. Копчак

// Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика : Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 30. – С. 489–492.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2011.  
Після доробки 17.05.2011.

**И. В. Авдеев, О. В. Немыкина, А. Н. Климко, В. Л. Прихно, В. В. Баранец**  
**Влияние на показатели качества электроэнергии входной индуктивности сети, питающей частотно-регулируемый привод**

*В связи с применением частотно-регулируемых приводов наблюдается генерация в питающую сеть высших гармонических составляющих, поэтому определение значения гармонических составляющих в кривой тока и напряжения и средств их снижения в соответствии с ГОСТ 13109-97 является актуальной и востребованной практикой.*

**Ключевые слова:** 4qs-преобразователь, высшие гармоники, питающая сеть, коэффициент искажения, диод, igbt-транзистор, математическая модель, входной дроссель.

**I. V. Avdeev, O. V. Nemykina, A. N. Klymko, V. L. Prihno, V. V. Baranets**  
**Influence of input inductance of mains supplying frequency-controlled drive on power quality**  
*When frequency-controlled drives are used, higher harmonic components are generated in the mains supply, so determination of harmonic components value in the current and voltage curve and of means for their reduction according to ГОСТ 13109-97 is an urgent and relevant practice.*

**Key words:** 4qs-converter, higher harmonics, mains, distortion factor, diode, igbt-transistor, mathematical model, input choke.

УДК 621.316.11

Д. В. Федоша

Аспирант Запорожского национального технического университета

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*Предложен метод оптимального проектирования систем электроснабжения, основанный на методе эквипотенциальных контуров, реализующий одновременное решение задач определения числа узлов нагрузки, распределения между ними электроприемников, определение конструктивного исполнения источников питания, учитывающий дискретность конструктивного исполнения элементов системы, а также позволяющий минимизировать субъективную оценку проектировщика при формировании структуры сети.*

**Ключевые слова:** сеть, система электроснабжения, узел нагрузки, проектирование, топология, электроприемник, источник питания.

Оптимальное проектирование систем электроснабжения предполагает одновременное решение задач определения числа узлов нагрузки, распределения между ними электроприемников, определение конструктивного исполнения (мощности) источников питания (рис. 1); учета дискретности конструктивного исполнения элементов системы электроснабжения; минимизации субъективной оценки проектировщика при определении структуры сети [1].

Особенно это актуально для цеховых систем электроснабжения, имеющих в своем составе сети 0,4 кВ, из за их значительной протяженности при малой площади цеха и, как следствие, значительных потерь в них.

Однако используемые в настоящее время методы проектирования таких систем электроснабжения осуществляют решение этих задач по отдельности, что не дает возможности говорить об оптимальности получаемых решений [2].

Анализ существующих подходов к формированию структуры систем электроснабжения показал, что существует метод, способный решать выше перечисленные задачи одновременно – это метод эквипотенциальных контуров, с определенными доработками [3].

Для формализации процесса выбора конструктивного исполнения источника питания были введены понятия отбора электроприемников по «потенциальному» и «техническому» критериям.

Основой «потенциального» критерия является выражение (1), которое определяет значение потенциальной поверхности в точке с заданными координатами.

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{-1 \cdot \alpha_{\Delta P_i} \cdot \text{Трасса}(i, x, y)}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – мощность  $i$ -го электроприемника;  $x, y$  – координаты, в которых определяться значение потенциальной повер-