

УДК 62-83:621.313.3

Майстренко Л.Ю., магістрант,
Дубовик В.Г., ст. викл. науковий керівник.
Кафедра автоматизації управління електротехнічними комплексами

ЕНЕРГЕТИЧНІ РЕЖИМИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ

У статті представлено результати досліджень режимів частотного асинхронного електроприводу, проведено оцінювання інтервалів енергоефективної його роботи шляхом використання моніторингу значень параметрів та їх аналізу з використанням експериментально-дослідницького стенда.

Ключові слова: електропривод, асинхронний двигун, енергоефективність.

The article presents the results of studies of the modes of frequency asynchronous electric drive, the estimation of the intervals of energy efficient operation by using the monitoring of parameter values and their analysis with the use of an experimental research stand.

Keywords: electric drive, asynchronous motor, energy efficiency.

Численні публікації і конструкторські розробки показують, що розширення застосування регульованих електроприводів за допомогою перетворювачів частоти (ПЧ) приводить до появи в мережі живлення вищих гармонік та додаткових втрат енергії. Обмін енергією між мережею живлення й навантаженням, реалізація спеціальних режимів керування потоком електроенергії від джерела до приймача й у зворотньому напрямку дозволяють впливати на показники якості електроенергії засобами перетворювальної техніки.

Проблема енергозбереження здобуває особливу актуальність і має велике практичне значення. Оскільки електроприводи споживають більше 60% вироблюваної електроенергії, то підвищення їх енергоефективності є дуже важливими та актуальними питаннями в сучасних умовах.

Метою роботи є дослідження режимів частотного асинхронного електроприводу, оцінювання інтервалів енергоефективної його роботи шляхом проведення досліджень з використанням експериментально-дослідницького стенда.

Експериментально-дослідницький стенд, дозволяє здійснювати дослідження енергетичних режимів системи електроприводу ПЧ-АД шляхом вимірювання реальних параметрів її роботи, а також оцінити усталені уявлення про енергоефективність та потенціал енергозбереження. Для виконання досліджень використовувалось програмне забезпечення. Вимірювання значень електричних параметрів у ланцюгах напруги живлення проводились за допомогою вимірювача параметрів мережі, який дозволяє контролювати фазні й лінійні напруги, струми, потужність й інші параметри. За допомогою програми «Oscilloscope», яка являє собою віртуальний осцилограф, забезпечується візуалізація сигналів з виходів двох датчиків струму на ефекті Хола, що встановлені, відповідно, на вході та виході ПЧ.

Активна потужність P_p дорівнює середньому значенню миттєвої потужності за період зміни живлячої напруги й визначає кількість електромагнітної енергії, що незворотно перетворюється в інші форми енергії.

Повна потужність S завжди більше активної, фактично переданої навантаженню, через існування неактивних складових потужності, які не створюють корисного ефекту, приводять у той же час до збільшення втрат у живильній мережі й у джерелі живлення [1].

За результатами проведення вимірювань визначають значення споживаної енергії за значеннями активної електричної потужності, а також трьох складових: реактивна потужність, потужність спотворень й потужність несиметрії.

Потужність спотворень D_u обумовлена вищими гармоніками струму. Середнє значення миттєвої потужності, пов'язаної із цими гармоніками, за період дорівнює нулю, однак вона викликає додаткові втрати енергії в мережі. Потужність несиметрії T ураховує додаткові втрати енергії, викликані нерівномірним розподілом струмів по фазах.

Можна визначати S і D_u по співвідношеннях:

$$\begin{aligned} S &= U_{RMS} \cdot I_{RMS} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D_u} \\ D_u &= \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}. \end{aligned} \quad (1),$$

де S – повна електрична потужність, P – активна потужність, Q – реактивна потужність, D_u – потужність спотворень, U_{RMS} , I_{RMS} – діючі значення напруги, струму джерела живлення.

Потужність спотворень можна також визначити по виразу

$$D_u = k_{THD} U_{RMS} I_{RMS} = 0,5 k_{THD} U_1 I_1, \quad (2),$$

де U_{RMS} , I_{RMS} — діючі значення першої гармоніки напруги й струм первинного джерела живлення, U_1 , I_1 — амплітудні значення першої гармоніки напруги й струму первинного джерела живлення, k_{THD} — коефіцієнт несинусоїдальності, $k_{THD} = I_{\Sigma} / I_1$, де I_1 — ефективне значення струму першої гармоніки, I_{Σ} — ефективний струм всіх вищих гармонік.

Використання в складі електропривода перетворювача частоти дозволяє:

- підмикати асинхронний електродвигун до перетворювача частоти в необхідному діапазоні частот обертання;
- одержати високе, близьке до одиниці значення коефіцієнта активної потужності PF (power factor) в усіх режимах роботи;
- одержати близький до синусоїди вихідний струм;
- забезпечити високі динамічні показники електропривода, обумовлені високою швидкодією ШІМ керування.
- збільшити термін служби двигуна й механізму навантаження;
- забезпечити м'який, програмований пуск двигуна;
- забезпечити можливість автоматизації й керування.

Були проведені вимірювання параметрів в електричних ланцюгах перетворювача частоти на експериментально-дослідницькому стенді за різних навантажень за допомогою програми віртуального осцилографа «Oscilloscope». Це дозволило одержати графіки зміни струму та визначити коефіцієнти несинусоїдальності THD_I на вході та виході ПЧ. Ця програма дозволяє одержувати Excel файли графіків.

Гармонійний склад вхідного струму випрямляча приведений на рис. 1, де видно відносні амплітуди гармонік, починаючи з другої.

Крім канонічних гармонік, вхідні струми частотного електропривода містять складові, частота яких не кратна частоті основної гармоніки, так звані інтергармонік. Ці складові проходять через ПЧ з ланцюга статора. Особливо істотно це проявляється в ПЧ на основі циклоконвертера та складає суттєвий їх недолік. В сучасних ПЧ з ШІМ це явище повністю не усунуте. Вхідні струми електропривода і напруги на шинах вузла навантаження не є періодичними процесами через інтергармонік. Як приклад, на рис. 2 показана частина спектра відхилення напруги в вузлі навантаження при роботі електропривода на основі інвертора струму з ШІМ випрямлячем і вхідним фільтром.

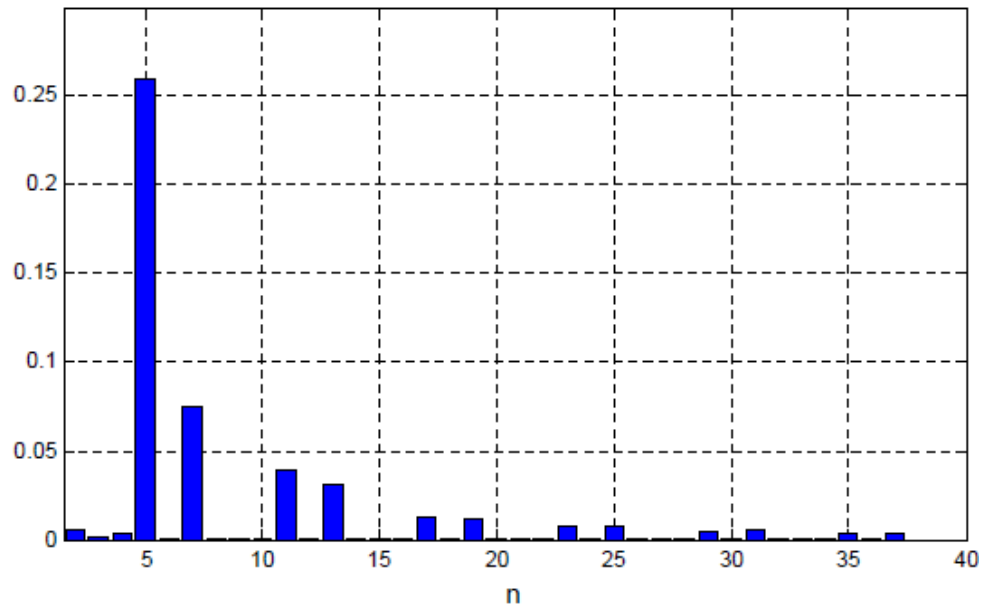


Рисунок 1 - Гармонійний склад вхідного струму випрямляча.

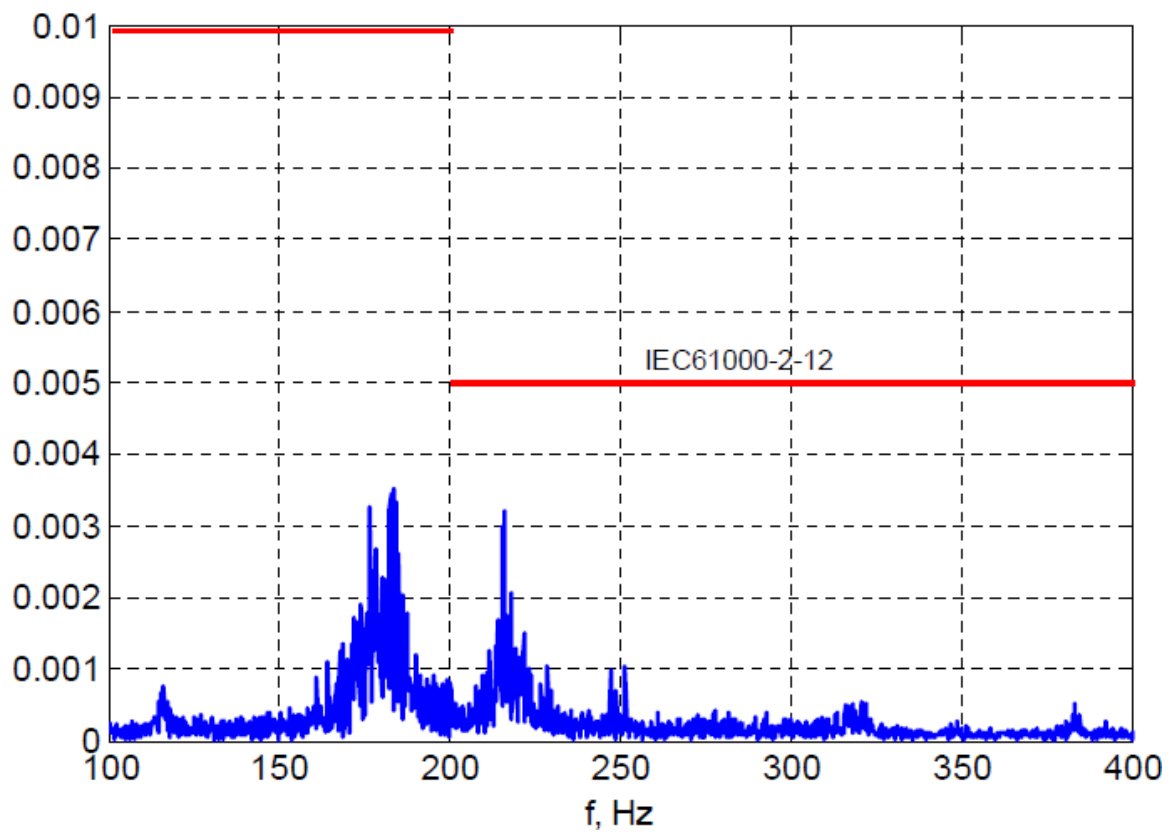


Рисунок 2 – Графік зміни спектра напруги

Графіки зміни струму мережі живлення при холостому ході на вході однієї фази на виході перетворювача частоти зі струмом $I_{RMS}=0,95$ А і частотою обертання 1420 об/хв, зображені на рис. 3 та рис. 4. Коефіцієнт несинусоїдальності по струму THD_I дорівнює 137,01%, а по амплітуді виділяються 5, 7, 11 гармоніки.

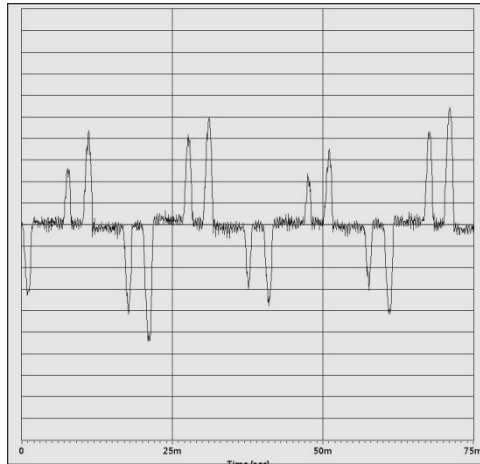


Рисунок 3 – Форма струму в одній фазі на вході ПЧ

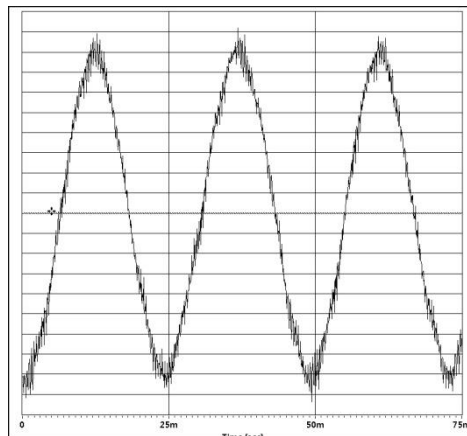


Рисунок 4 – Форма струму в одній фазі на виході ПЧ

Графіки зміни параметрів мережі живлення на вході перетворювача частоти зі струмом $I_{RMS}=1,39$ А, частотою обертання вала електродвигуна 700 об/хв, зображені на рис. 5. Коефіцієнт несинусоїдальності по струму $THD_I = 127,17\%$, а по амплітуді виділяються 5, 7, 11 гармоніки. При сталому значенні навантаження та збільшенні частоти обертання вала відбувається зменшення коефіцієнта несинусоїдальності по струму THD_I до 104,47%.

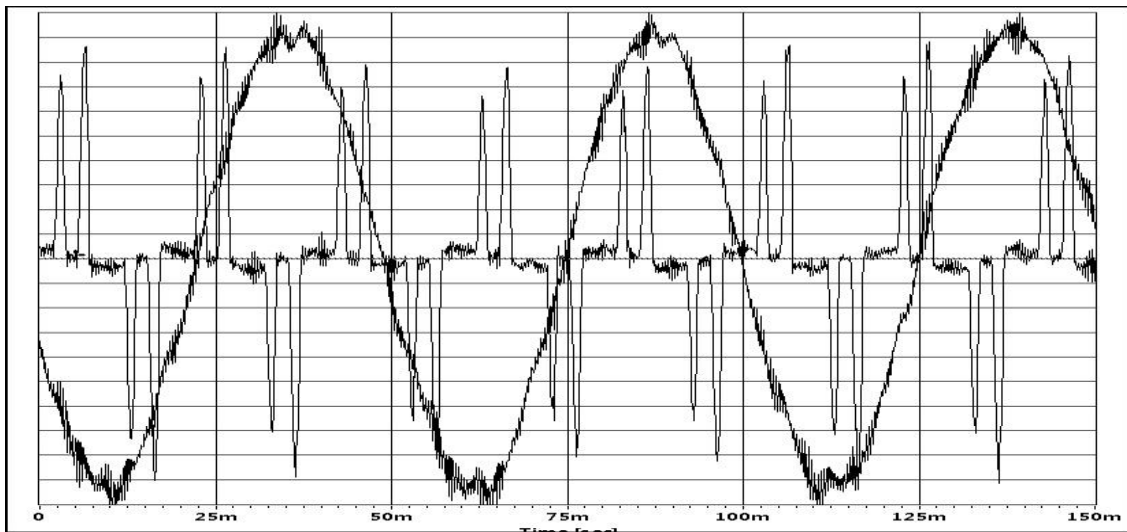


Рисунок 5 – Форма струму в одній фазі на вході і виході ПЧ при $I_{RMS}=1,39$ А

При підключенні універсального приладу PM172 для моніторингу параметрів електричної мережі використовувалась конфігураційна програма PAS, яка безкоштовно поставляється та призначена для роботи з приладами фірми SATEC. Вона дозволяє результати вимірювань записувати в вигляді окремих файлів. Були проведені вимірювання параметрів електричної мережі живлення частотного електропривода. Результати вимірювань описані далі.

При зменшенні частоти перетворювача до 20 Гц відбувається не лише зменшення значення струму, але також і невелике зменшення коефіцієнта несинусоїдальності по струму THD_I до 94%. При зменшенні навантаження й частоти перетворювача до 15 Гц відбувається збільшення коефіцієнта несинусоїдальності по струму THD_I до 105%.

Графіки зміни напруги та струму живильної мережі з трифазною катушкою індуктивності на вході перетворювача частоти зі струмом $I_{RMS}=1,16$ А наведені на рис. 6. Відбувається збільшення зсуву між струмом і напругою до $26,5^\circ$, що спричиняє зменшення $\cos \phi$ на вході ПЧ.

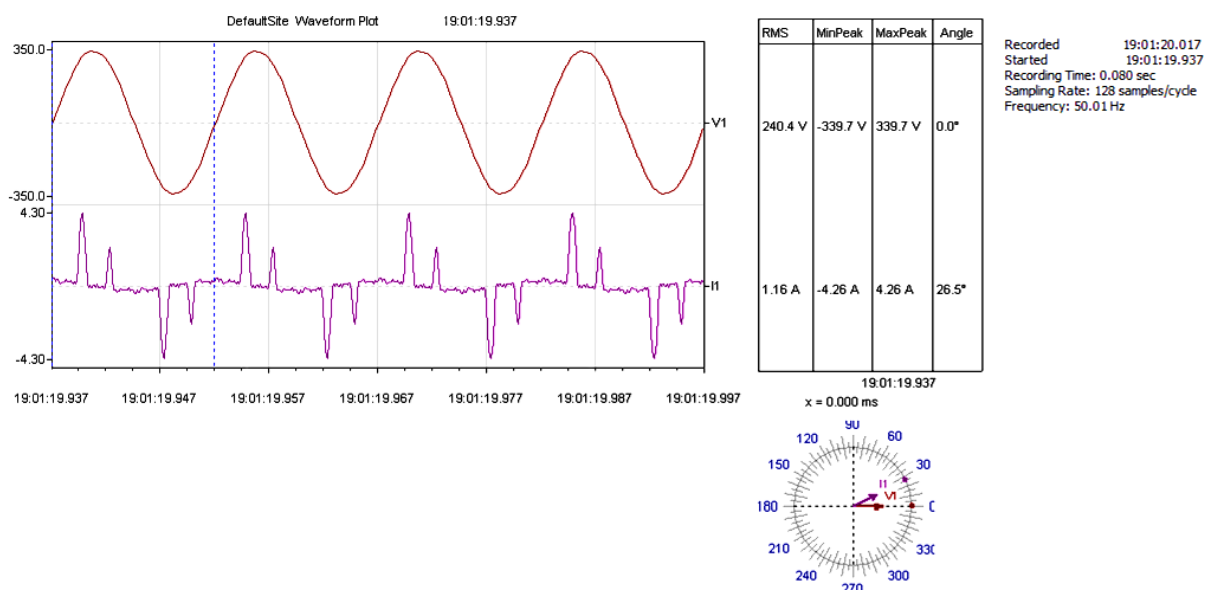


Рисунок 6 - Форма напруги й струму в одній фазі на вході системи ПЧ

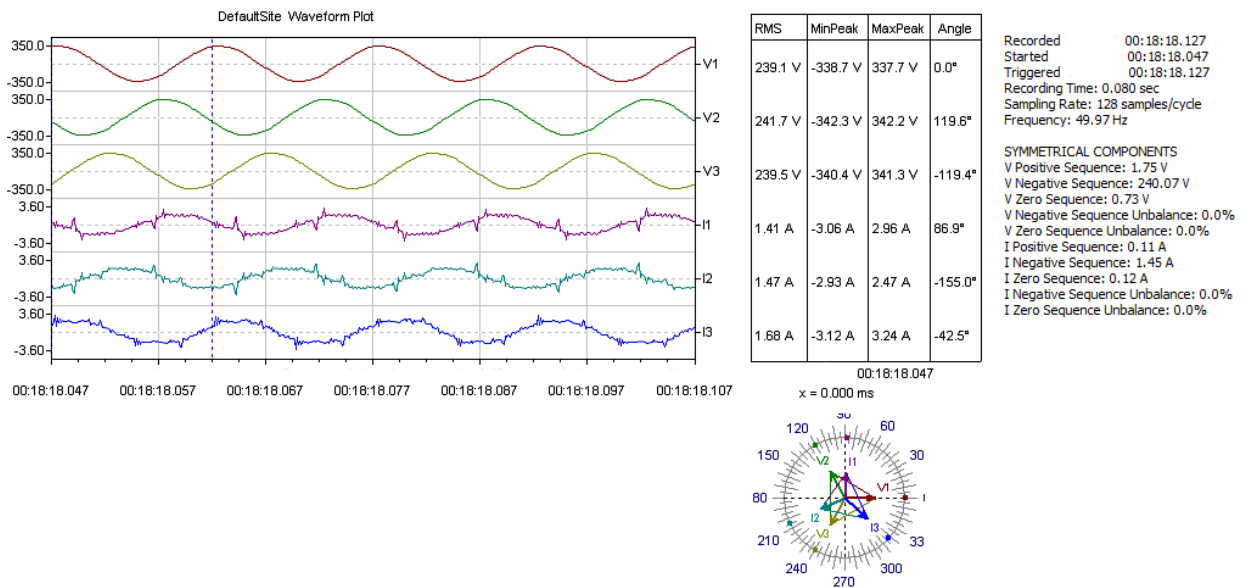


Рисунок 7 - Форма напруги й струму у трьох фазах на вході системи ПЧ-АД

Таким чином, експериментальні дані, отримані в результаті дослідів, підтверджують, що спотворення кривих струму при використанні ПЧ мають місце і можуть впливати на режими енергоспоживання установки.

Крім переваг структури електропривода на основі ПЧ-АД мають недоліки:

- спотворення кривої напруги та струму, досить високий рівень радіоперешкод, силові кабелі необхідно прокладати в заземлених трубах;
- неекономічність прокладання довгих живильних кабельних ліній між ПЧ і двигуном через значні струми високочастотного витоку на нуль, що приводить до зменшення моменту;
- необхідність встановлювання спеціальних фільтрів як на вході, так і на виході інвертора, застосування звичайних фільтрів неприпустиме;
- неприпустимість застосування будь-якої комутуючої апаратури на виході ПЧ при роботі електродвигуна [2].

Відхилення напруги для живлення асинхронних двигунів (АД) викликають збитки U_{AP} через додаткові втрати ΔP активної потужності, через додаткове споживання ними реактивної потужності (U_{AQ}); через скорочення терміну служби ізоляції (U_U); через зниження продуктивності механізмів (U_{II}) і збитки через додатковий час роботи у зв'язку зі зміною продуктивності механізмів (U_{At}). Значення шкоди для АД залежить від коефіцієнта його завантаження β . Додаткові втрати активної потужності в АД мають місце при негативних значеннях відхилення напруги внаслідок збільшення споживання струму пропорційно зниженню напруги. У разі підвищення напруги на 1% реактивна потужність, споживана АД, підвищується в середньому на 3%. Термін служби ізоляції скорочується в основному в результаті додаткового нагріву збільшеними струмами. В загальному випадку зміна частоти обертання АД при відключенні напруги порівняно невеликі. Однак для поточного виробництва навіть невеликі зміни частоти обертання позначаються на продуктивності механізмів. Збиток U_{II} по недовипуску продукції в зв'язку з пониженням продуктивності поточного виробництва ($\beta=0,9\div 1$) можна визначити:

$$U_{II} = (0,55 \div 0,58 K_U) N_n c t \quad (3)$$

де $K_U = U/U_n$ – відносне значення напруги на затискачах двигуна; N_n – годинна продуктивність ділянки, (шт/год; т/год); c – собівартість продукції; t – час роботи установки при понижених напругах.

В більшості випадків збиток U_{At} , викликаний додатковим часом роботи АД невеликий

і складає 0,5% від значення U_n , тобто ним можна знехтувати. Зміни напруги впливають на обертовий момент АД та пов'язані виразом $M = kU^2$. При зменшенні напруги пуск двигуна ускладнюється. На затискачах АД допустиме відхилення напруги в період пуску визначається виразом

$$K_{Uk} = (\beta / \lambda)^{1/2} \quad (4)$$

де $K_{Uk} = U_k/U$ – відносне значення критичної напруги; β – коефіцієнт завантаження; λ – кратність перекидального моменту АД.

Таблиця 1

Кратність максимального моменту, λ	Коефіцієнт завантаження, β			Кратність максимального моменту, λ	Коефіцієнт завантаження, β		
	1,0	0,8	0,6		1,0	0,8	0,6
1,6	0,79	0,71	0,61	2,0	0,71	0,63	0,55
1,8	0,76	0,67	0,58	2,5	0,63	0,57	0,49

В табл. 1 наведені відносні значення K_{Uk} гранично допустимого зниження напруги для АД з постійним моментом опору при різних коефіцієнтах завантаження β в залежності від кратності λ максимального моменту.

Висновки

1. Визначені значення складових електричної потужності при використанні перетворювача частоти з ланкою постійного струму, що дозволяє розрахувати потужність спотворень у складі неактивної потужності та оцінити її вплив на енергоспоживання насосної установки шляхом розрахунку фактичного потенціалу енергозбереження в випадку переходу на керований електропривод для підтримки постійного тиску в трубопроводі за допомогою системи ПЧ-АД.

2. Встановлено явище високочастотного витоку струму на нуль електродвигуна, вплив неактивної потужності, потужності викривлень на значення коефіцієнта несинусоїдальності по струму в ланцюгах підключення ПЧ до мережі живлення, який може перевищувати 100%, його зниження дозволяє згладжувати криву струму, вона стає більш близькою за формою до синусоїди та заощаджувати електроенергію, для чого необхідно застосовувати фільтри електромагнітної сумісності.

3. Умови електромагнітної сумісності з мережею живлення багато в чому визначають вибір виду і параметрів потужного регульованого електроприводу змінного струму. У ряді випадків ці вимоги впливають на вибір системи електропостачання.

4. Збурення в системі електропостачання є найважчими режимами для регульованого електроприводу через їх непередбачуваність і практично миттєвий характеру зміни. Досить досконалий регульований електропривод працює з його специфікованими якість при нормально допустимих збурення в мережі.

Перелік використаних джерел

1. Системы автоматизированного управления электропривода: Учебник / В.В. Москаленко. – М.: Инфра – М, 2004. – 208 с.

2. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності.

3. Патент України на корисну модель №131943 від 11.02.2019 р. Лебедев Л. М., Дубовик В. Г., Горобець А.М., Кірзенко О.В. Спосіб захисту електродвигуна від перевантажень. МПК H02N 7/08. Бюлетень "Промислова власність", №3, 2019 р.

4. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006.

5. Лезнов Б.С. Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках. М.: Машиностроение, 2011.