

АНАЛІЗ СХЕМНИХ РІШЕНЬ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЧАСТОТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

Шаповалов В. А., Комесаренко В. О.

Рассмотрены варианты подключения высоковольтных двигателей к питающей сети посредством: прямого подключения к сети через высоковольтную ячейку с вакуумным выключателем; подключение к сети через устройство плавного пуска и подключение посредством преобразователя частоты. Среди данных схемных решений выделены недостатки относительно условий перегрузочной способности по пусковому току относительно номинальных значений электродвигателя; включений двигателя на предельных оборотах более одного раза в час; ограниченного срока службы вакуумных камер; отсутствия возможности регулирования оборотов двигателя. Выделен способ подключения посредством частотного преобразователя, относительно которого рассмотрены схемные решения подключений частотных преобразователей к высоковольтному электродвигателю: посредством низковольтного частотного преобразователя с использованием понижающего и повышающего трансформаторов; преобразователя частоты среднего напряжения. Рассмотренные схемные решения позволяют добиться плавного синусоидального выходного напряжения и, как следствие, повышения устойчивости системы управления двигателем; время переходных процессов сопоставимо с характеристикой разгона двигателя, при выходе на заданную скорость. Однако при данном типе подключения выделены недостатки относительно высоких токов на участке «повышающий трансформатор-электродвигатель», что приводит к большим наводкам в системе, вплоть до поломки преобразователя частоты. Используя схемное решение частотного преобразователя наборного типа, доступно: получение выходного напряжения заданной величины посредством включения нужного количества элементных ячеек; замена поломанной ячейки посредством шунтирования без остановки работы частотного преобразователя; применение законов регулирования электродвигателя в широком частотном диапазоне. Сделаны выводы относительно выполненного анализа и предоставленной информации относительно вопросов, рассмотренных в данной работе.

Ключевые слова: электродвигатель, частотный преобразователь, выходное напряжение, трансформатор, переходный процесс, элементная ячейка, схема управления, выходной фильтр.

Розглянуті варіанти підключення високовольтних двигунів до мережі живлення за допомогою: прямого підключення до мережі через високовольтну комірку з вакуумним вимикачем; підключення до мережі через пристрій плавного пуску і з'єднання за допомогою перетворювача частоти. Серед даних схемних рішень виділені недоліки щодо умов перевантажувальної здатності пускового току щодо номінальних значень електродвигуна; вмикання двигуна на граничних обертах більш одного разу на годину; обмеженого терміну служби вакуумних камер; відсутності можливості регулювання обертів двигуна. Виділений спосіб підключення за допомогою частотного перетворювача, щодо якого розглянуті схемні рішення підключень частотних перетворювачів до високовольтного електродвигуна: за допомогою низьковольтного перетворювача частоти з використанням понижуючого та підвищувального трансформаторів; перетворювача частоти середньої напруги. Розглянуті схемні рішення дозволяють отримати плавну синусоїдальну вихідну напругу і, як наслідок, підвищення стійкості системи управління двигуном; час перехідних процесів можна порівняти з характеристикою

розгону двигуна, при виході на задану швидкість. Однак при даному типі підключення виділені недоліки щодо високих струмів на ділянці "підвищуючий трансформатор-електродвигун", що призводить до великих наведень в системі, які призводять до виходу з ладу перетворювача частоти. Використовуючи схемне рішення частотного перетворювача набірною типу, стає доступним: отримання вихідної напруги заданої величини за допомогою включення потрібної кількості елементних комірок; заміна поламаної комірки за допомогою шунтування без зупинки роботи частотного перетворювача; застосування законів регулювання електродвигуна в широкому частотному діапазоні. Зроблено висновки щодо виконаного аналізу і наданої інформації щодо питань, розглянутих в даній роботі.

Ключові слова: електродвигун, частотний перетворювач, вихідна напруга, трансформатор, перехідний процес, елементна комірка, схема управління, вихідний фільтр.

The article discusses options for connecting high-voltage motors to the mains through: direct connection to the network through a high-voltage cell with a vacuum switch; connection to the network through a soft starter and connection via a frequency converter. Among these circuit solutions highlighted the disadvantages regarding the conditions of the overload capacity for starting current relative to the nominal values of the motor; engine starts at maximum speed more than once per hour; limited service life of vacuum chambers; lack of ability to control engine speed. Highlighted the method of connection through a frequency converter, which are considered relatively schematics connections of frequency converters for high-voltage electric motor: by means of a low-voltage frequency converter using step-down and step-up transformers; medium voltage frequency converter. The considered circuit solutions allow achieving a smooth sinusoidal output voltage and, as a consequence, an increase in the stability of the engine control system; transient time is comparable with the characteristic of engine acceleration, when reaching a set speed. However, with this type of connection, the disadvantages of relatively high currents in the section "step-up transformer-electric motor" are highlighted, which leads to a lot of noise in the system, until the failure of the frequency converter. Using the circuit solution of a frequency converter of the type-setting type, it is available: obtaining the output voltage of a given value by turning on the required number of cell elements; replacement of a broken cell by shunting without stopping the operation of the frequency converter; application of motor control laws in a wide frequency range. Conclusions are drawn regarding the analysis performed and the information provided regarding the issues discussed in this article.

Keywords: electric motor, frequency converter, output voltage, transformer, transition process, element cell, control scheme, output filter.

Шаповалов В. А.

вед. констр. ЧАО «НКМЗ»
vladimir.shapovalov@ukr.net

Комесаренко В. О.

магістр ДГМА
vkomesar@gmail.com.

ЧАО «НКМЗ» – Частное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.3.072.6

Шаповалов В. А., Комесаренко В. О.**АНАЛІЗ СХЕМНИХ РІШЕНЬ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА
ЧАСТОТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ**

Одними з найбільших споживачів електроенергії в промисловості є високовольтні двигуни приводів насосів та вентиляторів. Застосування частотно-регульованих перетворювачів для таких двигунів дозволяє знизити споживання електроенергії, а також суттєво поліпшити керування технологічним процесом. У багатьох випадках, вентилятори і насоси, що використовуються на підприємствах, підключаються безпосередньо до високовольтної мережі. У випадку з насосами для регулювання їх продуктивності можливе використання гідравлічного дроселювання. Для вентиляторів застосовують спеціальні шибери або двохшвидкісні двигуни. У зазначених випадках регулюється потік рідини (повітря) за рахунок його обмеження, двигуни працюють практично в номінальному режимі. Недоліком цих механізмів є необхідність їх постійного обслуговування. Найбільш поширений на сьогодні спосіб регулювання швидкості обертових механізмів з двигунами змінного струму в промисловості є використання перетворювачів частоти. У випадку з відцентровими насосами і вентиляторами зниження робочої швидкості веде до зниження електроспоживання, що суттєво вигідніше в порівнянні з класичними методами регулювання [1]. За рахунок економії електроенергії інвестиції в частотне регулювання окупаються за короткий термін. У загальному випадку застосування перетворювачів частоти для керування електродвигунами дозволяє заощадити як мінімум до 30 % електроенергії в порівнянні з типовими механізмами регулювання двигунів [1]. Крім енергозбереження застосування частотних перетворювачів збільшує термін служби електродвигуна, підвищує надійність всієї системи, значно зменшує час технічного обслуговування [1].

Метою дослідження є аналіз типових способів включення високовольтних двигунів і схемних рішень керування частотними перетворювачами.

Завданням дослідження є аналіз типових схем керування частотних перетворювачів, розгляд пріоритетного схемного рішення перетворювача частоти набірною типу, порівняння його з типовими схемними рішеннями керування частотним перетворювачем, виділення перспектив при застосуванні обраного схемного рішення.

У роботі розглянуто три типових схемних рішень підключення високовольтних двигунів до мережі живлення, які задовольняли б технологічним процесам виробництв на підприємствах.

Зокрема:

Спосіб 1. Пряме підключення до мережі за допомогою високовольтної комірки з вакуумним вимикачем (рис. 1) [2]. Такий спосіб найпростіший і економічний з точки зору вартості високовольтного обладнання, однак має ряд недоліків, які необхідно враховувати розробнику електроприводу. Один з них – обмеження з боку мережі живлення, яка повинна забезпечувати 7–10 кратне перевантаження по струму при вмиканні електродвигуна. Другий – обмеження з боку двигуна. Як правило, електродвигуни великої потужності при підключенні до мережі не рекомендується вмикати частіше, ніж 1 раз на годину на повне навантаження. Це пов'язано з їх нагріванням. Повторне ж включення протягом години допускається за умови тривалої роботи в холостому режимі (без навантаження з контролем температури обмоток). Необхідно також відзначити, що вакуумний вимикач уявляє собою контактор з контактами в вакуумних камерах для інтенсивного гасіння дуги в момент перехідного процесу вмикання і розмикання електричного кола під навантаженням. Вакуумні камери мають обмежений термін служби і повинні проходити періодичну перевірку.

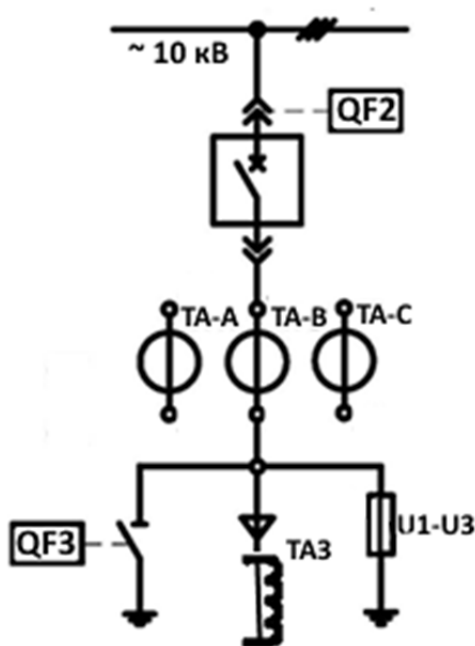


Рис. 1. Спрощене зображення підключення до мережі за допомогою високовольтної чарунки з вакуумним вимикачем:

QF – кінцеві вимикачі з контролем положення; TA-A, TA-B, TA-C – струмові кола захисту і вимірювань; TA3 – трансформатор струму ланцюга обліку електроенергії; U1 ... U3 – захисні ланцюги

Спосіб 2. Підключення до мережі через пристрій плавного пуску (рис. 2). Слід зазначити, що хоча даний метод передбачує установку високовольтного пристрою плавного пуску [3], який має значну вартість, при цьому має низку переваг щодо прямого пуску: зокрема вирішена проблема перевантаження мережі живлення по струму при вмиканні двигуна, за рахунок плавної подачі напруги і розгону двигуна до номінальної швидкості. При такому способі все ж залишається недолік, пов'язаний з відсутністю можливості регулювання швидкості обертання двигуна, який вирішується третім способом підключення до мережі. Для двигунів великої потужності пристрій плавного пуску оснащуються байпасною лінією, яка шунтує м'який пуск після запуску двигуна. Контакттор байпасної лінії вмикається з пристроєм м'якого пуску після зниження струму нижче його порогового значення (зазвичай налаштовується у м'якому пускачі).

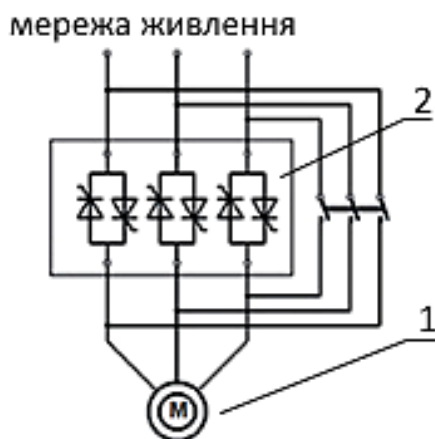


Рис. 2. Підключення до мережі за допомогою пристрою плавного пуску:
1 – електродвигун; 2 – пристрій плавного пуску

Спосіб 3. Підключення до мережі за допомогою перетворювача частоти (рис. 3) [4]. Сучасні схеми живлення від перетворювача частоти передбачають наявність перетворювального трансформатора на вході до перетворювача частоти. Даний спосіб є найбільш вартісним, однак, має низку переваг, наприклад, зниження частоти обертів насосного агрегату у період технологічних пауз, у циклі роботи обладнання гідросбіву, дозволяє значно знизити витрати технічної води, що в свою чергу, знижує вартість її очистки, охолодження, перекачування. У загальних масштабах виробництва використання частотних перетворювачів може сприяти значній економії енергоресурсів і зниження шкоди для екології. Підключення перетворювача частоти до високовольтної мережі, також як і високовольтного пристрою плавного пуску, здійснюється через високовольтну комірку з вакуумним вимикачем. При цьому токові навантаження на комірку будуть менші, ніж при прямому пуску, оскільки вакуумний контактор повинен забезпечувати тільки аварійний розрив електричного кола.

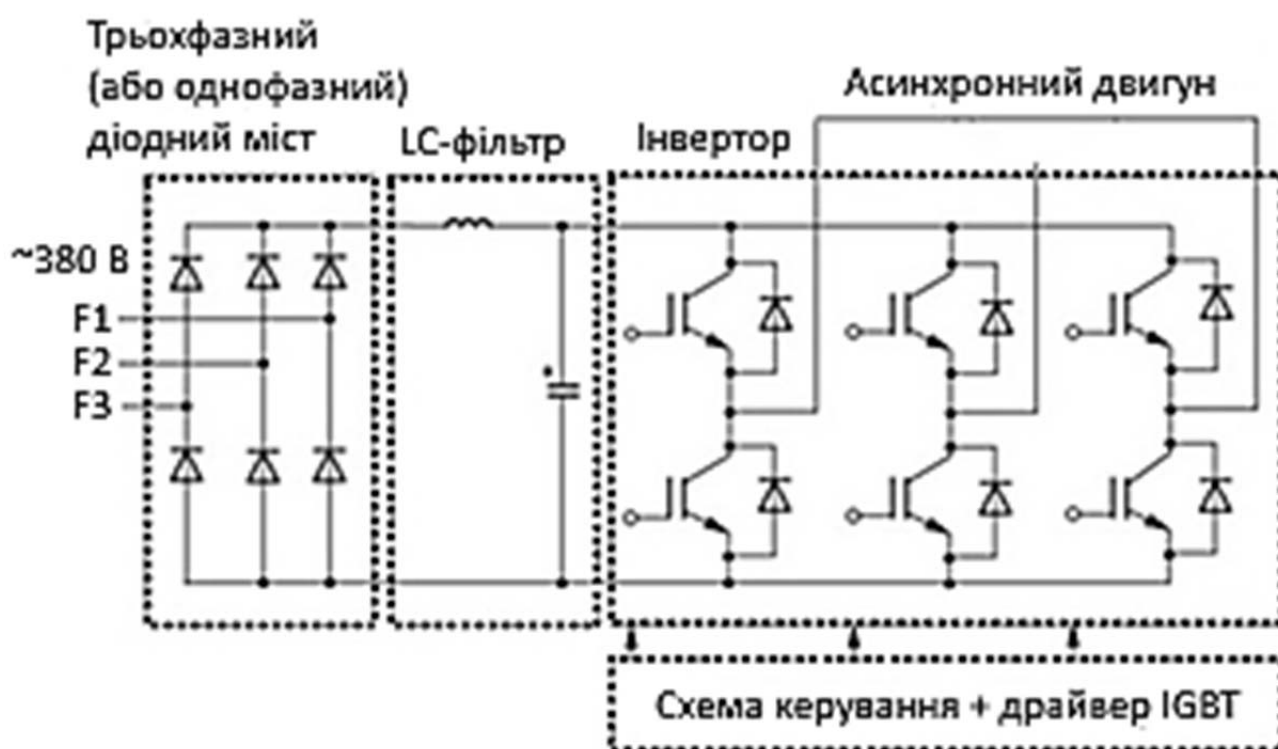


Рис. 3. Підключення до мережі за допомогою частотного перетворювача

Керування високовольтними двигунами за допомогою перетворювачів частоти. Нижче приведені дві типові схеми підключення перетворювача частоти до високовольтного двигуна, і розглянута схема перетворювача набірної типу фірми Robicon Perfect Harmony [7].

Схема підключення 1 (рис. 4). Застосування низьковольтних перетворювачів частоти зі знижувальним і підвищувальним трансформаторами [5]. Трансформатори, знижувальний та підвищувальний, як правило, виконуються рівнозначними з метою мінімізації резерву. Перевагою даної схеми є застосування умовно дешевого перетворювача частоти низької напруги. При цьому струм низьковольтного перетворювача більш ніж у два рази перевершує струм високовольтного, що сприяє збільшенню перетину та вартості дротів та кабельних трас. Також необхідно передбачати додатковий підвищувальний трансформатор на ділянці "перетворювач частоти – високовольтний двигун". Вагомим недоліком даної схеми слід відзначити наявність двох трансформаторів, що збільшує вартість електроприводу.

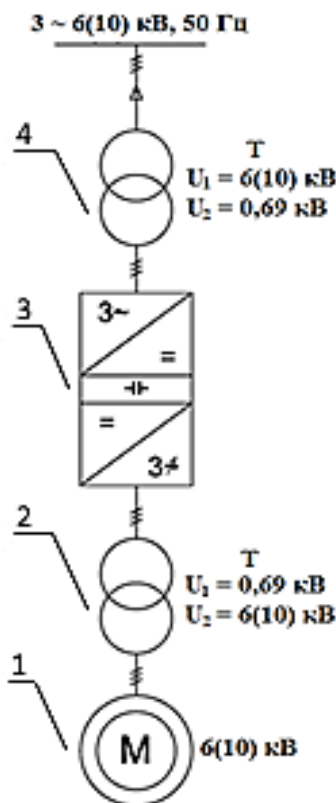


Рис. 4. Схема з низьковольтним перетворювачем частоти:

1 – електродвигун; 2 – підвищуючий трансформатор; 3 – частотний перетворювач; 4 – знижувальний трансформатор

Схема підключення 2. Застосування перетворювачів частоти на середню напругу (рис. 5) [6]. Сучасні високовольтні перетворювачі частоти в основному виробляються на середню напругу – 3,3 кВ, що також пов'язано зі значним зростанням вартості елементної бази.

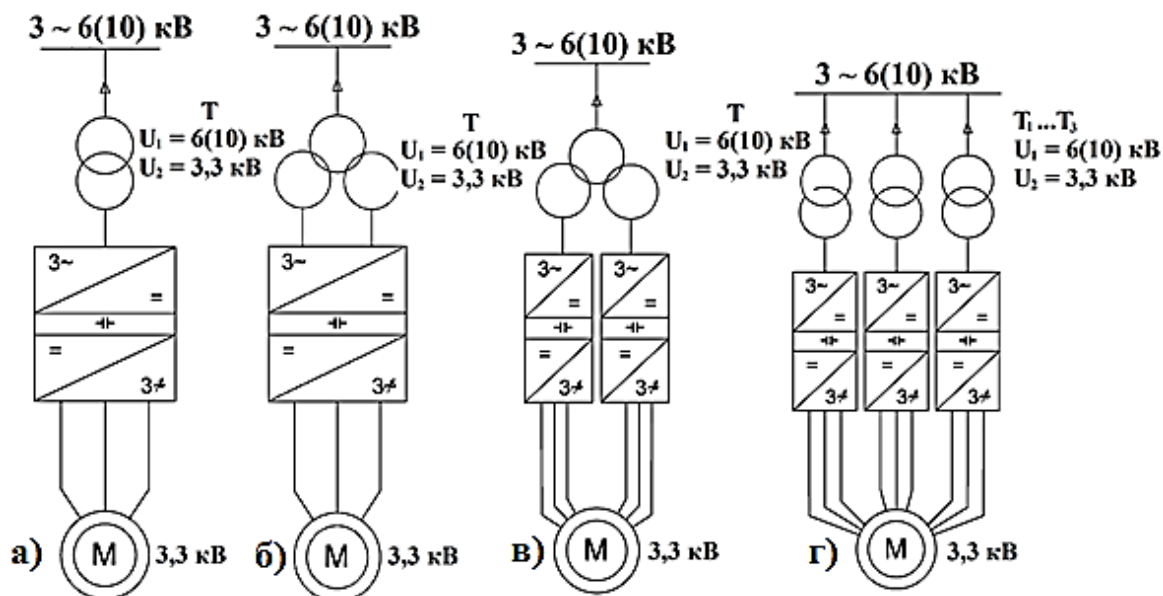


Рис. 5. Схеми з перетворювачами частоти середньої напруги:

а – схема з двообмотковим трансформатором; б – схема з трьохобмотковим трансформатором; в – схема з двигуном з двома полуобмотками; г – схема з двигуном з трьома полуобмотками

Варіанти реалізації підключення пов'язані, в основному, зі схемними рішеннями різних виробників перетворювачів частоти. Налаштування перетворювачів середньої напруги (3,3 кВ), як правило, виконується представниками виробника з використанням закритого програмного забезпечення. Спосіб підключення, який показаний на (рис. 5, а), є типовим. Випрямляч побудований за принципом шестипульсної схеми випрямлення. Даний спосіб може використовуватися для насосів з плавним розгоном наприклад, для вирішення завдання зниження витрати води в паузах роботи прокатного стану на перевалку валків або при великих перервах видачі чергового сляба з печі. На (рис. 5, б) показано використання трансформатора з двома вторинними обмотками (первинна обмотка підключається за принципом «Y», а вторинні – «Δ» «Y») і, відповідно, з двенадцятипульсною схемою випрямляча. Перевага такого рішення полягає в отриманні більш плавної синусоїди вихідної напруги, отже, в підвищенні стійкості системи керування двигуном. На (рис. 5, в, г) показані приклади використання двигунів з двома або трьома полуобмотками. Таке рішення пропонується фірмою Siemens [7]. Однією з переваг є підвищена стійкість двигунів при регулюванні частоти обертання з розгоном або гальмуванням за короткий час, тобто, час перехідних процесів, можна порівняти з часом характеристики розгону двигуна при виході на задану швидкість. Також по полуобмотці проходить менший струм, що знижує вартість обмоток трансформатора. У низці випадків двигун може працювати, якщо перетворювач частоти, встановлений в лінії живлення однієї з полуобмоток, наприклад, вийшов з ладу.

Перераховані вище способи підключення частотних перетворювачів, в якійсь мірі є традиційними, тобто аналогічними. Суттєву відмінність має спосіб підключення двигуна від так званого наборного перетворювача частоти, конструктивна будова якого полягає в послідовному з'єднанні груп перетворювальних комірок певного рівня напруги в кожній фазі (рис. 6) [7].

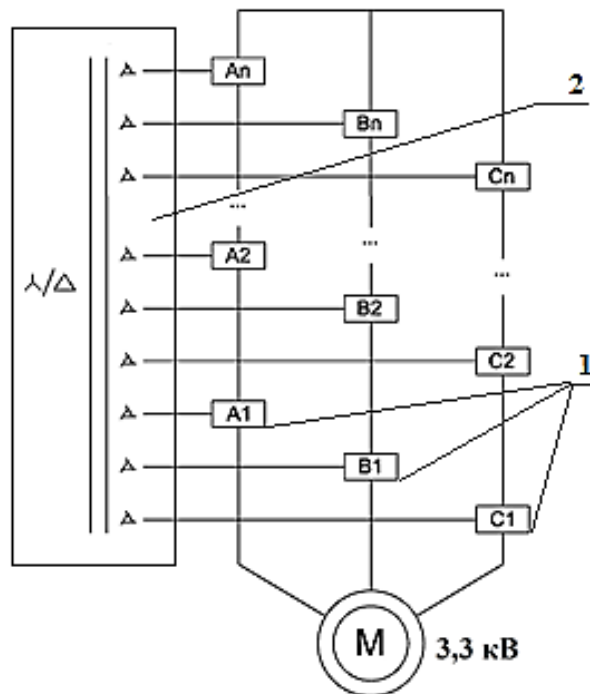


Рис. 6. Структурна схема «наборного» перетворювача частоти фірми Robicon:
1 – елементні комірки наборного типу; 2 – вхідний трансформатор

Такі перетворювачі сімейства Robicon Perfect Harmony [7] були вперше розроблені американською фірмою Robicon, яка в 2005 році увійшла в структуру фірми Siemens [8]. На стороні високої напруги встановлюється узгоджувальний трансформатор, який має коефіцієнт трансформації рівний 1. Відмінною особливістю високовольтних перетворювачів частоти

Robicon Perfect Harmony є схемне рішення з низьковольтними силовими комірками, з'єднаними послідовно. Це дозволяє отримати на виході перетворювача сумарну високу напругу необхідної величини.

Кожна силова комірka уявляє собою звичайний перетворювач частоти в складі «випрямляч – інвертор» з напругою випрямляча до 1200 В. Ця схема дозволяє за допомогою шунтування оперативно вивести з роботи комірku, яка раптово вийшла з ладу зі збереженням працездатності перетворювача частоти в цілому. Схемне рішення, при інших рівних умовах, дозволяє суттєво підвищити якість споживаного з мережі струму і поліпшити форму вихідної напруги інвертора. Завдяки цьому в більшості випадків перетворювачі поєднуються з високовольтними двигунами без установки спеціальних вихідних фільтрів. Система керування дозволяє реалізувати різні закони регулювання частоти вихідної напруги в широкому діапазоні (0...100 Гц), а також векторним режимом. Коефіцієнт потужності перетворювача не нижче 0,95, а ККД системи, включаючи трансформатор, становить 96,5 ... 97,0 %. Перетворювачі частоти, побудовані за типом Robicon [7], широко застосовуються в електроприводах насосів, вентиляторів, які не розраховані на рекуперацію енергії в мережу.

ВИСНОВКИ

В ході проведеного аналізу розглянуті рішення застосування частотних перетворювачів в промисловості щодо стандартних регульованих механізмів. Проаналізовані типові варіанти підключення високовольтних двигунів до мережі живлення, де більш перспективним є спосіб підключення за допомогою частотного перетворювача. Розглянуто два типових варіанти схемних рішень керування частотного перетворювача за допомогою низьковольтного перетворювача частоти із знижувальним і підвищувальним трансформаторами, перетворювача частоти для середньої напруги (3,3 кВ). Виділені їх позитивні і негативні сторони щодо завдань регулювання електродвигуна. Розглянуто схему перетворювача частоти набірною типу, який більш гнучко справляється з завданнями регулювання електроприводу, отримуючи на виході коефіцієнт потужності перетворювача не нижче 0,95, а ККД системи, включаючи трансформатор, – 96,5 ... 97,0 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М. : Высшее профессиональное образование, 2004. – 241 с.
2. Высоковольтные вакуумные выключатели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.asutpp.ru/vakuumnye-vyklyuchateli.html>.
3. Басков С. Н. Устройство плавного пуска высоковольтного синхронного двигателя с векторно-импульсным управлением / С. Н. Басков, М. Н. Давыдкин, А. С. Коньков // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – № 3. – С. 144–149.
4. Коротко о частотно-регулируемом приводе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vfd.com.ua/content/view/57/188/>.
5. Бурдасов Б. К. Многоуровневые и каскадные преобразователи частоты для высоковольтных электроприводов переменного тока / Б. К. Бурдасов, С. А. Нестеров // ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева». – 2011. – № 1. – С. 1–10.
6. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.power-e.ru/2007_03_41.php.
7. Эффективность использования безтрансформаторных многоуровневых преобразователей частоты в электроприводе магистральных насосов / В. А. Шабанов, В. Ю. Алексеев, А. Р. Калимгулов, М. И. Хакимьянов, Д. А. Токмаков, А. В. Шепелин // Нефтегазовое дело. Научный журнал. – 2015. – № 5. – С. 493–515.
8. Home – Русский – Ukraine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.siemens.com/ua/ru/home.html>.