

УДК 621.313

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ТРЕХУРОВНЕВЫМ АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

*Волков А.В., д.т.н., проф., Скалько Ю.С.*

*Запорожский национальный технический университет*

*69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64*

*E-mail: [nickanto@zntu.edu.ua](mailto:nickanto@zntu.edu.ua)*

Розроблена векторна система керування для високовольтного частотно-регульованого асинхронного електропривода з тривірневим інвертором напруги. На імітаційній моделі досліджені електромеханічні процеси вказаного електропривода, а також електромагнітні процеси у інверторі та двигуні.

**Ключові слова:** асинхронний електропривод, тривірневий інвертор напруги.

Vector control system of high-voltage asynchronous electric drive with three-level voltage source inverter is developed. Electromechanical processes of this drive and electromagnetic processes in inverter and induction motor are investigated on simulation model of the drive.

**Key words:** asynchronous drive, three-level voltage inverter.

**Введение.** В последние годы широкое распространение в различных отраслях хозяйства получили частотно-регулируемые (ч-р) асинхронные электроприводы (ЭП) с векторным управлением (ВУ), позволяющие улучшить динамику и нормировать переходные электромеханические процессы и статические регулировочные характеристики ч-р асинхронного ЭП. В высоковольтных (в/в) электроприводах перспективным является использование многоуровневых (например, трехуровневых) автономных инверторов напряжения (АИН), которые, как известно, промышленно выпускаются фирмами Siemens (Simovert MV), ABB (ACS 600), Mitsubishi (TMdrive-MV). При этом преимуществами данного подхода являются пониженные потери в многоуровневом инверторе, улучшенная электромагнитная совместимость, а недостатками – увеличение количества необходимых силовых ключей и усложнение системы управления [1].

**Анализ предыдущих исследований.** Несмотря на многочисленные работы [1–6], посвященные анализу многоуровневых схем АИН применительно к активно-индуктивной нагрузке, до настоящего времени в известной научно-технической литературе недостаточно рассмотрены вопросы управления асинхронными ЭП с многоуровневыми АИН и исследования электромеханических процессов в таких электроприводах. Данные исследования необходимы для успешного промышленного внедрения ч-р асинхронных ЭП с многоуровневыми АИН, востребованы практикой и особенно актуальны для высоковольтных ч-р асинхронных ЭП большой мощности.

**Цель работы.** Разработка векторной системы автоматического управления (САУ) асинхронным ЭП с трехуровневым АИН и исследование электромеханических процессов в данном электроприводе с указанной системой.

**Материал и результаты исследования.** Силовая схема рассматриваемого трехуровневого инвертора с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)

приведена на рис. 1.

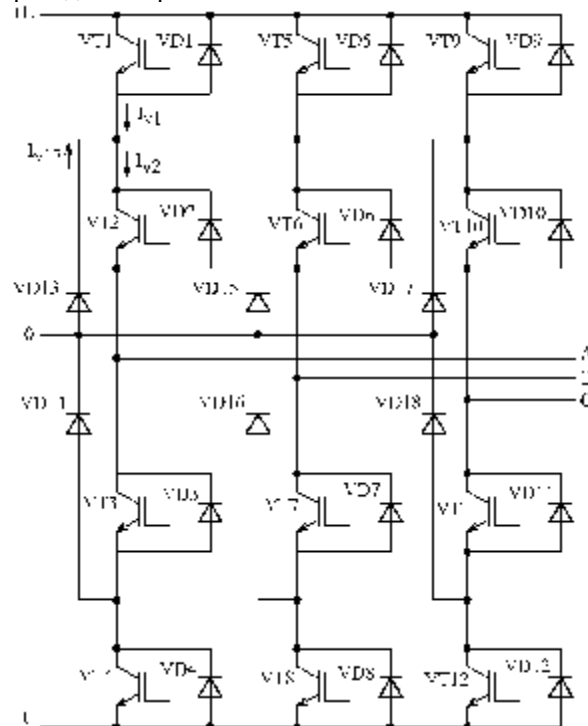
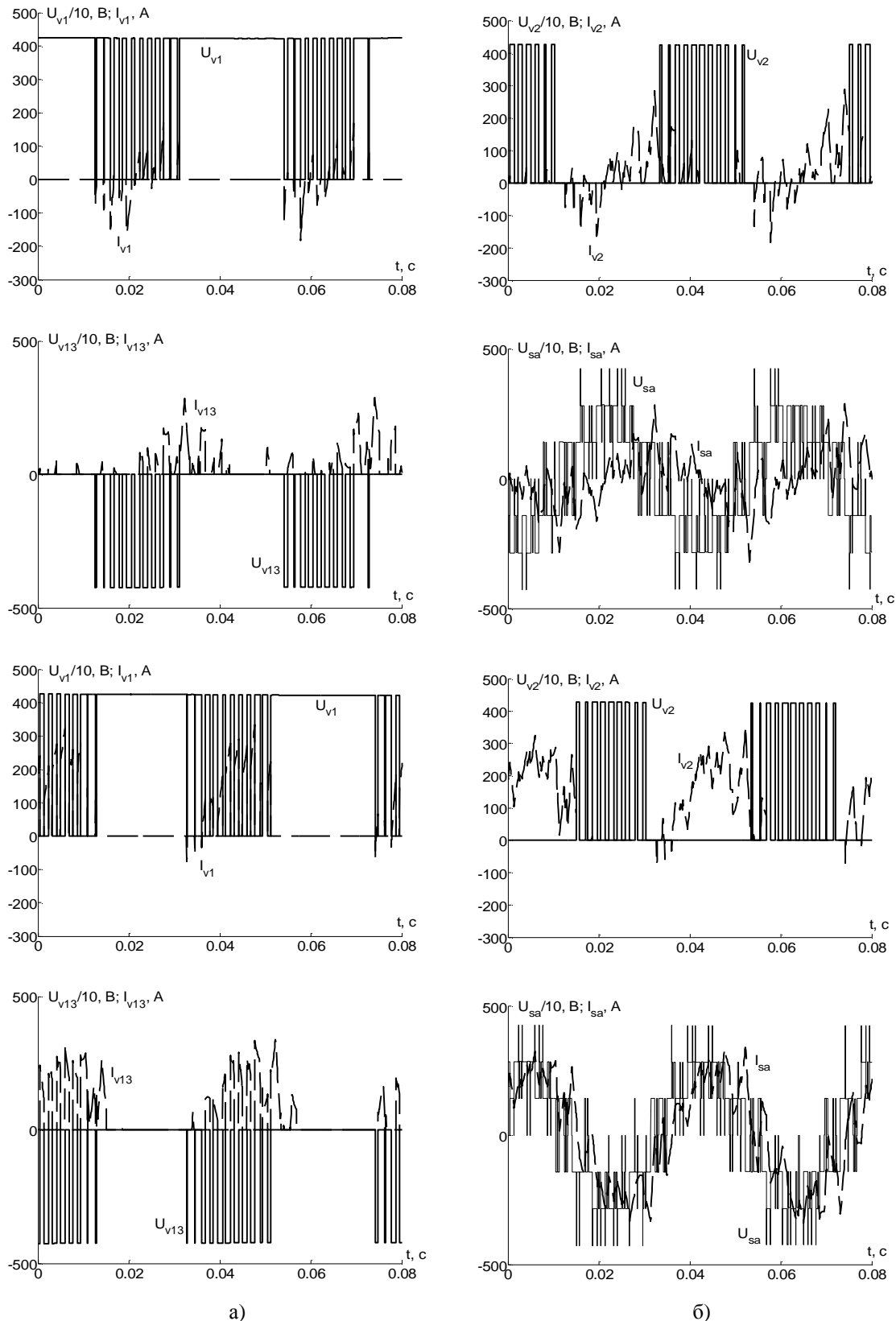


Рисунок 1 – Трехфазный трехуровневый инвертор напряжения

На разработанной авторами (для проведения последующих исследований) имитационной модели трехуровневого АИН-ШИМ, нагруженного на асинхронный двигатель (АД), рассчитаны электромагнитные процессы: выходных фазных напряжений  $U_{sa}$  и тока  $I_{sa}$ , напряжений  $U_{v1}$ ,  $U_{v2}$ ,  $U_{v13}$  и токов  $I_{v1}$ ,  $I_{v2}$ ,  $I_{v13}$  на силовых ключах VT1, VT2 (шунтированных обратными диодами VD1, VD2) и на диоде VD13 инвертора соответственно. Результаты данных расчетов показаны в виде временных диаграмм на рис. 2.



а) б)  
 Рисунок 2 – Стационарные электромагнитные процессы в трехуровневом инверторе (для выходной частоты, равной 25 Гц): а) – на холостом ходу; б) – при номинальной нагрузке двигателя

Созданная имитационная модель учитывает фактическую дискретность работы силовых ключей вы-

прямителя и инвертора, а также общепринятое идеализированное представление АД [7]. Данная

модель воспроизводит близкие к реальным по форме и значениям (с относительным отличием менее 5–7 % от экспериментальных) напряжения и токи на всех элементах силовой схемы преобразователя частоты и для двигателя. При моделировании использовались параметры двигателя 4АРМП мощностью 1600 кВт и напряжением 6 кВ; частота модуляции силовых ключей АИН-ШИМ задавалась равной 500 Гц; действующее линейное сетевое напряжение принималось равным 6,3 кВ частотой 50 Гц.

Для управления асинхронным ЭП с трехуровневым АИН-ШИМ разработана САУ, функциональная

схема которой приведена на рис. 3. В ней используются следующие обозначения: РС и РПС – регуляторы скорости и потокосцепления, РАТ и РНТ – регуляторы активной и намагничивающей проекции обобщенного вектора статорного тока двигателя, БК – блок компенсации, БФ – блок фильтрации, КП1 и КП2 – прямой и обратный координатные преобразователи, ПФ1 и ПФ2 – преобразователи фаз, БИ – блок идентификации, СУИ – система управления инвертором, В – выпрямитель, ДТ – датчик статорного тока, ДН – датчик статорного напряжения,  $V_T$  и  $R_T$  – ключ и резистор торможения.

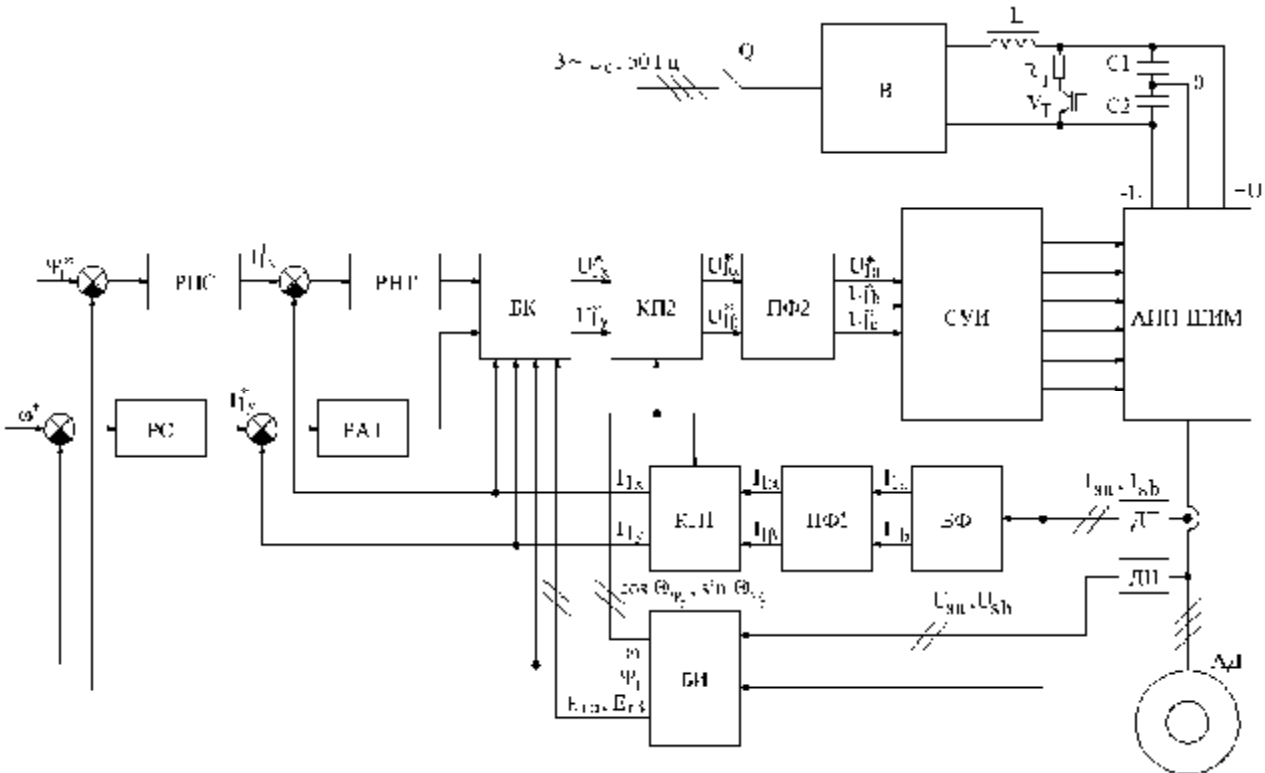


Рисунок 3 – Функциональная схема САУ электроприводом

В САУ применен разработанный авторами оригинальный блок идентификации (БИ) параметров режима АД. Он позволяет определить необходимые для регулирования параметры АД (скорость  $\omega$ , модуль потокосцепления ротора  $\Psi_r$ , гармонические функции  $\cos \Theta_{\Psi_r}$  и  $\sin \Theta_{\Psi_r}$ , проекции ЭДС ротора  $E_{ra}$  и  $E_{rb}$ ) без установки датчиков внутри и на валу двигателя и осуществляет автоматический учет изменения от нагрева активных сопротивлений статорной и роторной обмоток АД.

В системе управления инвертором (СУИ), которая обеспечивает формирование управляющих импульсов для силовых ключей АИН, использован алгоритм многоуровневой синусоидальной модуляции, предложенный в [4].

На рис. 4 приведены электромеханические процессы рассматриваемого ЭП, рассчитанные на модели, для режимов: намагничивания двигателя до номинального потока, разгона до номинальной скорости, наброса и сброса номинальной нагрузки, реверса до 0,5-кратной от номинальной скорости и

торможения до полной остановки. На этом рисунке используются следующие обозначения:  $M$  – электромагнитный момент двигателя,  $\Psi_r$  и  $I_s$  – модули обобщенных векторов потокосцепления ротора и статорного тока двигателя соответственно.

Контуры регулирования проекций статорного тока и потокосцепления ротора настроены на модульный оптимум, а скорости – на симметричный оптимум (все регуляторы для этих контуров выполнены в виде ПИ-регуляторов). Рассчитанные электромеханические процессы свидетельствуют об астатическом регулировании потокосцепления и скорости двигателя. Наблюдаемые повышенные модуляционные пульсации электромагнитного момента и статорного тока объясняются применяемой низкой частотой модуляции силовых ключей трехуровневого АИН-ШИМ для в/в ЭП большой мощности. В режиме торможения открывается ключ  $V_T$ , в результате чего поступающая от инвертора энергия рассеивается на резисторе  $R_T$ .

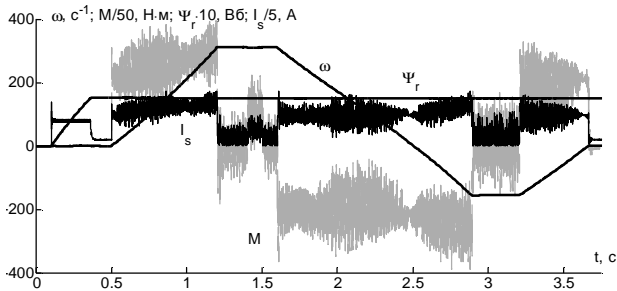
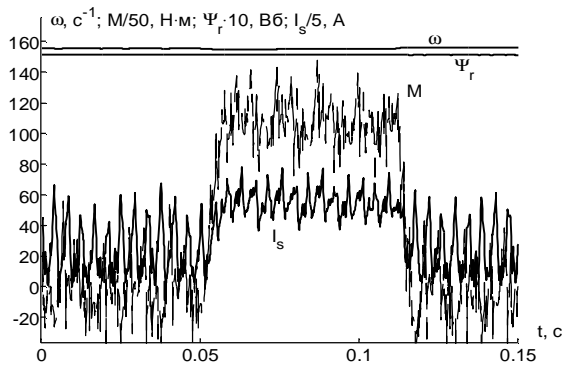
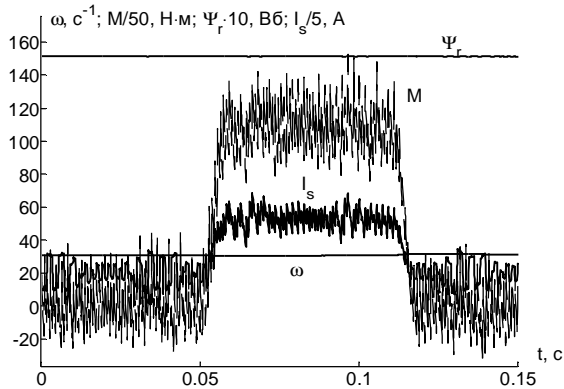


Рисунок 4 – Електромеханічні процеси в високовольтному ЕП

На рис. 5 представлені графіки обробки ударного приложення номінального моменту навантаження на різних швидкостях двигача (свідчать про астатичний характер обробки швидкості розглянутого ЕП).



а)



б)

Рисунок 5 – Обробка приложення ударного (рівного номінальному) моменту навантаження: а) – при  $\omega = 0,5\omega_n$ ; б) – при  $\omega = 0,1\omega_n$

На рис. 6 показані електромеханічні процеси розглянутого ЕП при роботі на «упор» (при заторможенному роторі двигача), які

свідчать про можливість створення в даному режимі високого значення пускового електромагнітного моменту АД.

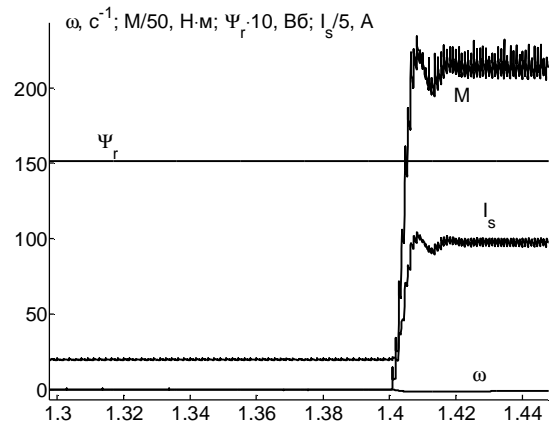


Рисунок 6 – Робота електропривода на «упор»

**Висновки.** Розроблена векторна САУ ч-р асинхронним ЕП з трьохрівневим АИН-ШИМ забезпечує високе якість динамічних процесів і астатичну точність регулювання параметрів режиму привода (проектий статорних токів, електромагнітного моменту, потокозчеплення ротора і швидкості), що дозволяє використовувати створений на її основі в/в ЕП для більшості общепромышленных механізмів.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Corzine K.A. Operation and design of multilevel inverters. – University of Missouri: Rolla, 2005. – 79 p.
2. Руденко В.С., Гончаров Ю.П., Будьонний О.В., Морозов В.Г. Перетворювальна техніка. – Харків: Фолю, 2000. – 360 с.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 663 с.
4. Walker G.R. Modulation and control of multilevel converters. – University of Queensland, 1999. – 202 p.
5. Welchko B.A., Corrêa M.B., Lipo T.A. A three-level MOSFET inverter for low power drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004. – Vol. 51, is. 3. – P. 669-674.
6. Бок А., Завгородний В., Арискин О., Шестоперов Г. Разработка трехфазного мостового инвертора для питания тяговых асинхронных электродвигателей электровозов постоянного тока // Силовая электроника – 2005. – №2. – С. 30–31.
7. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – 470 с.

Стаття надійшла 14.04.2008 р.