

## Сравнение электромеханических процессов для высоковольтного асинхронного электропривода со скалярным, квазивекторным и векторным принципами частотного управления

*С применением имитационного моделирования выполнены исследования и сравнительный анализ переходных электромеханических процессов высоковольтного асинхронного электропривода для систем автоматического управления со скалярным, квазивекторным и векторным принципами частотного регулирования.*

В настоящее время известно большое количество систем автоматического управления (САУ) частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами (ЧРАЭП), нашедших применение, в основном, при создании низковольтных электроприводов (напряжением не более 0,4 кВ). Часть из них базируется на скалярном (амплитудном) принципе управления [1–4], при котором в электроприводе задается лишь необходимое соотношение между амплитудой и частотой первых гармонических составляющих статорного напряжения (или тока). К достоинствам таких САУ относятся техническая простота, а к недостаткам – ненормированное качество (зависящее от текущих значений скорости и момента нагрузки двигателя) переходных электромеханических процессов в таких электроприводах, а в ряде случаев – даже неустойчивая работа в ряде стационарных режимов привода [3]. Несмотря на это, практически все ведущие производители (Siemens, ABB, Danfoss и др.) продолжают выпуск низковольтных ЧРАЭП с такими САУ, которые предназначены, как правило, для регулирования низкочастотных механизмов (насосы, вентиляторы). Для исключения упомянутых неустойчивых (автоколебательных) режимов ЧРАЭП со скалярным управлением в них предусмотрено принудительное запрещение работы при установившихся режимах для отдельных частотных поддиапазонов (где возможна их неустойчивая работа).

В последние годы при создании ЧРАЭП явно просматривается тенденция их построения с использованием векторного принципа управления [5–11]. При векторном принципе управления регулируется, в отличие от скалярного принципа, не только соотношение между амплитудой и частотой основных гармонических составляющих статорного напряжения (или тока), но и – фазовый сдвиг гармонических составляющих фазных статорных напряжений (или токов) относительно фазных потокоцеплений двигателя. Существенные достоинства САУ с векторным принципом управления состоят в возможности формирования ими нормированного качества переходных электромеханических процессов асинхронного электропривода и в обеспечении гарантированно устойчивой работы таких ЭП в установившихся режимах при лю-

бой скорости и нагрузке. Наряду с данными достоинствами, векторным САУ присущ следующий важный недостаток – заметно повышенная (по отношению к скалярным САУ) сложность их технической реализации, обусловленная наличием в них таких относительно сложных вычислительных устройств, как: координатные преобразователи, векторные анализаторы, блоки идентификации потокоцеплений двигателя, блоки компенсации внутренних перекрестных связей объекта управления и т. д. [5–11].

Часть из известных САУ с векторным принципом управления использует при своем функционировании датчики положения ротора [5, 6] или скорости [7], установленные на валу двигателя, что снижает эксплуатационную надежность ЧРАЭП с такими САУ и ограничивает их область применения на запыленные, агрессивные и взрывоопасные среды. Другая часть векторных САУ [9–11] не содержит датчиков на валу двигателя, вследствие чего, в свою очередь, характеризуется дополнительной повышенной технической сложностью, вызванной необходимостью косвенного определения (идентификации) потокоцеплений ротора и скорости двигателя.

При этом создание современных векторных САУ осуществляется по нескольким направлениям: на основе векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с явно выраженными модуляторами [6–8] или с использованием релейного (разрывного) управления [5, 9–11]. Последняя разновидность векторного управления обеспечивает повышенное быстродействие для ЧРАЭП, но требует одновременно с этим увеличенной частоты (до 5 кГц и более) переключения силовых ключей преобразователя частоты. К сожалению, применение данного вида управления для высоковольтных ЧРАЭП пока на практике является затруднительным, поскольку существующие силовые ключи для высоковольтных преобразователей частоты большой мощности допускают относительно невысокую частоту переключения – как правило, от 0,5 до 1 кГц.

Наряду с созданием скалярных и векторных САУ предпринимаются попытки разработки для ЧРАЭП систем автоматического управления, которые по реализуемому в них качеству электромеханических процессов электропривода приближаются к качеству при-

сущему векторным САУ, а по технической сложности их реализации – являются существенно проще векторных САУ. Такие САУ получили название «квазивекторных» [12] и могут быть на практике реализованы как с установкой на валу двигателя датчика скорости [13], так и – без установки этого датчика [12, 14]. Как известно, для большинства общепромышленных (в том числе – высоковольтных) ЧРАЭП предпочтительно создание САУ без датчиков на валу двигателя, что повышает их эксплуатационную надежность, упрощает конструкцию двигателя (не требует изготовления второго конца вала) и расширяет область применения привода на запыленные, агрессивные и взрывоопасные среды [9].

При создании САУ для высоковольтных ЧРАЭП необходимо дополнительно принимать во внимание следующие особенности высоковольтного электропривода:

- техническая сложность осуществления потенциальных развязок (вследствие чего желательны уменьшение количества датчиков с высоковольтными потенциальными развязками);
- ограниченная частота (менее 1 кГц) переключения существующих силовых ключей, используемых при создании преобразователей частоты большой мощности;
- повышенный уровень пульсаций статорных токов и электромагнитного момента двигателя (обусловленный отмеченной невысокой частотой переключения силовых ключей высоковольтного преобразователя частоты), затрудняющий на практике формирование нормированных электромеханических процессов электропривода и идентификацию параметров режима двигателя;
- проявляющаяся на практике с ростом мощности асинхронных двигателей их склонность к автоколебаниям в электромеханических процессах (что обусловлено увеличением при этом соотношения между значениями индуктивностей и активных сопротивлений в схеме замещения двигателя);
- уменьшенные запасы по механической прочности для двигателя, редуктора и рабочего механизма, присущие электроприводам большой мощности (в сравнении с ЭП малой и средней мощности), которые предъявляют повышенные требования к нормированию (поддержанию в допустимых границах) электромагнитного момента и статорного тока двигателя в рабочих режимах, а также, при необходимости, – к ограничению ускорений рабочего механизма.

К сожалению, несмотря на существующее многообразие выпускаемых низковольтных ЧРАЭП в Украине и за рубежом, в настоящее время высоковольтные ЧРАЭП производятся в мире всего лишь несколькими ведущими фирмами: Siemens, ABB, Mitsubishi, Allen Bradley, а также ОАО НИИ «Преобразователь» (Украина), – что связано, прежде всего, как с технической сложностью создания высоковольтных преобразователей частоты, так и с техническими трудностями создания САУ для таких электроприводов, вызванными упомянутыми особенностями управления высоковольтными ЧРАЭП. До настоящего времени в известной отечественной и зарубежной научно-технической литературе уделено недостаточное внимание вопро-

сам рационального выбора принципов частотного управления при создании САУ для высоковольтных ЧРАЭП (которыми бы учитывались в полной мере отмеченные особенности высоковольтного электропривода). Также остаются мало освещенными вопросы исследования электромеханических процессов асинхронных электроприводов для разных применяемых в них принципах частотного управления.

Предложенная статья посвящена исследованию и сравнению между собой электромеханических процессов при скалярном, квазивекторном и векторном принципах частотного управления для высоковольтного асинхронного электропривода, созданного на основе автономного инвертора напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией.

Для проведения данных исследований были разработаны имитационные модели электроприводов со скалярным [15], квазивекторным [12] и векторным [16] принципами управления. Имитационные модели учитывают фактическую дискретность работы силовых ключей выпрямителя и инвертора [15], а также используют общепринятое идеализированное представление АД [9]. Моделирование электромеханических процессов на созданных моделях производилось для параметров двигателя и частотного преобразователя, приведенных в табл. 1 и табл. 2. При моделировании частота синусоидальной ШИМ силовых ключей АИН задавалась равной 500 Гц. Квазивекторная САУ была выполнена двухконтурной: с внутренним контуром регулирования электромагнитного момента и внешним контуром регулирования частоты статора двигателя (при пропорционально-интегральных регуляторах момента и частоты). Векторная САУ содержала два канала регулирования (потокосцепления и скорости) и использовала косвенную идентификацию (через статорные напряжения и токи) потокосцепления ротора и скорости двигателя. Оба канала регулирования векторной САУ выполнены двухконтурными: с внутренними регуляторами намагничивающей и активной составляющих статорного тока и внешними регуляторами потокосцепления ротора и скорости двигателя (с настройкой контуров регулирования токов и потокосцепления на модульный оптимум, а контура скорости – на симметричный оптимум; все регуляторы – пропорционально-интегральные). В имитационных моделях расчеты электромеханических процессов двигателя и электромагнитных процессов преобразователя частоты производились с временной дискретностью менее 1 мкс, скалярной и квазивекторной САУ – с дискретностью 100 мкс, а векторной САУ – с дискретностью 20 мкс.

С использованием разработанных моделей ЧРАЭП было проведено моделирование электромеханических процессов при различных режимах работы электропривода. Полученные результаты моделирования представлены в виде временных диаграмм на рис. 1– рис. 8. На этих диаграммах использованы следующие обозначения:  $\omega$  – скорость вращения ротора,  $M$  – электромагнитный момент,  $I_s$  – модуль вектора статорного тока,  $\Psi_r$  – потокосцепление ротора двигателя.

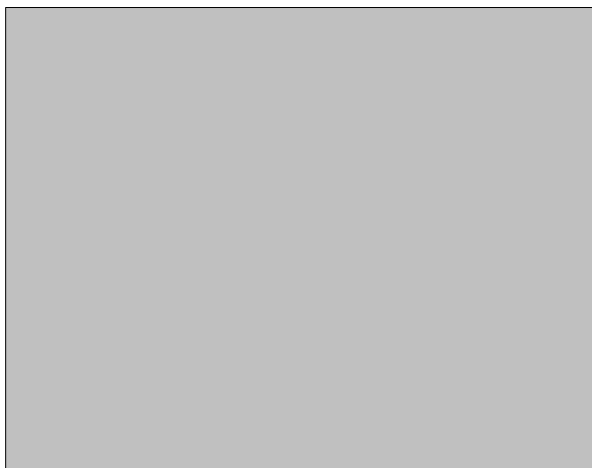
На рис. 1 показан предельный по быстрдействию

Таблиця 1. Номинальные параметры двигателя

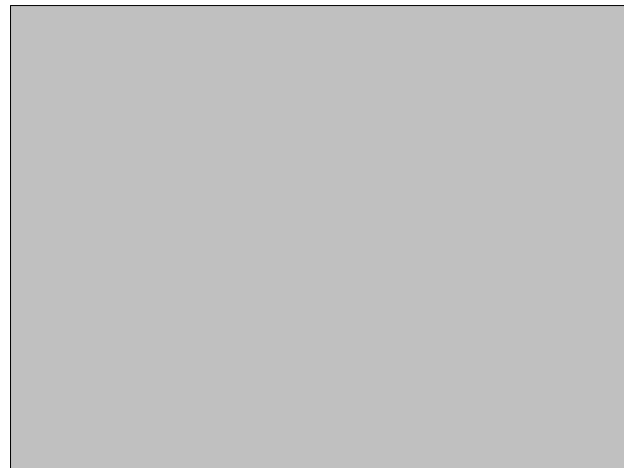
Тип двигателя	4АРМП
Мощность, кВт	1600
Скорость, с <sup>-1</sup>	311
Число пар полюсов	1
Линейное действующее напряжение, В	6000
Фазный действующий ток статора, А	179
Электромагнитный момент, Нм	5176
Магнитный поток в воздушном зазоре, Вб	14,3
Активное сопротивление статора, Ом	0,213
Активное сопротивление ротора, Ом	0,1692
Индуктивность рассеяния статора, Гн	3,05·10 <sup>-3</sup>
Индуктивность рассеяния ротора, Гн	2,65·10 <sup>-3</sup>
Индуктивность намагничивания, Гн	0,152
Приведенный к валу двигателя момент инерции привода, кг·м <sup>2</sup>	29

Таблиця 2. Номинальные параметры преобразователя частоты

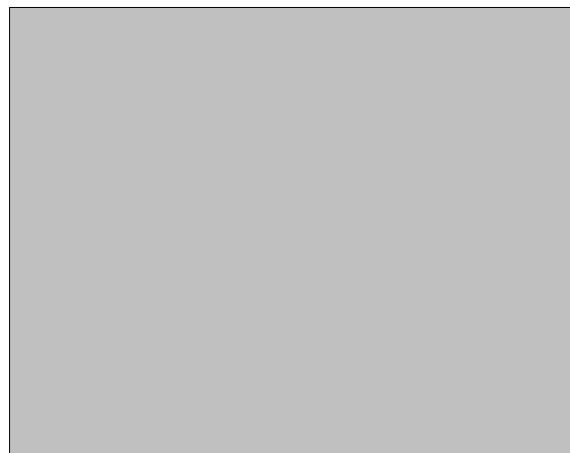
Тип преобразователя	В-ОППД-200-6,3к-50
Выходной действующий ток, А	200
Выходное линейное действующее напряжение, В	6300
Выходная частота, Гц	50
Начальное падение напряжения на открытом IGBT-тиристоре, В	4Ч1,65
Начальное падение напряжения на открытом обратном диоде, В	4Ч3,15
Дифференциальное сопротивление открытого IGBT-тиристора, мОм	4Ч1,2
Дифференциальное сопротивление открытого обратного диода, мОм	4Ч3,2
Начальное падение напряжения на открытом тиристоре выпрямителя, В	6Ч1,2
Дифференциальное сопротивление открытого тиристора выпрямителя, мОм	6Ч0,63
Входное напряжение инвертора, В	8100
Емкость конденсатора фильтра, мкФ	375



а)

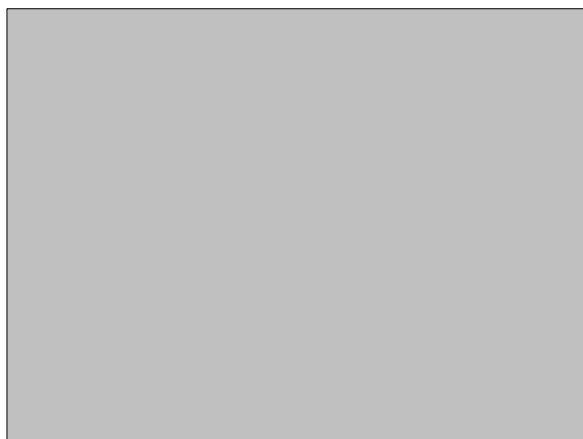


б)

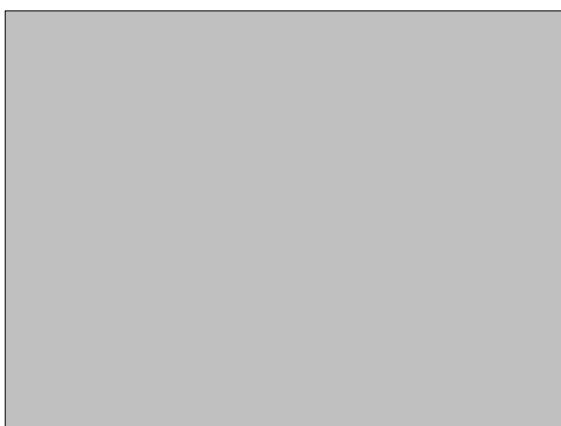


в)

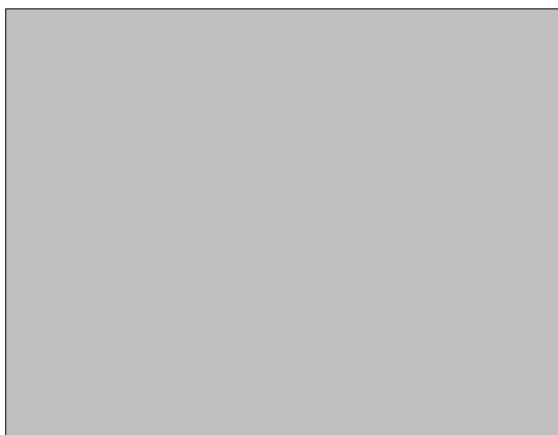
Рис. 1. Электромеханические процессы разгона ЭП на холостом ходу до номинальной скорости при скалярном (а), квазивекторном (б) и векторном (в) управлении



а)



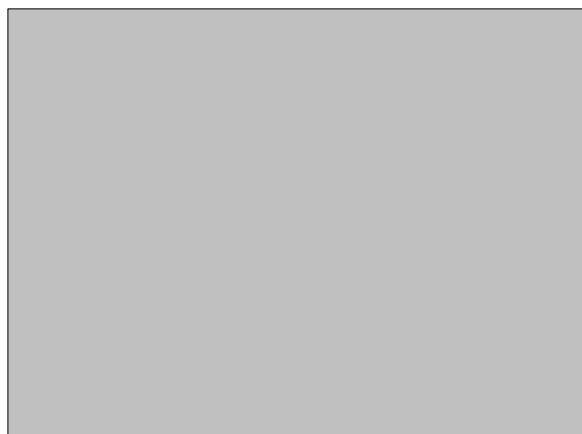
б)



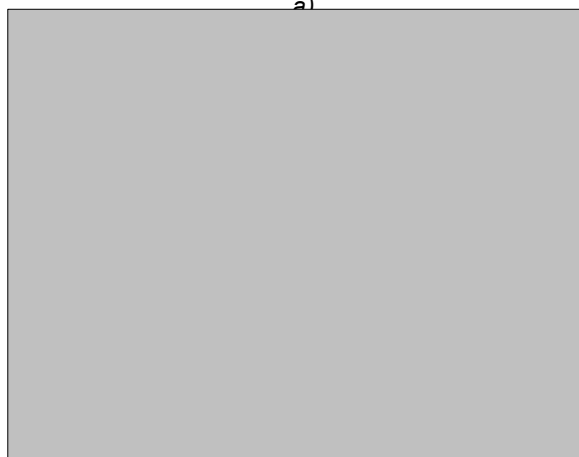
в)

Рис. 2. Электромеханические процессы разгона ЭП при вентиляторной нагрузке до номинальной скорости при скалярном (а), квазивекторном (б) и векторном (в) управлении

(исходя из заданного токоограничения) режим разгона двигателя на холостом ходу от нуля до номинальной скорости  $\omega_n$ . На рис. 2 приведены временные диаграммы для разгона от задатчика интенсивности (за время равное 5 с) при вентиляторной нагрузке ( $M \sim \omega^2$ ) от нуля до номинальной скорости двигателя. На рис. 3 представлены временные диаграммы предельного по быстрдействию разгона при номинальной нагрузке



а)



б)



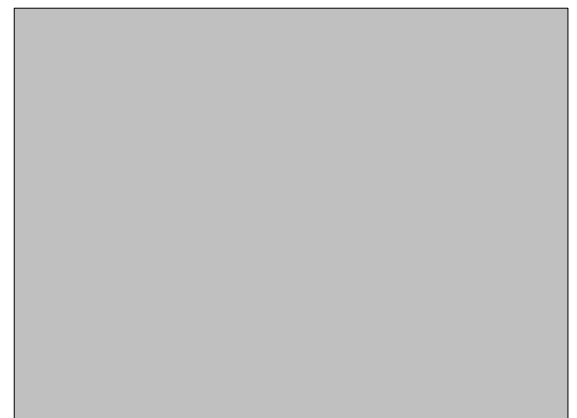
в)

Рис. 3. Электромеханические процессы разгона ЭП при номинальной нагрузке до номинальной скорости при скалярном (а), квазивекторном (б) и векторном (в) управлении

( $M = M_n$ ) от нуля до номинальной скорости двигателя. На рис. 4 показаны электромеханические процессы, происходящие при набросе номинальной нагрузки на различных скоростях двигателя. На рис. 5 приведены временные диаграммы для режима предельного по быстрдействию торможения двигателя на холостом ходу от номинальной скорости до полной остановки. На рис. 6 представлены временные диаграммы тор-



а)



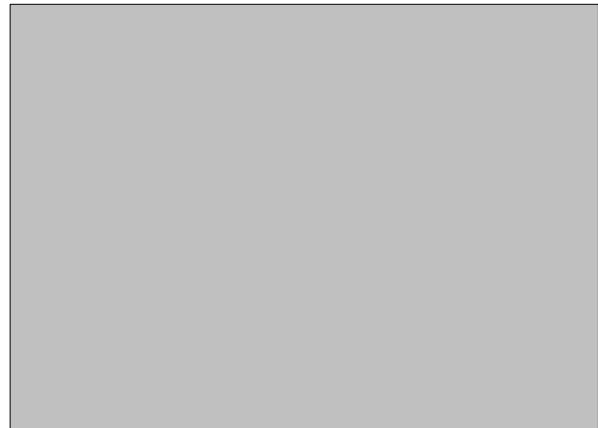
б)



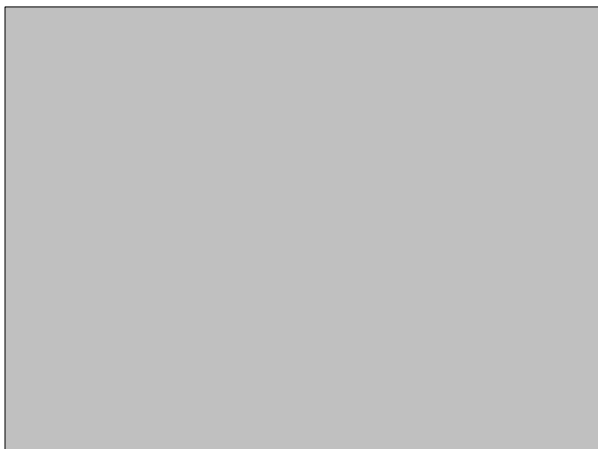
в)

Рис. 4. Электромеханические процессы наброса номинальной нагрузки при различных скоростях (а – при  $\omega_H$ ; б – при  $0,5\omega_H$ ; в – при  $0,1\omega_H$ ) для скалярной (кривая 1), квазивекторной (кривая 2) и векторной САУ (кривая 3)

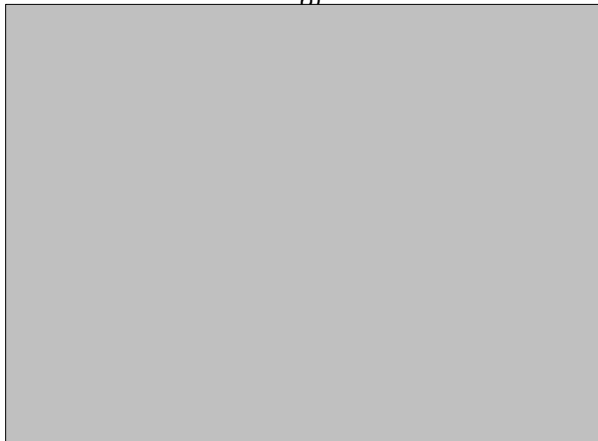
можения двигателя от задатчика интенсивности (за время равное 5 с) при вентиляторной нагрузке от номинальной скорости до полной остановки. На рис. 7 приведены временные диаграммы реверса двигателя на холостом ходу. На рис. 8 представлены временные диаграммы предельного по быстрдействию реверса двигателя при реактивном характере номиналь-



а)



б)



в)

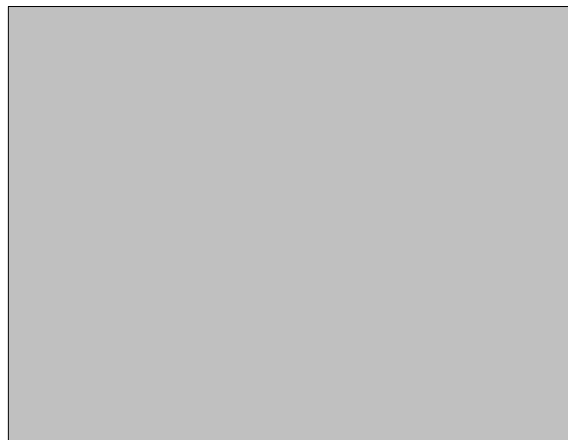
Рис. 5. Электромеханические процессы торможения ЭП на холостом ходу от номинальной скорости до полной остановки при скалярном (а), квазивекторном (б) и векторном (в) управлении

ного момента нагрузки  $M_c = \text{sign}(\omega) \cdot M_H$ .

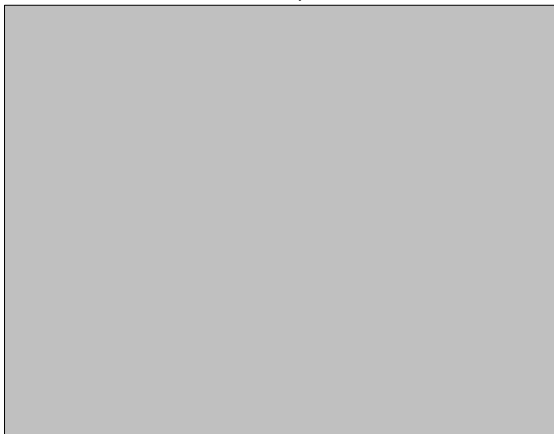
В табл. 3 показаны результаты количественного сравнения качественных показателей регулирования для ЧРАЭП, полученные из временных диаграмм на рис. 1– рис. 8 для скалярной, квазивекторной и векторной систем управления.



а)



б)



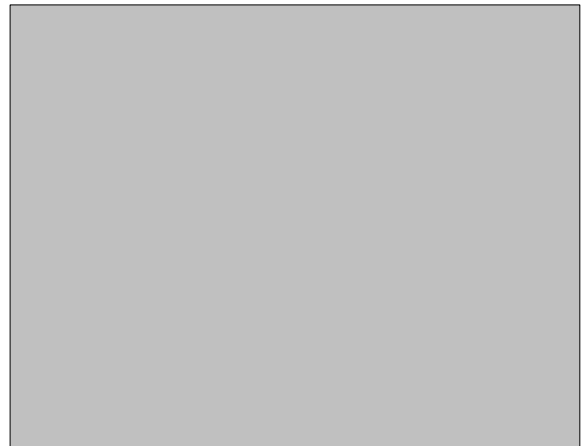
в)

Рис. 6. Электромеханические процессы торможения ЭП при вентиляторной нагрузке от номинальной скорости до полной остановки при скалярном (а), квазивекторном (б) и векторном (в) управлении

### Выводы

1. Наилучшие точность поддержания скорости, быстродействие и приближение к нормированному качеству переходных процессов в высоковольтном ЧРАЭП достигается посредством САУ с векторным принципом управления.

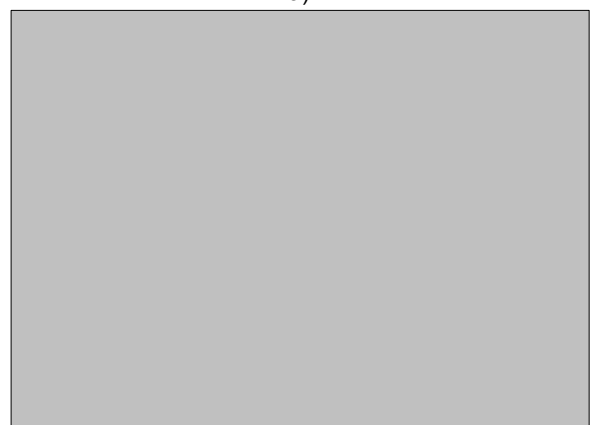
2. Применительно к низкодинамичным (насосы, вентиляторы) высоковольтным электроприводам при-



а)



б)



в)

Рис. 7. Электромеханические процессы реверса ЭП на холостом ходу до номинальной скорости при скалярном (а), квазивекторном (б) и векторном (в) управлении

емлемое быстродействие и качество электромеханических процессов привода может быть обеспечено посредством САУ с квазивекторным принципом частотного регулирования (в этом случае близкое по качеству и быстродействию к векторным САУ).

3. По сравнению со скалярным и квазивекторным принципами частотного регулирования в высоковольтных ЧРАЭП с векторным управлением наблюдаются повышенные значения размаха модуляционных пуль-

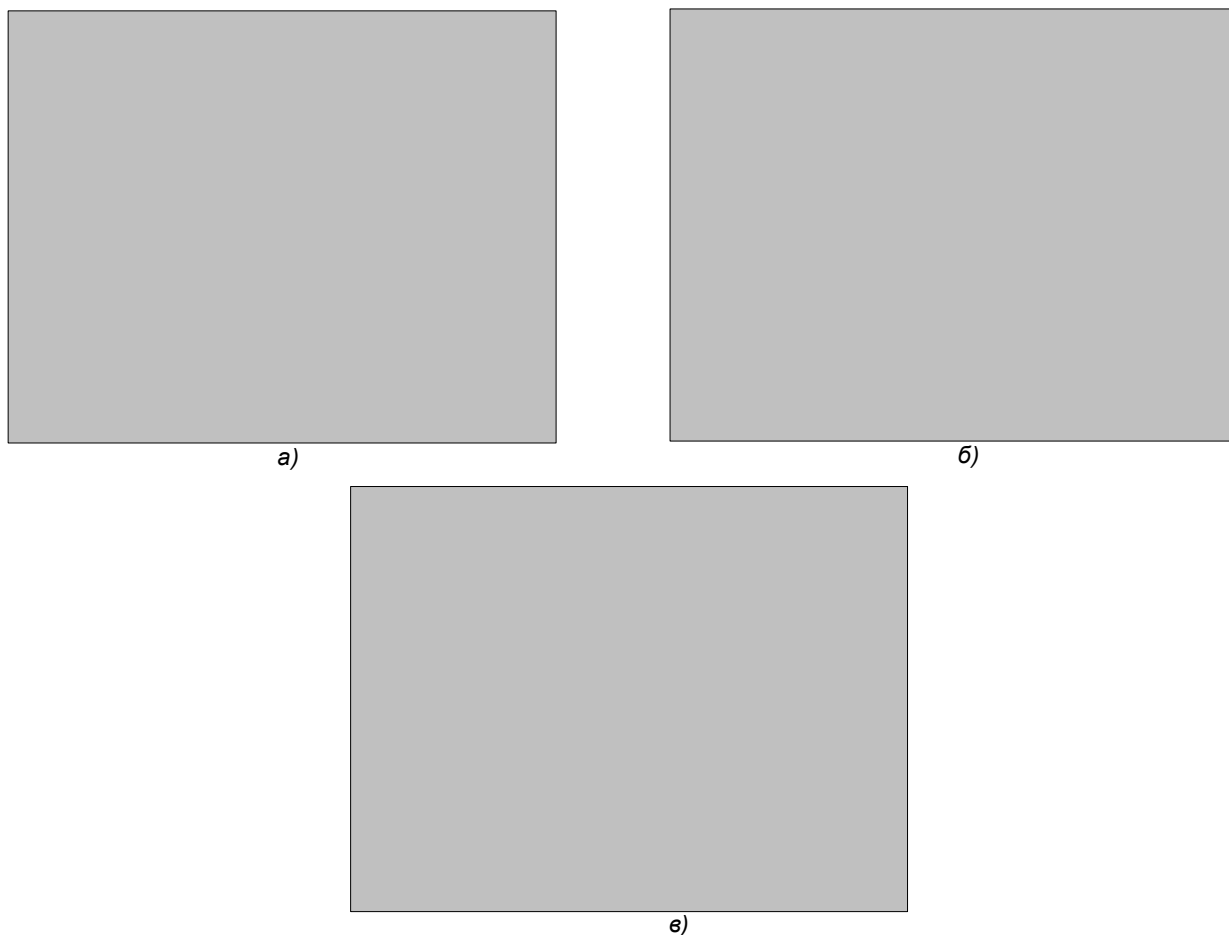


Рис. 8. Электромеханические процессы реверса ЭП при реактивной номинальной нагрузке до номинальной скорости при скалярном (а), квазивекторном (б) и векторном (в) управлении

Таблица 3. Сравнение качества регулирования высоковольтного ЭП при различных принципах частотного управления

Наименование параметра САУ	Тип нагрузки	Принцип частотного управления		
		скалярный	квазивекторный	векторный
Время разгона от нуля до номинальной скорости, с	х.х.	2,9	1,42	0,82
	вент.	5	5	5
	ном.	3	1	1,5
Отношение перегулирования скорости при разгоне к номинальной скорости, %	х.х.	1,2	1,9	0,5
	вент.	0,26	0,87	0,29
	ном.	1,7	1,7	0,5
Время торможения от номинальной скорости до останова, с	х.х.	3	2	1
	вент.	5	5	5
	ном.	2,2	3,5	2,2
Отношение максимального тока к номинальному при разгоне, о. е.	вент.	2	2	1,6
Отношение максимального момента к номинальному в установившемся режиме, о. е.		1,4	1,4	1,8
Отношение динамического провала скорости при набросе номинальной нагрузки к номинальной скорости, %		1,7	1,56	0,26
Отношение статической ошибки скорости при номинальной нагрузке к номинальной скорости, %		1,2	1,05	0

саций электромагнитного момента двигателя, что обусловлено влиянием несинусоидальных по форме статорных токов (при применяемой низкой частоте ШИМ) на быстродействующие регуляторы, активной и намагничивающей составляющих статорного тока двигателя.

#### Перечень ссылок

1. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Наука, 1966. – 298 с.
2. Сандлер А. С., Сарбатов Р. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
3. Кривицкий С. О., Эпштейн И. И., Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами. – М.: Энергия, 1970. – 152 с.
4. Преобразователь частоты для приводов с короткозамкнутыми асинхронными электродвигателями SAMI // Описание 772 SAMI 23, Strumberg, 1980-03-20, С. 14–25.
5. Бродовский В. Н., Иванов Е. С. Приводы с частотно-токовым управлением. – М.: Энергия, 1974. – 168 с.
6. Шрейнер Р. Т., Дмитренко Ю. А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
7. Рудаков В. В., Столяров И. М., Дартау В. А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.
8. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die Transvector – Regelung von Asynchronmaschinen. – Siemens-Zeitschrift. – Bd.45. – 1971. – № 10. – S. 757–760.
9. Пивняк Г. Г., Волков А. В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – 470 с.
10. Aaltonen M., Titinen P., Helkkila S. Direct Torque Control of AC motor drives. ABB Review. – 1995. – № 3. – P. 19–24.
11. Перельмутер В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. – Харьков: Основа, 2004. – 210 с.
12. Волков А. В. Квазивекторное управление частотно-регулируемым асинхронным двигателем // Техн. електродинаміка. – 1999. – № 3. – С. 32–36.
13. Эпштейн И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.
14. Anters E. Variable speed a. c. drives for severe environments // Electrical Engineer. – 1978. – October. – Vol.55. – № 10. – P. 18–55.
15. Волков А. В., Скалько Ю. С. Цифровая модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. – № 2. – С. 75–81.
16. Волков А. В., Скалько Ю. С. Высоковольтный частотно-регулируемый асинхронный электропривод // Техн. електродинаміка: Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Ч. 5. – С. 27–30.

Поступила в редакцію 12.06.08 з.

*З використанням імітаційного моделювання виконано дослідження та порівняльний аналіз перехідних електромеханічних процесів високовольтного асинхронного електропривода для систем автоматичного керування зі скалярним, квазивекторним та векторним принципами частотно-регулювання.*

*Using simulation technique investigation and comparative analysis of electromechanical processes in high-voltage asynchronous electric drive for control systems with scalar, quasivector and vector frequency control principles are made.*

УДК 621.313.222.62-83

А. Р. Лучко, Е. В. Страколист

## Уточненная имитационная модель тягового электродвигателя постоянного тока со смешанным возбуждением

*С использованием пакетов программ ELCUT и MathCAD разработана уточненная модель электродвигателя постоянного тока со смешанным возбуждением и выполнен с её использованием пример расчета электромеханических процессов тягового двигателя постоянного тока для отечественного троллейбуса*

В настоящее время в городском электротранспорте (троллейбус, трамвай) широко применяются тяговые электроприводы постоянного тока с двигателями смешанного возбуждения (ДПТ СВ). Однако, для ис-

следования электромеханических переходных процессов в ДПТ СВ до настоящего времени, к сожалению, используются довольно упрощенные методики и имитационные модели [1, 2], не учитывающие конструк-

© А. Р. Лучко, Е. В. Страколист 2008 р.