

УДК 621.314.26

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

М. Ю. Юхименко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: saue1@kdu.edu.ua

Доказана возможность использования разработанного способа управления силовыми ключами транзисторного преобразователя переменного напряжения в цепи статора асинхронного двигателя для улучшения энергетических и регулировочных показателей электропривода. Выполнена комплексная оценка и сравнение энергетических и регулировочных показателей разработанной системы и наиболее распространенных систем электропривода промышленных механизмов. Определена область рационального использования разработанной системы и типовые механизмы, в которых она может использоваться. Выполнена оценка технико-экономических показателей разработанной системы.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, транзисторный преобразователь напряжения, алгоритмы управления, регулировочные показатели, энергетическая эффективность.

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СПОСОБУ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ ІЗ КОРОТКОЗАМКНУТИМ РОТОРОМ

М. Ю. Юхименко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: saue1@kdu.edu.ua

Доведено можливість використання розробленого способу управління силовими ключами транзисторного перетворювача змінної напруги в колі статора асинхронного двигуна для покращення енергетичних і регулювальних показників електропривода. Виконано комплексну оцінку й порівняння енергетичних і регулювальних показників розробленої системи та найбільш поширених систем електропривода загальнопромислових механізмів. Визначено галузь раціонального використання розробленої системи й типові механізми, в яких вона може використовуватися. Виконано оцінку техніко-економічних показників розробленої системи.

Ключові слова: асинхронний двигун, транзисторний перетворювач напруги, алгоритми управління, регулювальні показники, енергетична ефективність.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время большинство промышленных механизмов, в особенности требующих пониженной скорости вращения при работе без нагрузки, таких, как транспортеры в ночное время суток, вентиляторы, насосы, компрессоры, воздуходувки, остаются нерегулируемыми. В условиях роста цен на электроэнергию и другие виды энергоресурсов насущной необходимостью является их модернизация. Такие механизмы потребляют до 25–30 % всей электроэнергии [1]. Из-за отсутствия регулирования производительности изменением частоты вращения для них характерно завышенное электропотребление. Переход к регулированию частоты вращения приводит к заметной экономии электроэнергии, в некоторых случаях до 30–40 % [1].

Существующие современные двухзвенные преобразователи частоты, построенные на полностью управляемых силовых ключах, решают задачу регулирования скорости механизма. Однако их применение не всегда оправданно из-за высокой стоимости, сложности эксплуатации, высоких требований к уровню квалификации обслуживающего

персонала. Кроме того, подобные системы часто имеют избыточные регулировочные возможности.

Существуют также простые способы регулирования скорости: переключение числа пар полюсов в двигателе, регулирование напряжения на статоре, импульсное регулирование и т.д. Данные способы обладают незначительными капитальными затратами и просты в эксплуатации. Вместе с тем, реализация указанных способов сопровождается значительными потерями энергии, главным образом, за счет скольжения.

Для названного класса механизмов, не требующих высокой точности поддержания скорости, полезно найти решения, которые, с одной стороны, соответствовали бы требованию простоты реализации, а с другой – не вносили бы увеличение потерь скольжения в асинхронном двигателе (АД). По этой причине представляются актуальными разработка и использование возможностей электропривода (ЭП) с таким способом управления, который бы обеспечивал снижение энергии потерь при одновременной реализации простейших задач регулирования скорости.

Автором предложен способ регулирования скорости асинхронного электропривода на базе транзисторных преобразователей напряжения с комбинированным управлением силовыми ключами, отличающийся относительной простотой (для регулирования используется один транзистор в каждой фазе цепи статора) и сравнительно небольшими электрическими потерями.

С учетом сказанного, целью работы является обоснование возможности применения разработанного автором способа управления силовыми ключами транзисторного преобразователя переменного напряжения в цепи статора асинхронного двигателя для улучшения энергетических и регулировочных показателей электропривода.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. При решении задач повышения энергетической эффективности и улучшения гармонического состава выходного напряжения полупроводниковых преобразователей для питания асинхронных двигателей используются различные комбинации фазового и широтно-импульсного способов регулирования сетевого напряжения. При этом напряжение питания от источника синусоидального напряжения преобразовывается различными способами, основной целью которых является обеспечение приемлемых показателей преобразования электрической энергии асинхронными двигателями.

Предлагаемый способ управления электроприводом [2] имеет следующие особенности: простая схема транзисторного коммутатора (в случае трехфазного асинхронного двигателя требуется лишь три транзисторных ключа), уменьшаются потери, вызванные высшими гармониками тока и напряжения, для реверса электропривода не требуется двойного комплекта транзисторного коммутатора (в этом случае за счет изменения знака напряжения на выходе регулятора работает транзистор, обеспечивающий другую полярность импульсов напряжения и знак электромагнитного момента двигателя).

Питание двигателя трехфазным напряжением в схеме управления на основе транзисторного преобразователя при формировании пониженной частоты вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с малой нагрузкой является наиболее простым. При формировании напряжения на обмотку ротора в определенной последовательности подаются импульсы сетевого напряжения. Процесс формирования выходного напряжения трехфазного преобразователя показан на рис. 1. Характер изменения напряжения соответствует случаю питания активно-индуктивной нагрузки (все обмотки двигателя имеют активно-индуктивное сопротивление и не учитывается противоЭДС двигателя), что позволяет наиболее наглядно представить алгоритмы управления вентилями (рис. 2).

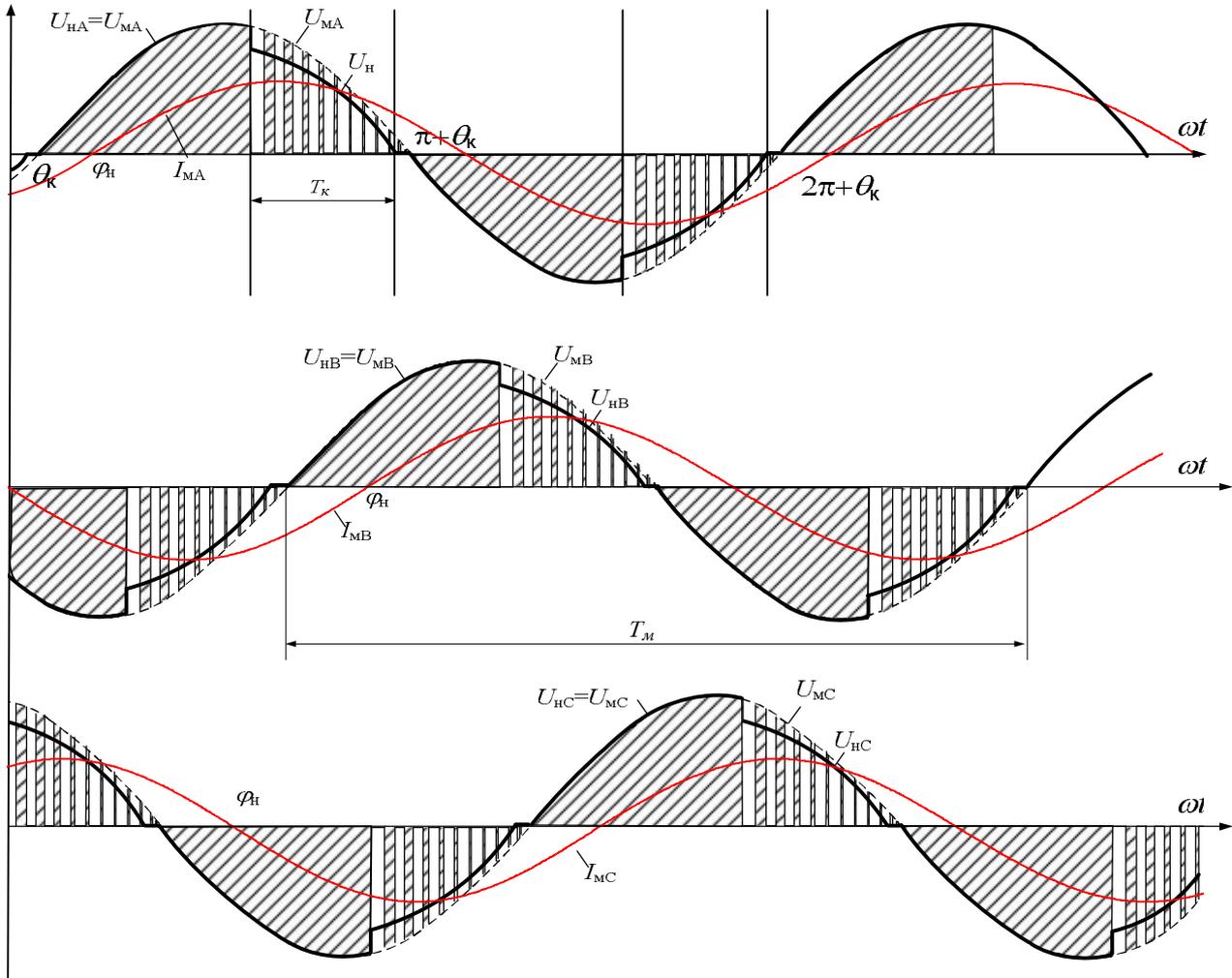


Рисунок 1 – Временные диаграммы, иллюстрирующие процесс формирования выходного напряжения для предложенного способа управления ключами транзисторного преобразователя

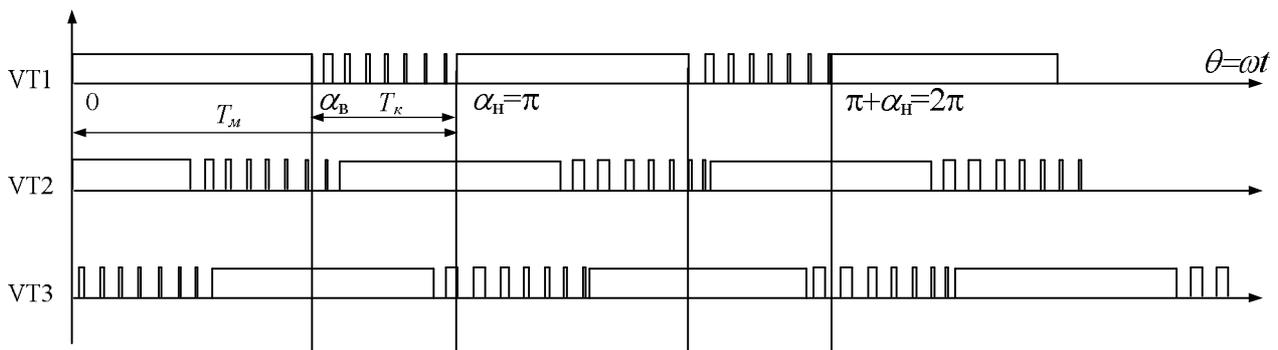


Рисунок 2 – Временные диаграммы, иллюстрирующие алгоритм формирования импульсов управления транзисторами в каждой фазе преобразователя

На рис. 1, 2 приняты следующие обозначения: U_{MA} – напряжение фазы А питающей сети; U_{MB} – напряжение фазы В питающей сети; U_{MC} – напряжение фазы С питающей сети;

U_{iA} – напряжение фазы А нагрузки; U_{iB} – напряжение фазы В нагрузки; U_{iC} – напряжение фазы С нагрузки; I_{mA} – нагрузочная составляющая тока фазы А сети; I_{mB} – нагрузочная составляющая тока фазы В сети; I_{mC} – нагрузочная составляющая тока фазы С сети; VT1, VT2, VT3 – сигналы управления транзисторами 1, 2, 3 фазы А, В и С, соответственно; α_B – угол открытия транзистора при положительной полуволне питающего напряжения; α_H – угол открывания транзистора при отрицательной полуволне питающего напряжения; θ_K – угол опережения момента перехода напряжения сети через нулевое значение; φ_H – фазовый угол нагрузки; T_K – период коммутации силового транзисторного ключа при формировании модулированной части полуволны напряжения нагрузки; T_M – период сетевого напряжения.

При этом изменение величины коэффициента заполнения импульсов модулированного напряжения реализуется по синусоидальному закону от начального рассчитанного значения до нуля. Это позволяет улучшить гармонический состав выходного напряжения, уменьшить влияние преобразующего устройства на сеть питания и других потребителей, повышает энергетическую эффективность электроприводов технологических механизмов с асинхронными двигателями при формировании специальных режимов работы или при пуске.

Характеристики преобразователя, показанные на рис. 3, подтверждают вывод, что предложенный способ позволяет получить более низкий коэффициент гармоник, чем традиционное управление преобразователем напряжения с равномерной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

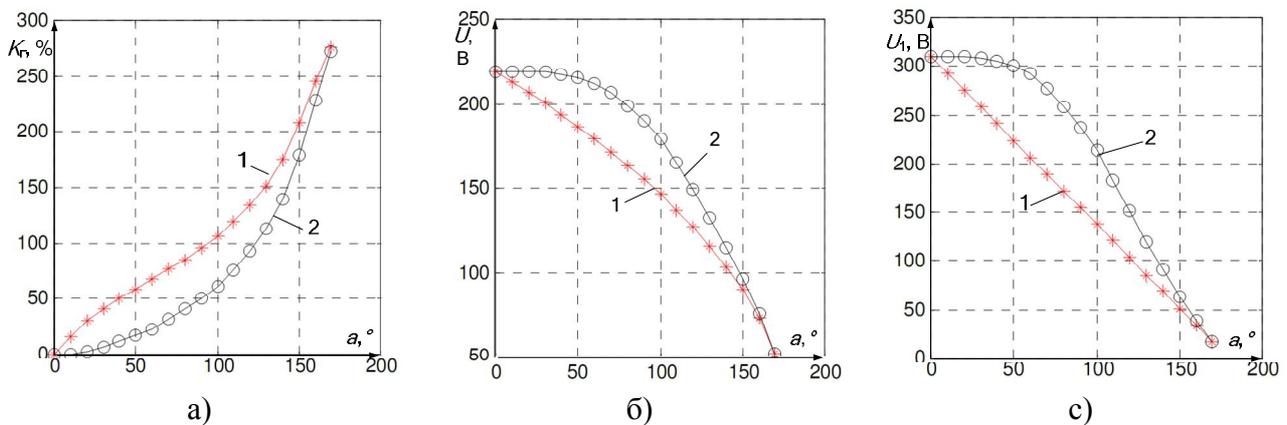


Рисунок 3 – Результаты сравнения характеристик традиционного преобразователя с ШИМ и предложенного способа управления в функции α :

- а) значение коэффициента гармоник; б) действующее значение выходного напряжения;
 в) амплитуда основной гармоники
 (кривая 1 – характеристики для традиционной ШИМ; кривая 2 – для предлагаемого способа)

Для оценки возможности практического использования разработанного способа управления электроприводом с АД на основе транзисторного преобразователя напряжения в цепи статора был выполнен сравнительный анализ разработанной системы ЭП и наиболее распространенных систем электроприводов, применяемых в промышленных механизмах. На основании сравнительного анализа регулировочных характеристик известных систем ЭП и предложенного способа управления была составлена сводная таблица регулировочных

показателей наиболее распространенных в промышленности систем электропривода (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что лучшими регулировочными возможностями обладают системы электропривода НПЧ–АД и АИН–АД. Представляемая система ТрПН–АД занимает промежуточное положение между системами с малым диапазоном регулирования и частотным регулированием.

Таблица 1 – Сравнение регулировочных характеристик наиболее распространенных систем электроприводов промышленных механизмов

№ п/п	Система электропривода	Диапазон регулирования скорости
1	Система с кулачковым командоконтроллером	3:1
2	Система с магнитным контроллером	4:1
3	Тиристорный регулятор напряжения–асинхронный двигатель (ТРН–АД)	10:1
4	Система генератор–двигатель (Г–Д)	10:1
5	Транзисторный преобразователь напряжения–асинхронный двигатель (ТрПН–АД)	(10–20):1
6	Непосредственный преобразователь частоты–асинхронный двигатель (НПЧ–АД)	(40–60): 1
7	Автономный инвертор напряжения–асинхронный двигатель (АИН–АД)	100:1

Для сравнения энергетических показателей рассматриваемых систем электропривода с асинхронными двигателями в контексте регулировочных характеристик проведем сопоставление их комплексных характеристик.

Как правило, при сравнении энергетических характеристик в электроприводах используется выражение для мощности на валу электродвигателя через потребляемую мощность из сети переменного тока [3]:

$$P_2 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \phi \eta, \quad (1)$$

где U_1 – напряжение сети; I_1 – ток фазы статора, потребляемый из сети; $\cos \phi$ – коэффициент сдвига по первой гармонике; η – КПД электродвигателя.

При комплексном определении энергоэффективности асинхронного двигателя показатели $\cos \phi$ и η следует рассматривать шире, чем только коэффициент мощности по первой гармонике напряжения и КПД только асинхронного двигателя. Следует учитывать искажения переменных (U , I) на всем пути преобразования электрической энергии и КПД всех электрических и электромеханических преобразователей, входящих в систему электропривода.

Для комплексной оценки энергетических характеристик со стороны сети рассмотрим следующие показатели:

– коэффициент мощности κ_m , определяемый по выражению [1]:

$$\kappa_m = \kappa_i \kappa_u \cos \phi, \quad (2)$$

где κ_i – коэффициент искажения тока сети; κ_u – коэффициент искажения напряжения сети;

– коэффициент искажения тока сети определяется по выражению

$$\kappa_i = \frac{I_{(1)}}{I}, \quad (3)$$

где $I_{(1)}$ – действующее значение первой гармоники тока; I – действующее (среднеквадратичное) значение тока;

– коэффициент искажения напряжения сети определяется по выражению

$$k_U = \frac{U_{(1)}}{U}, \quad (4)$$

где $U_{(1)}$ – действующее значение первой гармоники напряжения; U – действующее (среднеквадратичное) значение напряжения;

– коэффициент полезного действия (КПД) системы электропривода в целом η_{Σ} , включающий в себя:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_d \eta_{np} \eta_{tr}, \quad (5)$$

где η_d – КПД электродвигателя; η_{np} – КПД преобразователя; η_{tr} – КПД трансформатора.

Коэффициент искажения напряжения k_U при условии достаточно мощной сети и синусоидальности питающего напряжения принимается для всех систем равным единице [4]. Данное предположение справедливо, поскольку реальные значения этого коэффициента, как правило, мало отличаются от единицы.

Оценка и сравнение энергетических показателей систем электропривода, в зависимости от диапазона регулирования, производилась для следующих условий: номинальная мощность двигателя выбиралась приблизительно равной 50 кВт, перегрузочная способность $\lambda = M_{\max} / M_n = 2$. Для каждого значения диапазона регулирования определялись энергетические показатели при минимальном среднем значении частоты вращения вала двигателя и значении момента нагрузки, равном номинальному.

Оценка энергетической эффективности систем электропривода производилась для всех случаев с использованием суммарного коэффициента энергетической эффективности $\hat{\epsilon}_{\Sigma}$, определяемого из выражения

$$k_{\Sigma} = k_i \cos \varphi \eta_{\Sigma} k_{ud}, \quad (6)$$

где k_{ud} – коэффициент искажения тока двигателя.

Для систем электропривода, управляемых кулачковым командоконтроллером и с магнитным контроллером, а также для системы ТРН–АД исследования проводились в диапазоне $D=10:1$, т.к. регулирование скорости в них производится изменением скольжения, а для систем с частотным управлением – при $D=100:1$.

Кривые зависимости суммарного коэффициента k_{Σ} от диапазона регулирования D для сравниваемых систем электропривода представлены на рис. 4 (для $D = 10:1$) и на рис. 5 (для $D=100:1$). По результатам анализа полученных зависимостей могут быть сделаны следующие выводы.

1. Системы управления электроприводом с кулачковыми и магнитными контроллерами, системы ТРН–АД, НПЧ–АД, ТП–Д, АД–Г–Д обладают наихудшими энергетическими показателями.

2. Системы электропривода ТП–Д и НПЧ–АД при условии использования многоступенчатого фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ) обладают одними из лучших энергетических показателей. Следовательно, применение указанных систем в глубокорегулируемых приводах без ФКУ не рекомендуется.

3 Среди систем с частотным регулированием (системы с АИН) лидером является система с активным передним фронтом АФЕ–АИН (ШИМ)–АД.

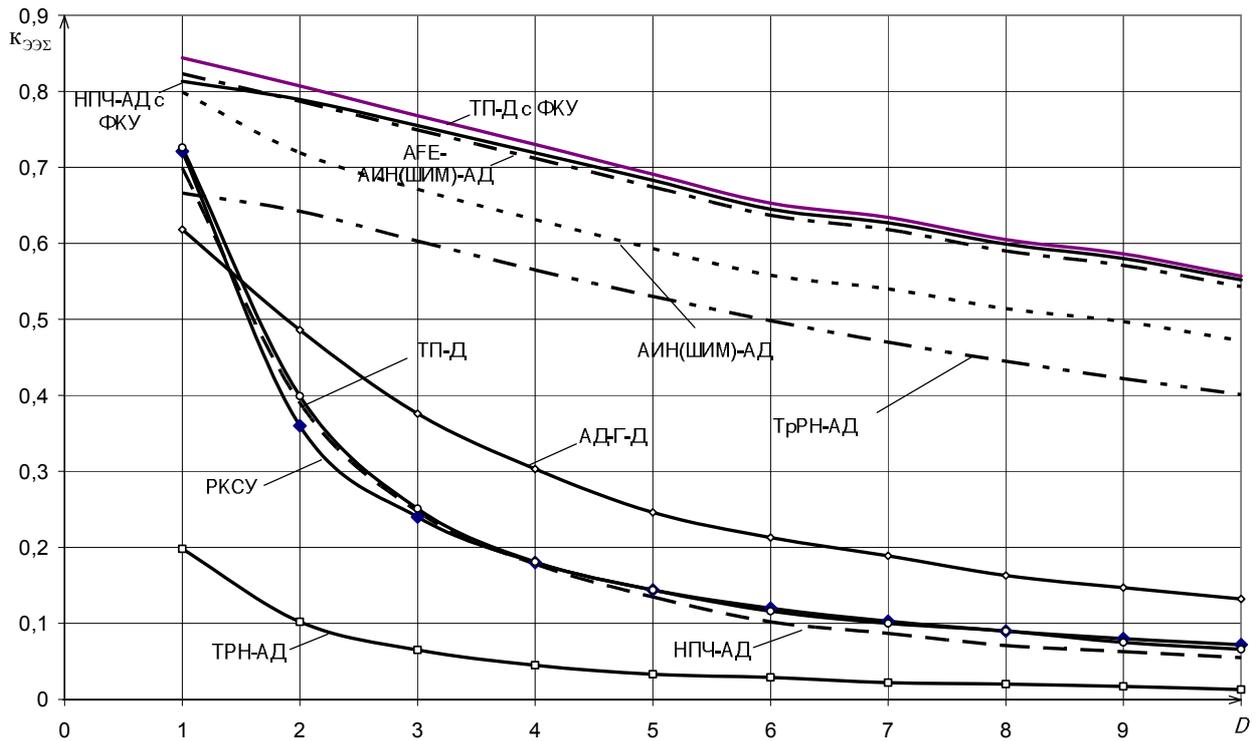


Рисунок 4 – Зависимости суммарного коэффициента энергетической эффективности $k_{ЭЭЭ}$ для систем электропривода в диапазоне регулирования скорости вращения $D=10:1$

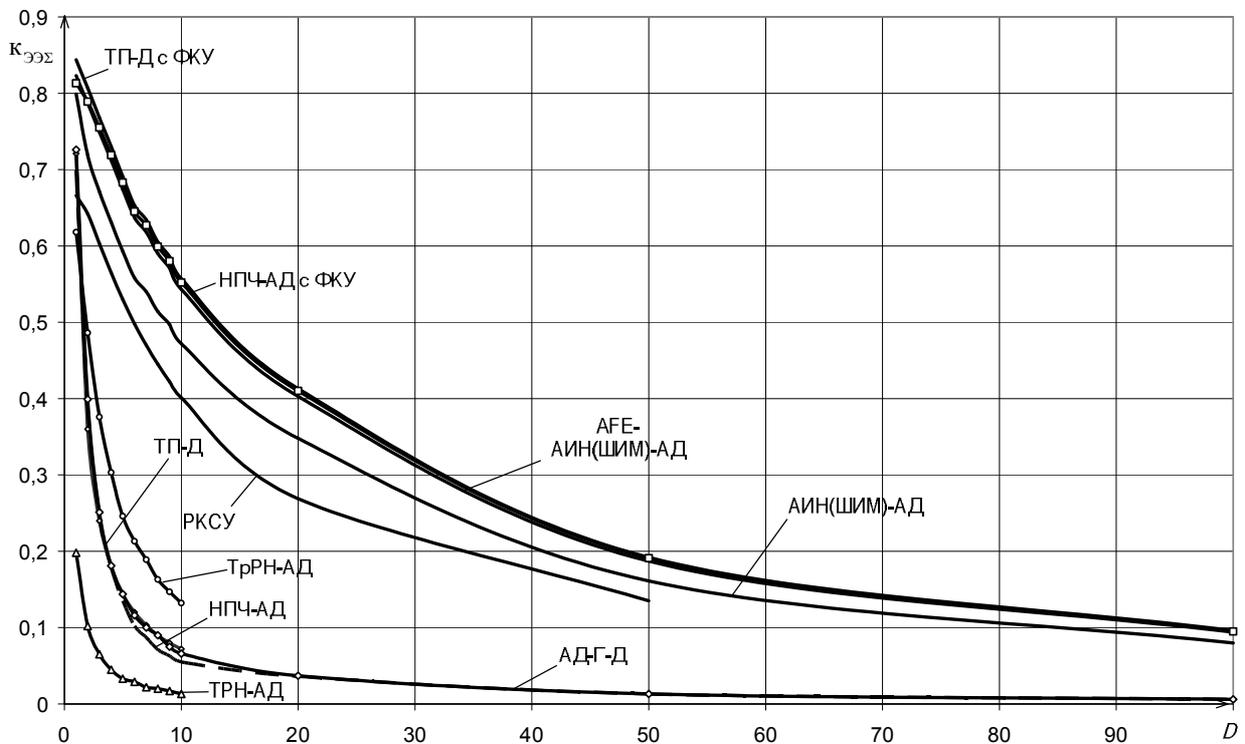


Рисунок 5 – Зависимости суммарного коэффициента энергетической эффективности $k_{ЭЭЭ}$ для систем электропривода в диапазоне регулирования скорости вращения $D=100:1$

Для оценки экономической эффективности разработанной системы было выполнено сравнение стоимостных показателей низковольтных комплектных устройств различных систем электропривода мощностью 50 кВт относительно системы НУВ–АИН (ШИМ)–АД, принятой в качестве эталона, результаты которых представлены в табл. 2 и на рис. 6.

Таблица 2 – Сравнительная стоимость низковольтных комплектных устройств различных систем электропривода мощностью 50 кВт

Тип системы	Стоимость НКУ, грн.	Стоимость ФКУ, грн.	Σ стоимость НКУ, грн.	Стоимость датчиков, грн.	Стоимость двигателя, грн.	Итого, грн.	По отношению к ТрПН–АД
СД–Г–Д	23479	–	23479	–	177041	200520	1,61
ТП–Д с ФКУ	66139	60756	126895	–	105979	233663	1,88
НПЧ–2-фазный АД с ФКУ	87846	60756	148603	22052	28930	199585	1,6
НПЧ–АД с ФКУ	59573	60756	120329	22052	28930	171312	1,38
ТрПН–АД	68467	–	68467	22052	33927	124446	1
Р–АИН (ШИМ)–АД	79588	–	79588	22052	33927	135567	1,09
АФЕ–АИН (ШИМ)–АД	139056	–	139056	22052	33927	195035	1,57
Р–АИН (Р)–АД	68046	–	68046	22052	33927	124025	1

Цены на низковольтные комплектные устройства управления электроприводом НКУ зависят от цен на комплектующие, материалы, стоимости работ и, не в последнюю очередь, от ценовой политики предприятия, производящего НКУ. Представляет значительный интерес анализ стоимостных показателей данных систем. За основу анализа принята методика оценки стоимости, предложенная в [1]. Согласно этой методике, стоимость НКУ была определена через расчетный коэффициент:

$$P_{НКУ} = K_p P_{KM}, \quad (7)$$

где K_p – расчетный коэффициент, равный, например, 2,8; P_{KM} – суммарная стоимость комплектующих и материалов.

Стоимость всех комплектующих определяется также через расчетный коэффициент от стоимости наиболее дорогих покупных изделий (тиристоров, транзисторов, автоматических выключателей, силовых конденсаторов):

$$P_K = K_{p2} P_{ПИ}, \quad (8)$$

где P_K – стоимость всех комплектующих изделий; K_{p2} – расчетный коэффициент, равный

1,15; $P_{\text{ПИ}}$ – стоимость наиболее дорогих покупных изделий.

Стоимость материалов определяется также через расчетный коэффициент от стоимости комплектующих:

$$P_m = K_{p3} P_K, \quad (9)$$

где P_m – стоимость материалов; K_{p3} – расчетный коэффициент, равный 0,1.

Стоимость электрооборудования выбиралась по прайс-листам фирм на четвертый квартал 2013 г.

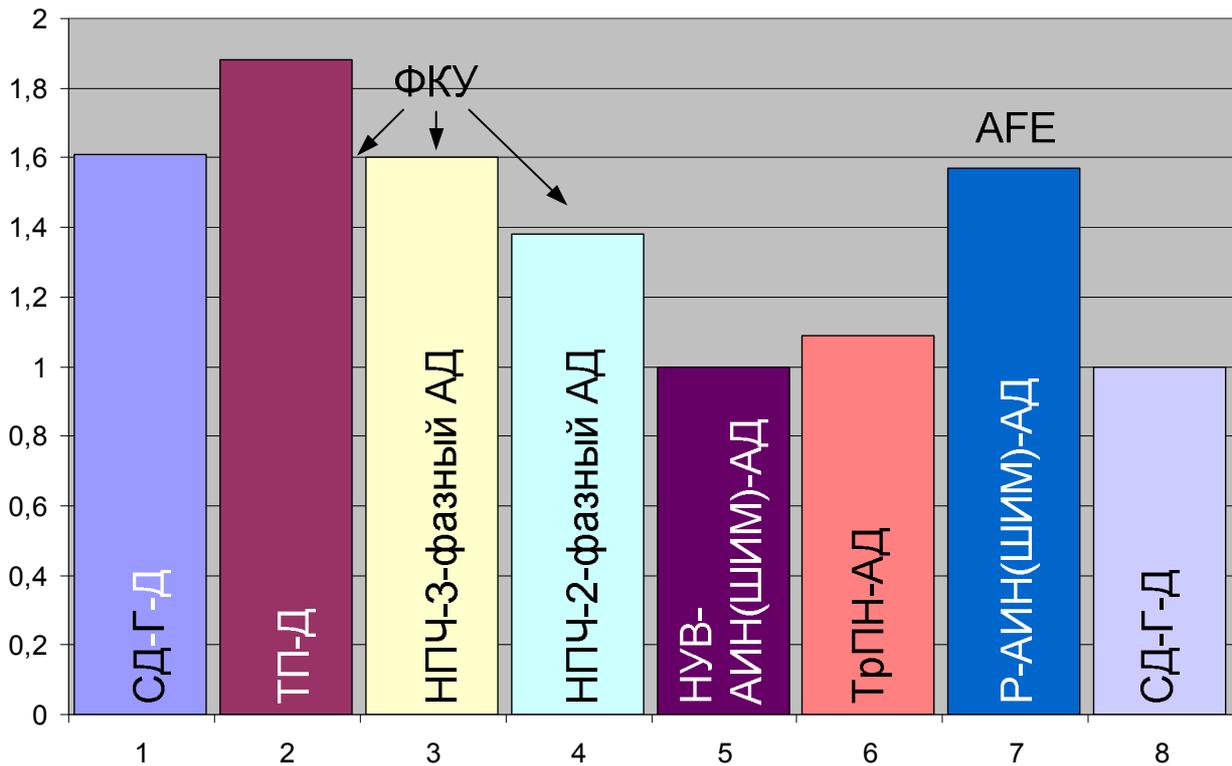


Рисунок 6 – Сравнительная стоимость различных систем электропривода мощностью 50 кВт

Рассмотрим возможности применения системы управления. Например, в условиях предприятий горно-обогатительного комплекса в настоящее время широко используются транспортеры, которые весь рабочий день остаются загруженными на номинальную нагрузку и вращаются с номинальной скоростью. По окончании рабочего дня пустой, ненагруженный транспортер оставляют в работе с номинальной скоростью на холостом ходу, чтобы предотвратить застывание смазки. Реализация такого режима эксплуатации вызывает преждевременный износ механических деталей оборудования и избыточное энергопотребление. Для этого вспомогательного режима и предлагается разработанная и исследованная система управления, которая переводит двигатель транспортера на пониженную скорость вращения, что сократит потребление электроэнергии во вспомогательных режимах до 60 % и уменьшает затраты на ремонт технологического оборудования, связанные с износом механических деталей.

Подобная ситуация наблюдается при использовании электроприводов вентиляторов. Вентиляторы, в отличие от других турбомеханизмов, работают на сеть без противодействия. По этой причине зависимость момента статического сопротивления на валу двигателя во всем диапазоне изменения частоты вращения имеет квадратичный характер. Энергетическая

эффективность регулирования частоты вращения (экономия электроэнергии) при снижении производительности по условиям техпроцесса определяется как [5]

$$\Delta W_{\text{эк}} = (1 - n^3) P_n T_{\text{раб}}, \quad (10)$$

где $\Delta W_{\text{эк}}$ – экономия электрической энергии; $T_{\text{раб}}$ – время работы в энергосберегающем режиме на пониженной частоте вращения; P_n – номинальная мощность вентилятора; n – скорость вращения вентилятора в относительных единицах.

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод о том, что разработанная система управления асинхронным электроприводом на основе транзисторных преобразователей напряжения является конкурентоспособной по своим энергетическим показателям по сравнению с другими способами получения низких скоростей вращения при относительно малых затратах на обслуживание.

ВЫВОДЫ. В работе доказана возможность применения разработанного способа управления асинхронным электроприводом на базе транзисторных преобразователей напряжения, который обеспечивает улучшение энергетических показателей электропривода по сравнению с другими системами параметрического управления. Выполнена комплексная оценка и сравнение энергетических и регулировочных показателей разработанной системы и наиболее распространенных систем электропривода промышленных механизмов. Определена область рационального использования разработанной системы и типовые механизмы, в которых она может использоваться. Наибольшую эффективность разработанного способа управления транзисторным преобразователем следует ожидать для электроприводов механизмов, отключение которых по причинам технологического характера нерационально, а более целесообразно переводить на пониженную скорость вращения (шахтные вентиляторы, транспортеры в ночное время суток и др.). Оценка технико-экономических показателей разработанной системы показывает, что экономический эффект обусловлен уменьшением расходов электроэнергии и расходами на ремонт во время эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Могучев М.Б. Улучшение динамических и энергетических показателей электроприводов экскаваторов, выполненных на базе моноблочного транзисторного преобразователя с прямым обменом энергией с сетью. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – Самара, СамГТУ, 2006.
2. Юхименко М.Ю. Режимы управления преобразователя переменного напряжения с улучшенным гармоническим составом выходного напряжения // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 4/2012 (20). – С. 115–121.
3. Бергер А.Я. Методы повышения коэффициента мощности асинхронных электродвигателей и их синхронизация. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 31 с.
4. Браславский И.Я. Возможности энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов // Труды 11-ой науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока», 24–26 февраля 1998 г. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – С. 102–107.
5. Андрущенко В.А. Автоматический электропривод систем управления. – Л., 1973. – 167 с.
6. Сарваров А.С. Энергосберегающий электропривод на основе НПЧ–АД с программным формированием напряжения. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – 206 с.

PROSPECTS OF WAY TO CONTROL ASYNCHRONOUS SQUIRREL-CAGE MOTOR

M. Yukhimenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: sauel@kdu.edu.ua

The opportunity of using the developed method for controlling power switches a transistor inverter AC voltage in the stator induction motor to improve energy performance and adjusting the drive. Performed a comprehensive evaluation and comparison of energy and adjusting parameters of the system and the most common systems of the electric machinery industry. The domain of the rational use of the system and the generic mechanisms, in which it can be used. The evaluation of the technical and economic performance of the developed system.

Key words: induction motor, transistor voltage converter, control algorithms, control performance, energy efficiency.

REFERENCES

1. Moguchev M.B. *Improving the energy performance of dynamic and electric shovels made on the basis of monoblock transistor converter with direct energy exchange with the network*. Thesis for the degree of Ph.D. – Samara: Samara State Technical University, 2006. [in Russian]
2. Yuhimenko M.Yu. Operating modes of the inverter AC voltage harmonic composition with improved output voltage // *Electromechanical and efficient system. Quarterly research and production magazine*. – Kremenchuk: KNU, 2012. – Iss. 4/2012 (20). – PP. 115–121. [in Russian]
3. Berger A.J. *Methods to improve the power factor of induction motors and their synchronization*. – Moscow–Leningrad: Gosenergoizdat, 1956. – 31 p. [in Russian]
4. Braslavsky I.J. Energy saving in the use of controlled induction motor drives // *Proceedings of the 11th Scientific-Technical. Conf. "AC Motors"*, 24–26 February 1998. – Ekaterinburg: Ural State Technical University, 1998. – PP. 102–107. с
5. Andryushchenko V.A. *Automatic electric control systems*. – Leningrad, 1973. – 167 p. [in Russian]
6. Sarvarov A.S. *Energy-saving electric drive based on FPGA–AD program-forming strain*. – Magnitogorsk: MSTU, 2001. – 206. [in Russian]



Юхименко Михаил Юрьевич,
старший преподаватель кафедры «Системы автоматического управления и электропривод» КрНУ,
ул. Первوماйская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина,
Тел. (05366) 3-11-47,
E-mail: sauel@kdu.edu.ua

Стаття надійшла 02.07.2013
Рекомендовано до друку
д.техн.н., проф. Садовой О.В.