

УДК 621.31.83.52

**Б.И. Фираго, д-р техн. наук, Д.С. Васильев****ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ПЛАВНОГО ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ**

*Рассматривается применение устройств плавного пуска и торможения (УПП) в электроприводах крановых механизмов передвижения. Проведено сравнение УПП с фазовым и импульсным регулированием напряжения асинхронного двигателя (АД). Предложена оптимальная структура силовой схемы импульсного регулятора напряжения с функцией квазичастотного управления АД.*

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель, регулятор напряжения, плавный пуск, квазичастотное управление

**В.І.Фіраго, ScD, D.S. Vasilyev****APPLICATION OF SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR SOFT STARTING AND BRAKING IN THE ELECTRIC DRIVES OF CRANE TRAVEL MECHANISMS**

*This paper deals with the matter of softstarter application in the electric drives of crane travel mechanisms. The comparison of softstarters with phase and pulse induction motor voltage regulation methods has been provided. Optimal power circuit structure of a pulse voltage regulator with quasi-frequency control of an induction motor is suggested.*

*Keywords:* induction motor, voltage regulator, soft starting, quasi-frequency control.

**Б.І.Фіраго, д-р техн. наук, Д.С.Васильев****ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЇВ ПЛАВНОГО ПУСКУ І ГАЛЬМУВАННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ КРАНОВИХ МЕХАНІЗМІВ ПЕРЕСУВАННЯ**

*Розглядається застосування пристроїв плавного пуску і гальмування (ППП) в електроприводах кранових механізмів пересування. Зроблено порівняння ППП з фазовим та імпульсним регулюванням напруги асинхронного двигуна (АД). Запропоновано оптимальну структуру силової схеми імпульсного регулятора напруги з функцією квазичастотного керування АД.*

*Ключові слова:* асинхронний двигун, регулятор напруги, плавний пуск, квазичастотне керування

**Введение.** В настоящее время в электроприводах (ЭП) крановых механизмов передвижения и подъема широко применяются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором (к.з.р.) как наиболее простые, дешевые и надежные. Однако такие электродвигатели имеют ряд недостатков. Прямое их включение в сеть сопровождается «бросками» пусковых токов и ударными электромагнитными моментами, что приводит к поломкам валов, соединительных муфт, редукторов и, в целом, к выходу из строя дорогостоящего оборудования и большим затратам на его ремонт. Высокие значения пусковых токов также вызывают сильный нагрев обмоток двигателей, что приводит к ускоренному старению изоляции, появлению ограничений на число пусков двигателя и, в конечном итоге, к снижению срока службы АД. Кроме того, высокие пусковые токи приводят к «просадкам» напряжения питающей сети дорогостоящего оборудования и большим затратам на его

ремонт. Высокие значения пусковых токов также вызывают сильный нагрев обмоток двигателей, что приводит к ускоренному старению изоляции, появлению ограничений на число пусков двигателя, и, в конечном итоге, к снижению срока службы АД. Кроме того, высокие пусковые токи приводят к «просадкам» напряжения питающей сети, что может стать причиной сбоев в цепях управления.

Необходимо также учитывать электромагнитные процессы, возникающие при торможении АД с незатухшим магнитным полем, при котором наблюдаются максимальные пики моментов в несколько раз большие, чем при затухшем поле. Такие моменты вызывают сильные удары в механической передаче и поломки валов.

Кроме того, принимая во внимание конструктивные особенности современных АД с к.з.р., которые выполняются, например, с глубоким пазом или двойной беличьей клеткой для улучшения их пусковых свойств, а также повышенные требования к

© Фираго Б.И., Васильев Д.С., 2011

оценке динамических свойств и энергетических показателей асинхронных нерегулируемых ЭП, целесообразно при оценке режимов прямого пуска и торможения АД с незатухшим магнитным полем учитывать изменение параметров двигателя в переходных процессах. Как следует из анализа работ [1, 3, 5], активные и индуктивные сопротивления рассеяния АД с к.з.р. могут изменяться в 3–5 раз по сравнению с номинальными при изменении скольжения  $s$  от номинального до 1.

Полную оценку электромеханических процессов при прямом пуске и торможении противовключением АД с к.з.р с учетом переменных параметров можно сделать на основе анализа результатов имитационного моделирования исследуемых режимов работы АД в Matlab.

Из приведенных в [2] результатов имитационного моделирования видно, что временные диаграммы электромагнитного момента, тока и скорости исследованных АД с к.з.р. при учете переменных параметров отличаются от аналогичных диаграмм при постоянных параметрах, как в двигательном, так и в тормозном режиме. Причем для АД большей мощности это отличие более существенно, чем для АД меньшей мощности. В случае с переменными параметрами наблюдаются еще большие пики пусковых токов и ударных моментов, чем при постоянных. Максимальный момент  $M_{max}$  при прямом пуске рассмотренных АД достиг кратности 5–6 от номинального момента, а при торможении противовключением – 12–14 от  $M_{ном}$ , что примерно в 2–3 раза больше  $M_{max}$  при прямом пуске. Такие моменты вызывают сильнейшие удары в механической передаче и приводят к поломке валов.

В ЭП некоторых крановых механизмов, например механизма передвижения тележки крана, где по технологическим причинам не требуется регулирования скорости или длительная работа на промежуточных скоростях, требования по обеспечению экономичности работы ЭП, плавности пуско-тормозных процессов, ограничению ударных моментов и пусковых токов, получению пониженной скорости для точной остановки механизма могут быть обеспечены с помощью УПП.

Конечно, эти задачи можно решить с помощью применения преобразователей частоты (ПЧ), но следует иметь в виду, что их стоимость в 3–5 раз больше стоимости АД. В свою очередь, стоимость серийно выпускаемых в настоящее время тиристорных УПП примерно в два раза ниже стоимости ПЧ аналогичной мощности. Поэтому по технико-экономическим показателям для указанных выше условий система ПЧ – АД является избыточной и не будет конкурентоспособной.

Цель данной статьи – исследование возможности использования УПП в ЭП крановых механизмов передвижения в качестве альтернативы ПЧ.

**Анализ электромеханических процессов при плавном пуске и торможении АД с изменением первой гармоники питающего напряжения.** Современные УПП позволяют изменять по определенному закону действующее значение питающего напряжения АД при постоянной его частоте, уменьшая тем самым ударные нагрузки в переходных процессах АД и повышая надежность и срок службы технологического механизма. Однако следует учитывать, что именно первая гармоника напряжения АД определяет величину электромагнитного момента двигателя, поэтому имеет смысл изменять ее, а не действующее значение напряжения в переходных процессах АД. На рис.1 представлены временные диаграммы электромагнитного момента, тока статора, угловой скорости кранового АД типа 4МТКФ160LB8 (11кВт) при его плавном пуске и торможении с изменением первой гармоники питающего напряжения в переходных процессах АД по линейному и экспоненциальному закону.

Временные диаграммы на рис. 1 получены в результате имитационного моделирования режимов плавного пуска и торможения исследуемого кранового АД на основе его эквивалентной двухфазной модели в осях  $\alpha - \beta$  [4] в программе Matlab.

В процессе исследований было также рассмотрено влияние времени изменения 1й гармоники напряжения АД  $t_0$  на уменьшение пиков электромагнитных моментов и пусковых токов, а также на длительность разгона и торможения АД. Поэтому временные диаграммы параметров АД на рис.1 приведены для пяти значений  $t_0 = (0,1-0,5)$  с как для линейного, так и экспоненциального закона изменения первой гармоники питающего напряжения.

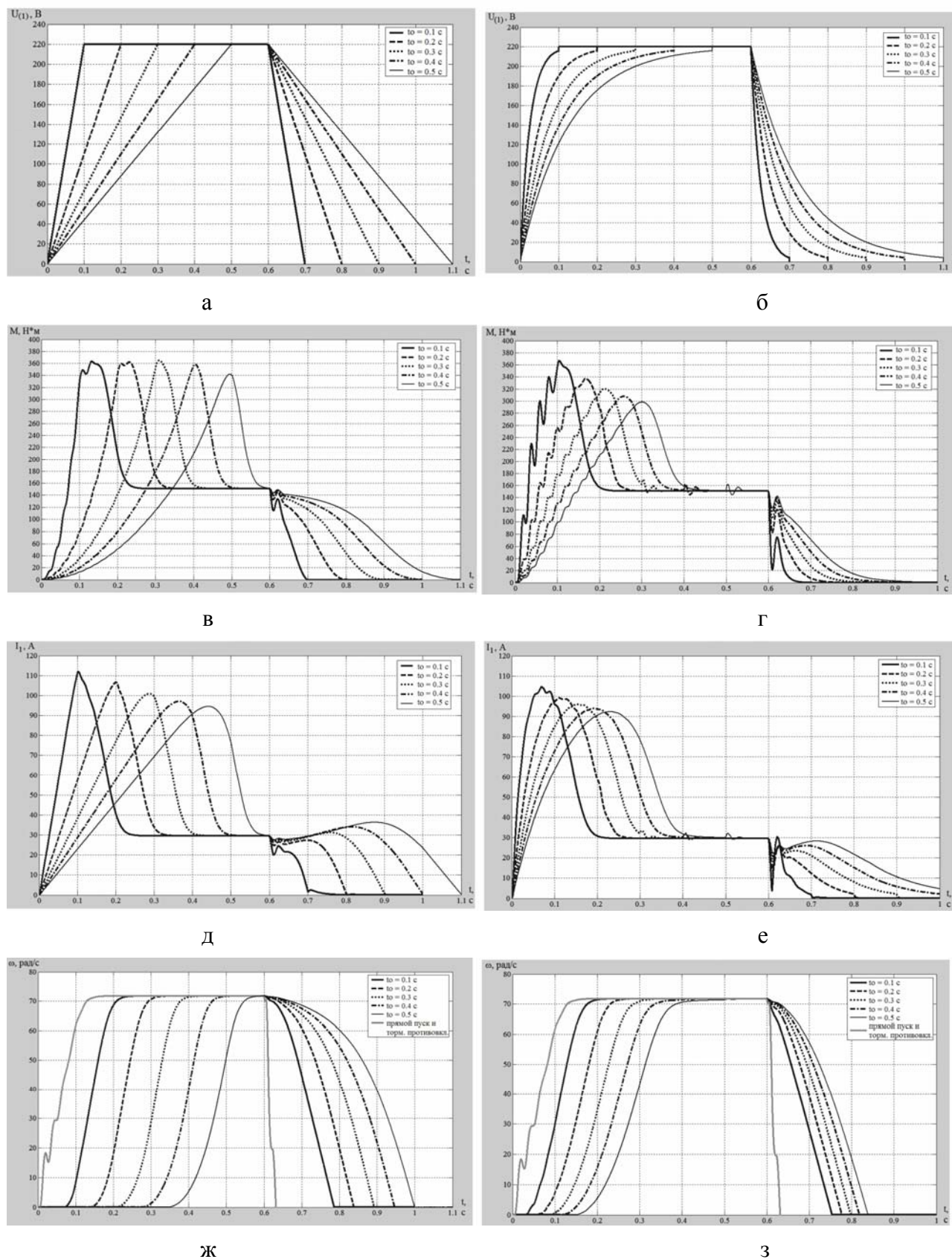


Рис. 1. Линейный (а) и экспоненциальный (б) соответственно законы изменения первой гармонике питающего напряжения  $t_0 = (0,1-0,5)$  с в процессе плавного пуска и торможения и временные диаграммы электромагнитного момента (в, г), тока статора (д, е) и угловой скорости (ж, з) кранового АД с к.з.р. типа 4МТКФ160LB8 (11 кВт, 750 об/мин)

Из сравнения полученных результатов моделирования прямого пуска и торможения АД противовключением в [2] с временными диаграммами на рис. 1 можно сделать вывод, что плавное изменение первой гармоники питающего напряжения в переходных процессах АД позволяет снизить при пуске пики электромагнитного момента в 2–3 раза по сравнению с прямым пуском и практически полностью устранить при плавном торможении огромные пики ударных моментов, наблюдаемые в режиме торможения противовключением.

Также из анализа и сравнения результатов моделирования для двух законов изменения первой гармоники питающего напряжения на рис.1 следует, что при одинаковой величине  $t_0$  для экспоненциального закона характерно большее ограничение максимальных значений электромагнитного момента и пускового тока АД и в то же время более быстрый разгон двигателя с минимальной задержкой на участке нулевой скорости, чем для линейного закона.

Оптимальное время разгона и торможения АД, а также ограничение пиков электромагнитного момента и пускового тока в переходных процессах двигателя наблюдается при задании длительности изменения первой гармоники питающего напряжения по экспоненциальному закону в пределах  $t_0 \approx (2 \div 3)t_{п}$ , где  $t_{п}$  – время разгона АД при прямом пуске.

Если после плавного снижения питающего напряжения до нуля АД продолжает вращаться, то для дальнейшего торможения от переводится в режим противовключения и напряжение плавно повышается от 0 до некоторого значения, достаточного для остановки ЭП, т.е. окончательное торможение АД происходит во втором квадранте. Более подробно этот случай рассмотрен в [4].

Регулирование напряжения в УПП может быть осуществлено с помощью фазового или импульсного метода в зависимости от типа полупроводниковых элементов, использованных в силовой схеме устройства. Большинство современных УПП обеспечивают фазовое регулирование напряжения АД. Однако в последнее время ведется активная работа по исследованию возможностей софт-

стартеров на основе импульсных регуляторов напряжения (ИРН) [7, 8]. Далее рассмотрим и сравним эти два способа регулирования напряжения в УПП.

**Фазовое регулирование напряжения короткозамкнутого АД.** Силовая схема серийно выпускаемого стандартного тиристорного УПП (рис. 2, а) состоит из трех пар встречно-параллельно включенных тиристоров и позволяет регулировать питающее напряжение АД при его постоянной частоте за счет изменения угла открытия тиристоров  $\alpha$  (рис. 2, б).

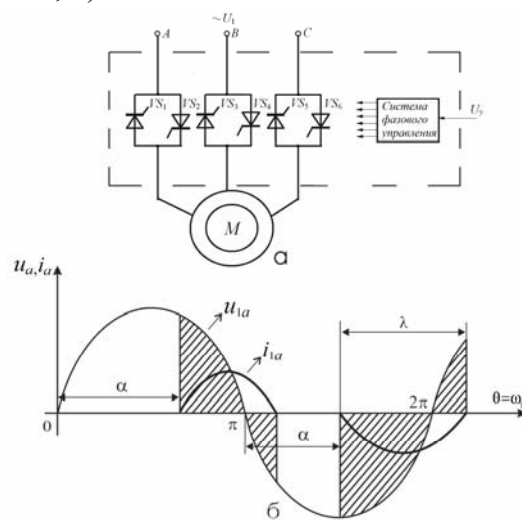


Рис. 2. Типовая силовая схема трехфазного тиристорного УПП (а), кривая напряжения и тока при фазовом управлении (б)

УПП с фазовым управлением характеризуется простой силовой схемой (всего шесть тиристоров), отсутствием входных дросселей и емкостей, высокой надежностью работы, малыми потерями мощности в регуляторе напряжения (в ПЧ двукратное преобразование энергии, а в УПП – однократное), простотой наладки. К тому же при использовании специального алгоритма управления для данной структуры силовой схемы тиристорного УПП возможна реализация квазичастотного управления для получения пониженных скоростей перед точной остановкой кранового ЭП. Однако стоит отметить, что в настоящее время тиристорные УПП с возможностью квазичастотного управления серийно не выпускаются, но в этой области ведутся активные исследования и разработки.

В то же время тиристорные УПП с фазовым управлением обладают рядом недостат-



ков: увеличенными потерями энергии при пуске АД [4]; наличием дополнительного угла сдвига первой гармоники тока по отношению к напряжению, который зависит от угла открытия тиристоров  $\alpha$ ; искажением синусоидальной формы кривой питающего напряжения (появление высших гармоник напряжения: 5, 7, 11, 13 и т.д.), что приводит к возникновению помех в управляющих цепях, акустического шума, вибраций и дополнительного нагрева электрооборудования.

С целью устранения основных недостатков тиристорных УПП с фазовым управлением предлагается использовать софтстартеры с импульсным управлением (ИРН) на полностью управляемых силовых полупроводниковых элементах, например IGBT транзисторах.

**Регулирование напряжения АД с к.з.р. импульсным методом.** Импульсное регулирование напряжения АД с к.з.р. осуществляется изменением ширины импульсов напряжения по определенному закону при определенной частоте коммутации ключей силовой схемы ИРН [7, 8, 9].

В общем случае ИРН состоит из основных силовых ключей на основе транзисторов, обеспечивающих передачу энергии в обоих направлениях (от сети к нагрузке и от нагрузки в сеть), и ключей, шунтирующих нагрузку, когда основные ключи находятся в выключенном состоянии. Благодаря такому алгоритму работы силовых ключей обеспечивается непрерывное протекание тока по силовой цепи ИРН.

В зависимости от количества основных и шунтирующих силовых ключей возможны различные варианты структур силовой части ИРН [7, 8]. В качестве оптимального решения для силовой части ИРН предлагается использовать схему с тремя основными силовыми ключами на основе транзисторов, включенных в диагонали диодных мостов в фазах двигателя, и шунтирующим трехфазным диодным мостом с однонаправленным транзистором (рис. 3).

Кривые выходного напряжения и тока фазы А такого ИРН при частоте коммутации ключей 1кГц, полученные в результате моделирования работы устройства в Matlab, приведены на рис. 4.

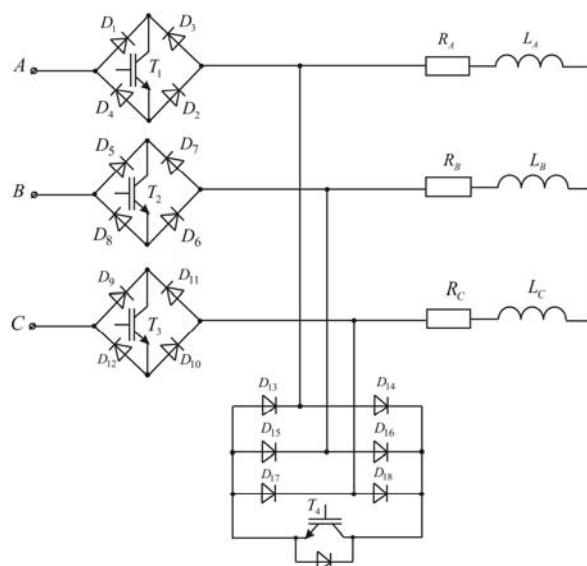


Рис.3. Схема ИРН на трех силовых ключах

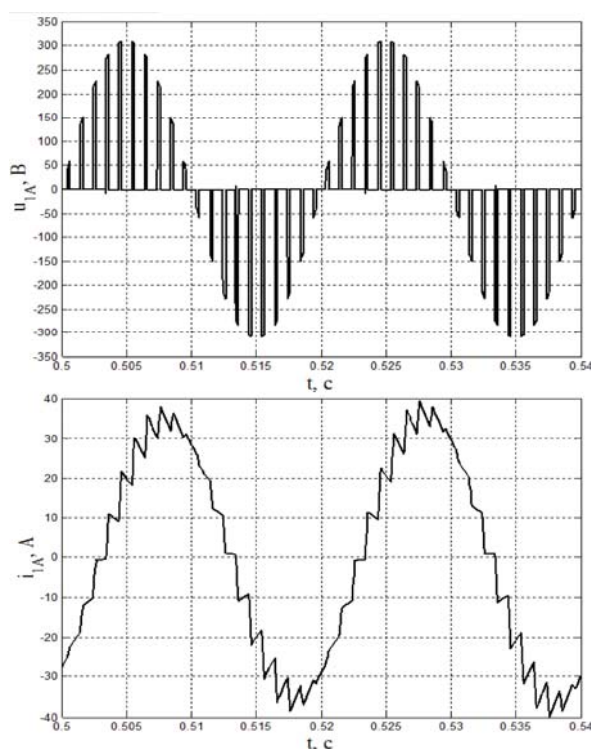


Рис.4. Выходное напряжение и ток ИРН на трех силовых ключах при  $f_k = 1\text{кГц}$  (фаза А)

Работа транзисторов  $T_1-T_3$  обеспечивает обмен энергией между нагрузкой и питающей сетью. Когда один из  $T_1-T_3$  находится в выключенном состоянии, в работу вступает транзистор  $T_4$ , который с помощью трехфазного диодного моста шунтирует соответствующие обмотки статора АД.

С помощью моделей УПП на основе ИРН (рис. 3) и тиристорного регулятора напряже-

ния (ТРН) с фазовым управлением (рис. 2, а), собранных из блоков силовых полупроводниковых элементов раздела SimPowerSystems программы Matlab, были рассчитаны суммарные потери энергии  $\Delta A_{\Sigma}^*$  в переходных процессах АД в о.е. при линейном и экспоненциальном законе изменения 1-й гармоники напряжения  $U_{(1)}$ , коэффициенты искажения синусоидальности выходных кривых напряжения  $K_U$  и тока  $K_I$ , коэффициенты мощности входной цепи  $K_M$  на интервале изменения 1-й гармоники напряжения  $U_{(1)\min} \div U_{(1)\text{ном}}$ , где  $U_{(1)\min}$  взято равным  $0,2U_{(1)\text{ном}}$  и  $0,5U_{(1)\text{ном}}$  (табл. 1). Закон изменения 1-й гармоники выходного напряжения  $U_{(1)}$  в модели с ТРН задавался кривой  $\alpha(t)$  с определенными значениями углов управления  $\alpha$ . В случае с ИРН требуемый закон изменения  $U_{(1)}$  получен заданием аналогичного закона изменения скважности  $\gamma(t)$ , так как было установлено, что 1-я гармоника выходного напряжения ИРН является линейной функцией скважности [7].

Из табл.1 видно, что УПП на основе ИРН

имеет значительно лучший гармонический состав выходных кривых напряжения и тока, а также более высокий коэффициент мощности входной цепи. Поэтому применение УПП на основе ТРН с достаточно низким коэффициентом мощности входной цепи приведет к более высоким эксплуатационным расходам, чем использование импульсного УПП вследствие необходимости наличия в цепи источника большей габаритной мощности.

Рассмотренная силовая схема ИРН имеет симметричную структуру, состоит из меньшего числа полностью управляемых силовых элементов и имеет более простую систему управления по сравнению со схемами ИРН, представленными в [9], следовательно, является более выигрышной по стоимости, позволяет изменять в переходных процессах АД величину  $U_{(1)}$  по требуемому закону, а также реализовать квазичастотное управление АД на пониженной скорости, что особенно важно при использовании такого ИРН в ЭП кранового механизма передвижения.

1. Энергетические и технико-экономические показатели фазового и импульсного УПП при работе на 11 кВт крановый АД типа 4МТКФ160ЛВ8 ( $M_c = M_{\text{ном}}$ ; коэффициент инерции привода  $k_J=6,3$ ;  $t_0=2,5$  с)

Тип УПП	Параметр	$\Delta A_{\Sigma}^*$ , о.е.	Значения параметров для диапазона первой гармоники напряжения $U_{(1)\min} \div U_{(1)\text{ном}}$			Количество силовых элементов в схеме
			$K_U$ , %	$K_I$ , %	$K_M$	
УПП на основе тиристорного регулятора напряжения с фазовым управлением (рис. 2,а)	<u>лин.</u> з-н 1,027	$U_{(1)\min} \approx 0,2U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 96,44 ÷ 0 фаза В: 96,45 ÷ 0 фаза С: 96,44 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,2U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 32,84 ÷ 0 фаза В: 32,84 ÷ 0 фаза С: 32,84 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,2U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 18,13 ÷ 0 фаза В: 18,14 ÷ 0 фаза С: 18,14 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,2U_{(1)\text{ном}}$ 0,18 ÷ 0,74	6 тиристоров (3 пары встречно-параллельно включенных тиристоров)
	<u>эксп.</u> з-н 1,026	$U_{(1)\min} \approx 0,5U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 79,24 ÷ 0 фаза В: 79,24 ÷ 0 фаза С: 79,23 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,5U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 18,13 ÷ 0 фаза В: 18,14 ÷ 0 фаза С: 18,14 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,5U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 18,13 ÷ 0 фаза В: 18,14 ÷ 0 фаза С: 18,14 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,5U_{(1)\text{ном}}$ 0,39 ÷ 0,74	
УПП на основе ИРН со схемой на трех ключах с шунтирующим диодным мостом и однонаправл. транзистором (рис. 3)	<u>лин.</u> з-н 1	$U_{(1)\min} \approx 0,2U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 89,46 ÷ 0 фаза В: 89,44 ÷ 0 фаза С: 89,45 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,2U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 9,33 ÷ 0 фаза В: 9,33 ÷ 0 фаза С: 9,33 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,2U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 9,33 ÷ 0 фаза В: 9,33 ÷ 0 фаза С: 9,33 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,2U_{(1)\text{ном}}$ 0,367 ÷ 0,74	4 IGBT (три основных, один шунтир.), три однофаз., один трехфаз. диодный мост
	<u>эксп.</u> з-н 1	$U_{(1)\min} \approx 0,5U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 69,67 ÷ 0 фаза В: 69,65 ÷ 0 фаза С: 69,66 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,5U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 5,675 ÷ 0 фаза В: 5,675 ÷ 0 фаза С: 5,673 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,5U_{(1)\text{ном}}$ фаза А: 5,675 ÷ 0 фаза В: 5,675 ÷ 0 фаза С: 5,673 ÷ 0	$U_{(1)\min} \approx 0,5U_{(1)\text{ном}}$ 0,457 ÷ 0,74	

**Квазичастотное управление АД с к.з.р. на пониженной скорости с помощью ИРН**  
 Использование УПП на основе ИРН в ЭП механизма передвижения тележки крана для обеспечения ее плавной и точной остановки без использования дорогостоящих ПЧ для этих целей необходимо, чтобы оно имело функцию квазичастотного управления АД на пониженной скорости.

На базе предложенной выше схемы ИРН квазичастотное управление АД можно реализовать с помощью специального алгоритма управления тремя основными и одним шунтирующим силовым ключом [9]. Результат моделирования работы кранового АД типа 4МТКФ160LB8 (11 кВт,  $M_c = M_{ном}$ ,  $k_J=6,3$ ) на пониженной скорости при квазичастотном управлении с частотой 8,33 Гц и периоде  $T_{квази} = 0,12$  с представлен на рис. 5.

**Оценка плавности пуска кранового механизма передвижения при использовании ИРН.** Процесс плавного пуска кранового механизма передвижения можно оценить величиной максимального линейного ускорения  $a_{max}$  при разгоне механизма, которое, в свою очередь, влияет на максимальный угол отклонения груза на крюке от вертикальной оси  $\delta$  при движении.

Согласно компании Danfoss Bauer GmbH [6] для максимально допустимого угла отклонения груза от вертикальной оси  $\delta=3^\circ$  линейное ускорение крана/тележки не должно превышать  $0,5 \text{ м/с}^2$ .

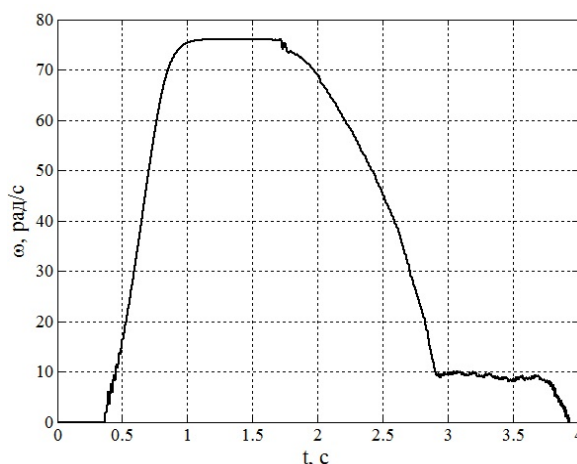


Рис.5. Угловая скорость АД типа 4МТКФ160LB8 с переходом на пониженную скорость при частоте 8,33 Гц во время квазичастотного управления

С помощью моделирования были получены значения максимального ускорения  $a_{max}$  и угла отклонения груза  $\delta$  при разгоне тележки мостового крана номинальной грузоподъемностью 20т, приводимой в движение крановым АД типа 4МТКФ132L6 (5,5 кВт) при питании от ИРН. Расчетные значения приведены в табл.2 для линейного и экспоненциального закона изменения первой гармоники напряжения.

Из табл. 2 видно, что при питании кранового АД от ИРН разгон тележки происходит с допустимыми линейным ускорением и углом отклонения груза. Причем их значения для экспоненциального закона изменения первой гармоники питающего напряжения АД ниже, чем для линейного.

2. Максимальное ускорение и угол отклонения груза при разгоне тележки мостового крана грузоподъемностью 20т до номинальной скорости 0,6 м/с при питании АД типа 4МТКФ132L6 (5,5 кВт,  $M_c = M_{ном}$ ,  $k_J=11$ ) от ИРН

Прямой пуск за время $t_n=2$ с		Плавное изменение $U_{(1)}$ по определенному закону за время $t_0$					
		$t_0 = 2t_n=4$ с		$t_0 = 3t_n=6$ с		$t_0 = 4t_n=8$ с	
$a_{max}, \text{ м/с}^2$	$\delta, ^\circ$	$a_{max}, \text{ м/с}^2$	$\delta, ^\circ$	$a_{max}, \text{ м/с}^2$	$\delta, ^\circ$	$a_{max}, \text{ м/с}^2$	$\delta, ^\circ$
1,6	9,5	Линейный закон					
		0,52	3,1	0,44	2,6	0,375	2,2
		Экспоненциальный закон					
		0,4	2,33	0,35	2,07	0,32	1,88

**Выводы.** Для механизмов передвижения кранов, где не требуется технологического регулирования скорости, мягкий пуск и торможение АД, а также получение устойчивых пониженных скоростей с целью точной остановки кранового ЭП вместо более дорогого и технологически сложного ПЧ целесообразно осуществлять с помощью УПП на основе ИРН, который по сравнению с УПП с фазовым управлением позволяет: уменьшить потери энергии в переходных процессах ЭП, улучшить гармонический состав кривых напряжения и тока АД, исключить дополнительный сдвиг первой гармоники тока относительно напряжения, а также повысить коэффициент мощности устройства.

Использование УПП на базе ИРН, выполненного по схеме на трех силовых ключах с шунтирующим диодным мостом и однонаправленным транзистором, с функцией квази-частотного управления для плавного пуска и торможения кранового механизма передвижения позволяет обеспечить линейное ускорение и угол отклонения груза при движении механизма в допустимых пределах.

#### Список использованной литературы

1. Беспалов В.Я. Расчет переходных процессов в глубокопазных асинхронных двигателях / В.Я. Беспалов, Ю.А. Мощинский, О.Н. Анфиногенов. – М.: МЭИ, 1990. – 70 с.
2. Васильев Д.С. Исследование электро-механических процессов при прямом пуске и торможении асинхронных двигателей с учетом переменных параметров и сравнение их с плавным пуском и торможением / Д.С. Васильев // Вестник Кременчугского государственного ун-та им.Михаила Остроградского. – Кременчуг: КДУ. – 2010. – № 4. - С. 43– 49.
3. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978.
4. Фираго Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
5. Dalva M. Use of PWM-inverter to determine parameters for saturated induction machines with current displacement rotor / M. Dalva, O.V. Thorsen // EPE Journal. – 2001. – Vol. 8. – № 3-4. – P. 37–45.

6. Greiner H. Starting and dynamic braking with cage motors / H. Greiner. - Publication EP3000 E of Danfoss Bauer GmbH, 2010.

7. Strzelecki Ryszard. Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy / Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz. – Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000. – 452 s.

8. Tunia Henryk. Energoelektronika / Henryk Tunia, Boleslaw Winiarski. – Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1994. – 366 p.

9. Vasilyev Dmitry. Some aspects of pulse voltage regulation for induction motor soft starting and braking in electric drives of crane travel mechanisms / Dmitry Vasilyev // Proceedings of XI International PhD Workshop OWD'09. - Gliwice-Wisla, Poland. – 2009. – P. 403–408.

Получено 05.10.2011

#### References

1. Bepalov V.Y., Mowinskij Y.A., O.N. Anfinogenov. Raschet perehodnyh processov v glubokopaznyh asinhronnyh dvigateljah. – Moscow: MEI, 1990. – 70 p. [in Russian].
2. Vasilyev D.S. Issledovanie jelektromehaničeskikh processov pri prjamom puske i tormozhenii asinhronnyh dvigatelej s uchetom peremennyh parametrov i sravnenie ih s plavnym puskom i tormozheniem // Vestnik Kremenčug'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni Mihaila Ostrogradskogo. – Kremenčug: KDU, 2010. – № 4. – P. 43– 9 [in Russian].
3. Voldek A.I. Elektricheskie mashiny. – L.: Energia, 1978 [in Russian].
4. Firago B.I., Pavljachik L.B. Reguliruemye jelektroprivody peremennogo toka. – Minsk: Tehnoperspektiva, 2006. – 363 p. [in Russian].
5. Dalva M., Thorsen O.V. Use of PWM-inverter to determine parameters for saturated induction machines with current displacement rotor // EPE Journal. – 2001. – Vol.8. – № 3–4. – P. 37–45 [in English].
6. Greiner H. Starting and dynamic braking with cage motors. – Publication EP3000 E of Danfoss Bauer GmbH, 2010 [in English]
7. Strzelecki Ryszard, Henryk Supronowicz. Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy –



Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000. – 452 p. [in Poland]

8. Tunia Henryk. Energoelektronika / Henryk Tunia, Boleslaw Winiarski. - Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1994. – 366 p. [in Poland].

9. Vasilyev Dmitry. Some aspects of pulse voltage regulation for induction motor soft starting and breaking in electric drives of crane travel mechanisms / Proceedings of XI International PhD Workshop OWD'09. –Gliwice-Wisla, – 2009. – P. 403–408 [in English].



Фираго  
Бронислав Иосифович,  
д-р техн. наук, проф.  
каф. «ЭАПУ и ТК»  
Белорусского нац. технич.  
ун-та.  
г. Минск,  
тел. (+37517) 293-95-61  
E-mail: dmy@tut.by



Васильев  
Дмитрий Сергеевич,  
ассистен каф. «ЭАПУ и ТК»  
Белорусского нац.  
технического ун-та.  
г. Минск,  
тел. (+37517) 293-95-61