

УДК 621.83.52

**ПРИМЕНЕНИЕ МЯГКОГО ПУСКА, ТОРМОЖЕНИЯ И РАБОТЫ  
НА ПОНИЖЕННОЙ СКОРОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ  
ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ КРАНОВ**

Докт. техн. наук, проф. ФИРАГО Б. И., асп. ВАСИЛЬЕВ Д. С.

*Белорусский национальный технический университет*

В электроприводах (ЭП) механизмов передвижения кранов и тележек до настоящего времени применяются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором как наиболее простые, дешевые и надежные [1]. Недостатками их является наличие больших пусковых токов и ударных электромагнитных моментов, отрицательно влияющих на долговечность и надежность работы механических передач. В ЭП, где по технологическим причинам не требуется длительная работа на промежуточных скоростях, требования по обеспечению экономичности работы ЭП, плавности пускотормозных процессов, ограничению ударных моментов и пусковых токов, получению пониженных устойчивых скоростей для точной остановки могут быть удовлетворены с помощью устройств плавного пуска (УПП) и торможения [2]. На выходе УПП с помощью системы управления изменяется величина первой гармоники питающего АД напряжения при его постоянной частоте. При определенном алгоритме управления на выходе УПП можно получить также напряжение пониженной частоты, которое

используется для формирования устойчивой пониженной скорости АД перед точной остановкой ЭП. Конечно, эти задачи можно решить с помощью применения преобразователя частоты (ПЧ), но следует иметь в виду, что стоимость ПЧ в три-пять 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. В связи с этим в данной статье рассматриваются различные устройства УПП для АД.

Сегодня на белорусском рынке электрооборудования имеется широкий выбор УПП на тиристорах в основном зарубежных производителей: Siemens, Danfoss, ABB, Control Techniques, Allan Bradley, General Electric и т. д.

Из возможного разнообразия решений в настоящее время применяются два способа регулирования напряжения в УПП: фазовый (на тиристорах) и импульсный (на транзисторах). Сравним эти способы регулирования напряжения в УПП.

**Фазовое регулирование напряжения АД.** Силовая схема серийно выпускаемого стандартного тиристорного УПП (рис. 1а) состоит из трех пар встречно-параллельно включенных тиристоров и позволяет регулировать величину выходного напряжения за счет изменения угла открытия тиристоров (рис. 1б). В пускотормозных режимах АД величина питающего статор напряжения изменяется в соответствии с определенным законом, например линейным или экспоненциальным [2]. При использовании специального алгоритма управления возможна реализация квазичастотного управления для получения устойчивых пониженных скоростей перед точной остановкой ЭП.

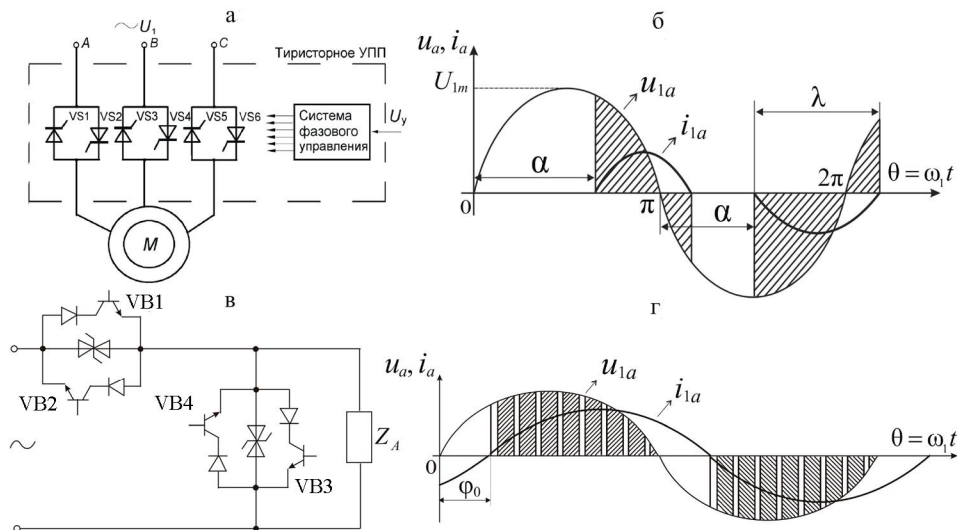


Рис. 1. а – силовая схема трехфазного тиристорного УПП; б – выходное напряжение и ток при фазовом управлении; в – силовая схема однофазного ИРН; г – выходное напряжение и ток при импульсном управлении

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 имеем двукратное преобразование энергии, а в УПП – однократное), простотой наладки. В то же время тиристорные УПП с фазовым управлением обладают недостатками: увеличенными потерями энергии при пуске АД [2]; 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-й и т. д.); созданием помех в коммуникационных и управляющих цепях, акустического шума, вибраций и дополнительного нагрева электрооборудования.

С целью устранения основных недостатков тиристорных УПП с фазовым управлением предлагается использовать импульсные регуляторы напряжения (ИРН) на полностью управляемых силовых элементах [3, 4].

**Импульсное регулирование напряжения (ИРН) АД.** Импульсное регулирование напряжения АД (рис. 1г) осуществляется изменением по определенному закону ширины импульсов напряжения при определенной частоте коммутации полностью управляемых силовых ключей, например IGBT транзисторов [3, 4]. Лучшего гармонического состава кривой выходного напряжения ИРН можно добиться увеличением числа импульсов напряжения в полуволне [3]. В [3] также показано, что применение импульсного регулирования напряжения приводит к уменьшению величины потерь энергии в переходных процессах АД по сравнению с фазовым регулированием напряжения.

На рис. 1в представлена силовая схема однофазного ИРН. Более подробное описание силовой схемы устройства и принципа его действия приведено в [4].

В зависимости от количества основных силовых ключей для формирования выходного напряжения ИРН (например, транзисторы VB1, VB2 на рис. 1в) и ключей для шунтирования обмоток статора АД (транзисторы VB3, VB4 на рис. 1в), возможны различные варианты структуры силовой части устройства [5]. Рассмотренные авторами варианты силовых схем ИРН представлены на рис. 2а, б, в.

Первая силовая схема (рис. 2а) построена на шести ключах: трех основных в каждой фазе и трех шунтирующих для каждой обмотки статора АД (всего 12 IGBT транзисторов). Принцип работы данной силовой схемы следующий: когда основные транзисторы VB1–VB6 включены, происходит обмен энергией между нагрузкой и питающей сетью; если ключи VB1–VB6 находятся в выключенном состоянии, транзисторы VB7–VB12 шунтируют фазы нагрузки таким образом, чтобы обеспечить непрерывное протекание тока в силовой цепи. Такая силовая структура позволяет получить полностью симметричные друг относительно друга выходные фазные напряжения и токи (табл. 1), а также характеризуется простым алгоритмом управления работой транзисторов, однако из всех рассмотренных вариантов является самой дорогостоящей из-за наибольшего количества силовых ключей в схеме.

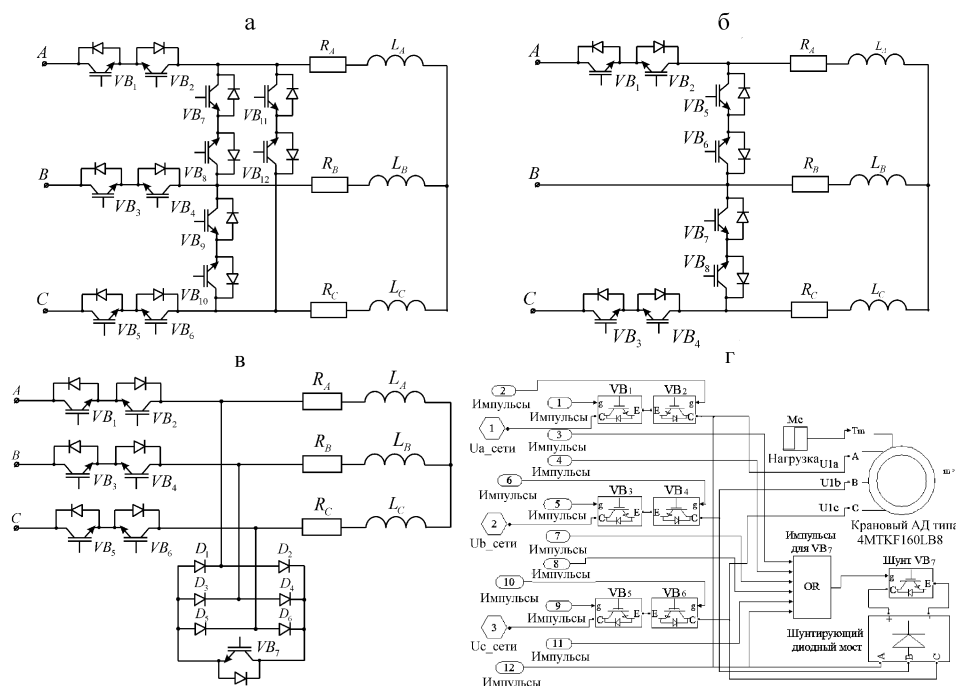


Рис. 2. Силовая схема трехфазного ИРН на: а – шести силовых ключах; б – четырех силовых ключах; в – трех силовых ключах с шунтирующим диодным мостом и однонаправленным транзистором; г – имитационная модель силовой части ИРН на трех силовых ключах в среде MatLab

Второй вариант структуры силовой схемы ИРН (рис. 2б) предусматривает использование двух основных и двух шунтирующих силовых ключей, обеспечивающих междуфазное шунтирование обмоток статора АД. Таким образом, в структуру данной силовой схемы ИРН входят четыре основных IGBT транзистора  $VB_1$ – $VB_4$  (по два транзистора в каждой из двух фаз) и четыре шунтирующих  $VB_5$ – $VB_8$ , при этом одна фаза – неконтролируемая, без включенных в нее силовых ключей. Данный тип силовой схемы имеет асимметричную структуру, характеризуется наличием асимметрии у выходных фазных напряжений и токов, но в то же время является более экономичным решением силовой части ИРН, чем предыдущий вариант. Основным недостатком этой структуры является отсутствие управляемых силовых полупроводниковых элементов в неконтролируемой фазе, что приводит к возникновению значительной асимметрии фазных токов и дополнительных потерь энергии в переходных процессах АД (табл. 1).

Таблица 1

Асимметрия фазных токов и потери энергии для различных структур силовых схем ИРН

Силовая схема	Параметр	$I_{\text{ср.кв}(A)}, \%$	$I_{\text{ср.кв}(B)}, \%$	$I_{\text{ср.кв}(C)}, \%$	$\Delta A^*_{\text{п}}, \text{о. е.}$
На четырех силовых ключах		1,4	12,2	11	1,15
На пяти силовых ключах		1,68	5,7	4,1	1,06
На шести силовых ключах		–	–	–	1
На трех силовых ключах с диодным мостом		0,13	0,11	0,17	1,02

Кроме того, из-за наличия неконтролируемой фазы невозможно регулировать продолжительность торможения АД, в результате чего процесс

торможения сильно затягивается (рис. 3в, временная диаграмма скорости 1). Поэтому для обеспечения более быстрого процесса торможения АД приходится отключать неконтролируемую фазу, например с помощью контактора или дополнительного ключа (рис. 3в, временная диаграмма скорости 2). Также для данного типа силовой схемы ИРН невозможно реализовать квазичастотное управление для формирования устойчивой пониженной скорости АД перед точной остановкой ЭП, что является обязательным требованием при его использовании в ЭП кранового механизма передвижения.

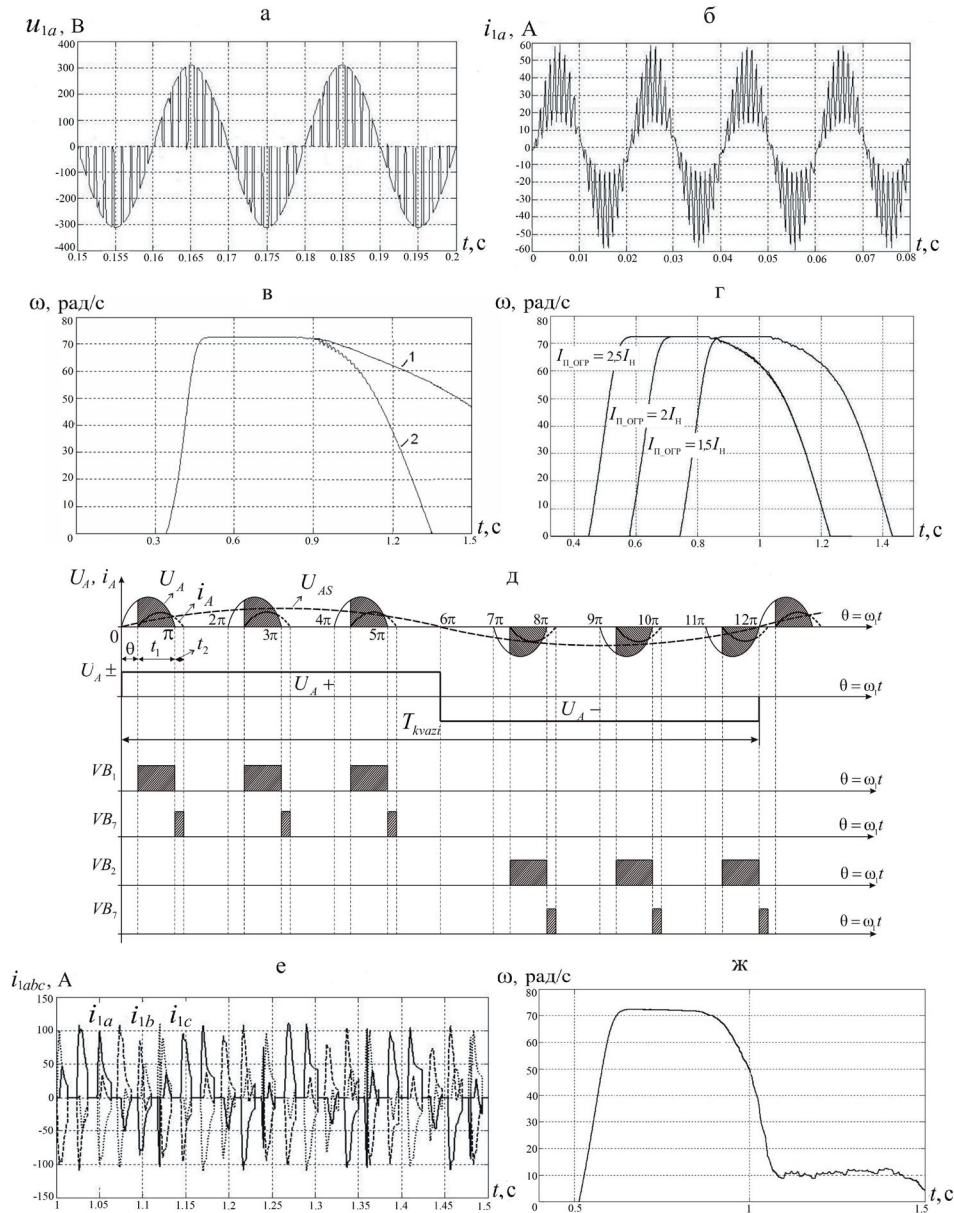


Рис. 3. Временные диаграммы выходного напряжения (а) и тока (б) ИРН на трехфазных ключах (фаза А); скорости кранового АД для ИРН четырех (в) и трех (г) силовых ключах; выходное напряжение и ток ИРН при квазичастотном управлении (д); трехфазный ток статора при квазичастотном управлении (е); диаграмма скорости с переходом на пониженную скорость для кранового АД типа 4МТКФ160ЛВ8 (ж)

Третий тип силовой схемы ИРН (рис. 2в) состоит из трех силовых ключей в каждой фазе и одного шунтирующего диодного моста с транзистором для управления процессом шунтирования обмоток АД. Работа транзисторов  $VB1-VB6$  обеспечивает обмен энергией между нагрузкой и питающей сетью. Когда один из транзисторов  $VB1-VB6$  находится в выключенном состоянии, в работу вступает однонаправленный транзистор  $VB7$ , который с помощью диодного моста  $D_1-D_6$  шунтирует соответствующие обмотки статора АД. При этом формы кривых выходных фазных напряжений и токов для этого ИРН такие же, как у однофазного ИРН (рис. 1в, г). Данный тип силовой схемы ИРН сочетает преимущества двух предыдущих.

Схема имеет симметричную структуру, обеспечивает практически симметричные друг относительно друга фазные напряжения и токи (табл. 1), и в то же время состоит из вдвое меньшего числа силовых полупроводниковых элементов (всего шесть IGBT транзисторов), чем первый вариант, следовательно, является более выигрышной по стоимости, а также позволяет реализовать квазичастотное управление АД.

В табл. 1 представлены результаты анализа асимметрии фазных токов в процентах для рассматриваемых авторами структур силовых схем ИРН по отношению к фазным токам полностью симметричной силовой схемы на шести ключах.

Из [2, 3] следует, что при плавном пуске в АД происходит возрастание потерь энергии, однако при плавном торможении потери уменьшаются по сравнению с пуском и торможением при номинальном напряжении. Поэтому для рассматриваемых типов силовых схем ИРН авторами также было проведено сравнение потерь энергии за время пуска и торможения в АД кранового типа 4МТКФ160LB8 (11 кВт, 380/220 В, ПВ 40 %,  $k_j = 1,6$ ,  $M_c = M_{ном}$ ,  $t_0 = 0,4$  с). Исследования показывают, что с увеличением асимметрии фазных токов потери энергии в АД за время переходных процессов увеличиваются. Наибольшие потери энергии характерны для ИРН с силовой частью на четырех ключах с одной неуправляемой фазой, так как именно для этой схемы имеет место самая высокая асимметрия фазных токов из всех рассмотренных вариантов. Более детальное описание и сравнение возможных структур силовых схем ИРН представлено в [5].

Таким образом, на основе полученных результатов исследований структура на трех силовых ключах с шунтирующим диодным мостом и транзистором была выбрана в качестве наиболее экономичного решения силовой части ИРН, которое по сравнению с другими рассмотренными вариантами характеризуется достаточно простым алгоритмом управления силовыми ключами, практически полным отсутствием асимметрии фазных токов и напряжений, минимальными потерями энергии в АД за время переходных процессов и позволяет реализовать квазичастотное управление АД.

**Квазичастотное управление АД на пониженной скорости с помощью ИРН.** Функциональность и область применения ИРН могут быть значительно расширены за счет квазичастотного управления АД, реализованного с помощью специального алгоритма управления основными и шунтирующими силовыми ключами. Такой усовершенствованный УПП позволит не только ограничить величины пусковых токов и ударных мо-

ментов, но и осуществить переход на пониженную скорость, например в механизме передвижения тележки крана для обеспечения ее плавной и точной остановки без использования дорогостоящих ПЧ для этих целей. В настоящее время УПП на основе ИРН и тиристорных РН с возможностью квазичастотного управления серийно не выпускаются, но в этой области ведутся активные исследования и разработки.

Процесс торможения для механизма передвижения тележки крана реализуется следующим образом: сначала с помощью ИРН реализуется плавное торможение за счет снижения по определенному закону величины питающего напряжения кранового АД при постоянной частоте сети, а затем происходит переход и работа на пониженной скорости при квазичастотном управлении. Другие виды торможения (динамическое, противовключением) для механизма передвижения тележки крана использовать нецелесообразно с энергетической и экономической точки зрения при наличии ИРН с дополнительной функцией квазичастотного управления. Получение пониженной скорости для точной остановки ЭП наиболее выгодно реализовать на базе предлагаемой силовой схемы ИРН с тремя ключами и шунтирующим диодным мостом и однонаправленным транзистором.

Подробное описание процесса формирования кривой выходного напряжения при квазичастотном управлении для тиристорного асинхронного ЭП приведено в [6].

Аналогично формирование кривой выходного напряжения (фаза А) при квазичастотном управлении для силовой схемы ИРН на трех силовых ключах с шунтирующим диодным мостом и однонаправленным транзистором показано на рис. 3д. В соответствии со структурой данной силовой схемы (рис. 2в) транзисторы  $VB1$  и  $VB2$  при квазичастотном управлении участвуют в формировании импульсов выходного напряжения ИРН фазы А, они проводят ток соответственно для положительной и отрицательной полуволны напряжения (временной интервал  $t_1$ ). Однонаправленный транзистор  $VB7$  работает только как шунт (интервал  $t_2$ ), осуществляя межфазное шунтирование обмоток АД, когда один из транзисторов  $VB1$ ,  $VB2$  находится в выключенном состоянии, что позволяет току в силовой цепи снизиться до нуля.

Несмотря на относительную простоту технической реализации квазичастотного управления на базе выбранной силовой схемы ИРН, данный режим сопровождается небольшими колебаниями скорости (рис. 3ж) и момента АД из-за импульсного характера тока статора (рис. 3е). При моменте двигателя, близком к номинальному, амплитуды токов статора могут достигать 200 %, что, однако, допустимо, поскольку квазичастотное управление применяется кратковременно в конце передвижения механизма с целью его точной остановки. При квазичастотном управлении величина напряжения первой гармоники регулируется так, чтобы получить для рассматриваемой пониженной частоты необходимый магнитный поток АД.

**Результаты имитационного моделирования.** Исследование плавного пуска и торможения кранового АД при фазовом и импульсном регулировании напряжения было осуществлено с помощью имитационных моделей систем УПП – АД, разработанных авторами в среде моделирования

MatLab с помощью пакета SimPowerSystems. Имитационная модель ИРН разработана в соответствии со структурой силовой схемы ИРН на трех силовых ключах с шунтирующим диодным мостом и однонаправленным транзистором (рис. 2в).

Для моделирования всех режимов работы и различных способов управления использовался крановый АД типа 4МТКФ160LB8 (11 кВт, 380/220 В, ПВ 40 %,  $k_j = 1,6$ ,  $M_c = M_{ном}$ ,  $t_0 = 0,4$  с), предназначенный для работы в повторно-кратковременном режиме. При этом рассматривалось управление АД по первой гармонике напряжения как для фазового, так и для импульсного регулирования напряжения.

Кривые выходных фазных токов и напряжений ИРН на трех силовых ключах с шунтирующим диодным мостом приведены на рис. 3а, б. Временные диаграммы скорости кранового АД типа 4МТКФ160LB8 при различных уставках ограничения величины пускового тока двигателя показаны на рис. 3г.

Также с помощью имитационной модели ИРН на трех силовых ключах авторы провели моделирование работы кранового АД типа 4МТКФ160LB8 на пониженной скорости при квазичастотном управлении с частотой 8,33 Гц и периоде  $T_{quasi} = 0,12$  с (шесть полуволн питающего напряжения в одном квазипериоде). Результаты моделирования квазичастотного управления представлены на рис. 3е, ж.

## ВЫВОДЫ

1. 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 ЭП целесообразно осуществлять с помощью ИРН, который по сравнению с серийно выпускаемыми тиристорными УПП позволяет:

- уменьшить потери энергии в переходных процессах ЭП;
- улучшить гармонический состав напряжения и тока АД;
- исключить дополнительный сдвиг первой гармоники тока относительно напряжения;
- повысить коэффициент мощности УПП;
- создать режим квазичастотного управления, необходимый для точной остановки механизма.

2. ИРН с дополнительной функцией квазичастотного управления АД предлагается создавать по схеме с тремя силовыми ключами и шунтирующим диодным мостом, обеспечивающей симметрию фазных токов и напряжений и лучшие экономические показатели по сравнению с другими схемами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Электроприводы грузоподъемных кранов / Е. М. Певзнер [и др.]. – М.: Россельхозакадемия, 2006. – 368 с.
2. Ф и р а г о, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
3. Ф и р а г о, Б. И. Регулирование напряжения асинхронного двигателя импульсными методами для мягкого пуска и торможения / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев, Л. Павлячик //



П международ. науч.-техн. конф. «Организационно-техническое управление в межотраслевых комплексах», 20–21 ноября 2007 г., Белорусский государственный технологический университет, Минск. – С. 213–220.

4. S t r z e l e c k i, R. Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy / R. Strzelecki, H. Supronowicz. – Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000. – 452 s.

5. F i r a g o, B. Zastosowanie impulsowego regulatora napięcia dla miękkiego rozruchu i hamowania silników / B. Firago, D. Vasilyev, L. Pawlaczuk // Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska. – 2008. – № 62. – S. 378–386.

6. А н д р ю щ е н к о, О. А. Исследование режимов асинхронного электропривода при квазичастотном управлении / О. А. Андрющенко, Г. С. Липатов, П. Э. Херунцев // Электро-техническая промышленность. Сер. Электропривод. – 1989. – № 4 (102). – С. 7–9.

Представлена кафедрой электропривода  
и автоматизации промышленных установок  
и технологических комплексов

Поступила 02.12.2009

УДК 621.314

## **КОНТРОЛЬ ДОПУСТИМЫХ КРАТКОВРЕМЕННЫХ АВАРИЙНЫХ ПЕРЕГРУЗОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А., студ. АДАМЦЕВИЧ В. А.**

*Белорусский национальный технический университет*

Мощность силовых трансформаторов выбирается исходя из экономической целесообразности режима работы и надежности электроснабжения приемников электроэнергии при условии, что нагрузки трансформаторов не должны приводить к снижению естественного срока их службы. Если не принимать во внимание перегрузочную способность трансформатора, то можно необоснованно завысить его номинальную мощность. Однако при перегрузке износ изоляции витков обмоток трансформатора, соответствующий установившимся превышениям их температур над температурой охлаждающей среды, превышает износ при номинальном режиме. Действующие стандарты [1, 2] различают систематические и аварийные перегрузки. Трансформаторы общего назначения мощностью до 100 МВ·А допускают систематические перегрузки, зависящие от характеристик суточного графика нагрузки, температуры охлаждающей среды (масла, воздуха) и степени суточной или сезонной недогрузки. Допустимость систематических перегрузок обосновывается компенсацией предшествующих и последующих недогрузок.

**Нормирование аварийных перегрузок.** Аварийные перегрузки носят кратковременный характер, встречаются нечасто и поэтому допускают некоторое некомпенсированное повышение износа изоляции обмоток относительно износа при нормальном режиме работы. Надежность электро-