

ПОСТРОЕНИЕ РЯДА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ УНИФИЦИРОВАННОГО ТРАНСФОРМАТОРНО-ТРАНЗИСТОРНОГО МОДУЛЯ

Я.К. Старостина, С.Н. Сидоров

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск

Рассматривается новая унифицированная конструкция трансформаторно-транзисторного модуля, выполненного по минимальной структуре на одном силовом транзисторе, размещённом в общей для всех фаз трансформатора цепи, позволяющая минимизировать количество силовых полупроводниковых ключей. Данный унифицированный модуль относится к преобразовательной технике, получающей применение в регулируемых электроприводах переменного тока для реализации плавного амплитудного пуска, торможения противовключением, а также осуществления режима позиционирования асинхронных двигателей. Построение ряда асинхронных электроприводов на основе унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля позволяет удовлетворить требования энергосбережения, предъявляемые к асинхронным электроприводам при их эксплуатации. Показываются пути уменьшения массогабаритных показателей вольтодобавочного трансформатора, являющегося конструктивной основой предлагаемого устройства, путём модуляционного устранения сетевой низкочастотной составляющей напряжения в его первичной обмотке. Эффективность данного решения подтверждена анализом экспериментальных графиков прямого и плавного пуска, торможения, а также режима позиционирования асинхронного двигателя в компьютерной программе MATLAB/Simulink. Снижение энергопотребления при пуске, торможении и позиционировании асинхронного двигателя, при использовании унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля в качестве основного элемента системы управления электроприводом доказано экспериментальными графиками, полученными в компьютерной программе MATLAB/Simulink.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, унификация, широтно-импульсная модуляция, вольтодобавочный трансформатор, позиционирование, имитационное моделирование, транзисторный ключ.

Введение

В настоящее время развитие систем управления электроприводом прочно занимает лидирующее положение во многих отраслях промышленности, данные системы обеспечивают бесперебойную и надежную работу технологических механизмов.

В качестве объекта управления наибольшее применение находит асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором. Современные системы управления асинхронным электроприводом реализуются на базе силовой полупроводниковой техники, возможности которой позволяют организовать регулирование выходных координат электропривода в широком диапазоне с высокой точностью и быстродействием [1].

Широкое распространение имеют системы управления напряжением питания статорных обмоток АД. Для построения высокоэффективных с точки зрения энергосбережения асинхронных электроприводов необходимо использовать теорию оптимального управления по критерию минимума потребляемой мощности потерь.

В свою очередь, *актуальной проблемой* является унификация оборудования, поскольку высокая степень унификации оборудования позволит сократить затраты на изготовление дорогостоящего оборудования, зачастую являющегося

уникальным, так как оно может применяться в конкретном приводе одной модели агрегата [2]. В системах управления асинхронными двигателями унификация может быть осуществлена путем использования аналогичных типов комплектующих элементов применяемого оборудования. В части структуры управления электроприводами вентиляционных, а также подъёмных механизмов переход определяется в первую очередь требованиями по ограничению максимальных токов в режимах пуска, тормоза и позиционирования.

Различия в требованиях к управлению статорным напряжением асинхронного двигателя в зависимости от типа и назначения установки послужили причиной для создания систем управления, существенно отличающихся друг от друга, что создает определенные трудности в изготовлении, наладке и эксплуатации оборудования. Для решения такого рода проблем появились предпосылки унификации силового и преобразовательного оборудования систем управления на единой аппаратурной базе [2].

Основной *целью* данной работы является повышение энергетических и экономических показателей эксплуатации ряда асинхронных электроприводов путем унификации преобразовательного элемента систем управления на базе трансформаторно-транзисторного модуля.

Трансформаторно-транзисторный модуль в качестве пуско-регулирующего устройства системы управления асинхронным электроприводом

По литературным источникам [3], при регулировании скорости изменением напряжения для вентиляторной нагрузки удастся снизить энергопотребление в 1,5–2 раза. Экономия электроэнергии будет тем больше, чем меньше момент двигателя по сравнению с номинальным и чем больше работает двигатель с недогрузкой, то есть режим длительной продолжительности включения, причём значительную долю времени работа может происходить вхолостую при низких значениях коэффициента мощности. Данный режим не всегда обусловлен технологической необходимостью и часто объясняется стремлением избежать неблагоприятного влияния пусковых токов асинхронных двигателей (АД) на качество напряжения в распределительных сетях. Переход на повторно-кратковременную работу лишь во время нагрузочных увеличивает количество запусков привода в течение суток, требуя применения устройств плавного пуска в статусе обязательной составной части асинхронного привода.

Распространение пуско-регулирующих устройств (ПРУ) сдерживается отсутствием достаточно простых решений. Одной из эффективных возможностей повышения надёжности и экономичности работы электроприводов с асинхронными двигателями является использование тиристорных

регуляторов напряжения с фазовым регулированием, изменяя напряжение управления, можно плавно менять действующее значение напряжения на обмотках статора двигателя [4]. Однако данное техническое решение увеличивает потребление реактивной мощности, делая форму тока статорных обмоток АД прерывистой, а потому величину пускового момента исчезающе малой.

При снижении питающего напряжения на 30 % критический момент асинхронного двигателя уменьшается примерно в два раза, и при значительном статическом моменте двигатель может остановиться и оказаться под пусковым током [4], поэтому на интервалах установившейся работы использование ПРУ может быть направлено на симметрирование и поддержание постоянства напряжения питания АД. Условием сохранения высоких энергетических показателей АД является квазисинусоидальная форма тока статорных обмоток с минимальным содержанием высших гармоник. Выполнить эту задачу можно, если искажениям подвергается не всё статорное напряжение, а лишь его часть в виде изменяемой широтно-импульсным способом вольтодобавки [5, 6].

В пусковых режимах необходимость отдельного регулирования напряжения в фазных обмотках АД отпадает, предоставляя возможность существенного упрощения пуско-регулирующего устройства. На рис. 1 изображена схема ПРУ, выполненного по минимальной структуре на одном силовом транзисторе $VT1$, размещённом в цепи по-

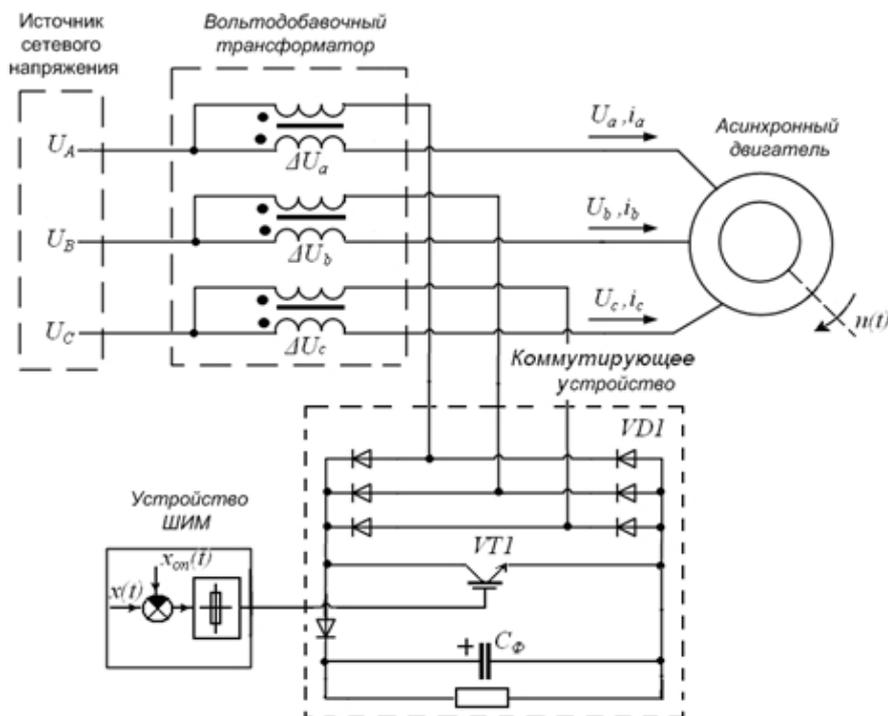


Рис. 1. Схема малоэлементного ПРУ с квазисинусоидальной формой токов в статорных обмотках асинхронного двигателя

стоянного тока на выходе с диодного моста *VDI-6*, объединяя все три фазы первичных обмоток вольтодобавочного трансформатора. Можно видеть, что коммутации транзистора в этой схеме способны привести к одновременному регулированию напряжения вольтодобавки во всех трёх статорных обмотках двигателя, причём этот процесс происходит без прерывания и заметного искажения формы токов на сетевом входе и в статорных обмотках двигателя [7].

Для защиты от возникающих в моменты записания *VTI* коммутационных перенапряжений предусмотрен вывод избыточной электромагнитной энергии первичных обмоток в параллельно подключенный демпфирующий конденсатор C_{ϕ} . Представленные на рис. 2 результаты компьютерного моделирования отражают протекание пускового режима в разомкнутой системе ПРУ-АД. Показано, что плавное наращивание напряжения статорных обмоток с нуля до номинального значения $U_{сн}$ можно обеспечить уменьшением до нуля встречного напряжения обмоток вольтодобавочного трансформатора $U_{a(b,c)}(t) = U_{A(B,C)}(t) - \Delta U_{a(b,c)}(t) \rightarrow U_{сн}$ при $\Delta U_{a(b,c)}(t) \rightarrow 0$. Требуемый закон изменения статорного напряжения задаётся формой управляющего сигнала $x(t)$ на входе широтно-импульсного модулятора [8]. В данном случае этот сигнал обеспечивает возрастание статорного напряжения по линейному закону. Полученный процесс плавного пуска с нулевых начальных значений результирующего напряжения, тока статорных обмоток и скорости вала иллюстрирует рис. 2, б.

Видно, что по сравнению с процессом прямого пуска (рис. 2, а) результат выражается в уменьшении

на 50 % первоначального броска тока статорных обмоток $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ и в соответствующем увеличении времени нарастания скорости вала $n(t)$ [9].

Достигнутые изменения в гармоническом составе напряжения первичной обмотки вольтодобавочного трансформатора открывают возможность существенного уменьшения массо-габаритных показателей, так как расчёт его магнитопровода может быть проведён, исходя из высокой несущей частоты модуляции. Одновременно с этим создаются предпосылки для повышения перегрузочной способности и надёжности ПРУ на базе трансформаторно-транзисторного модуля.

Трансформаторно-транзисторный модуль – главный элемент системы управления позиционным асинхронным электроприводом

Типичными представителями группы электроприводов специальных промышленных устройств являются электроприводы кранов, подъемников периодического действия и экскаваторов.

Общим для этих установок является режим работы, при котором технологический процесс состоит из ряда повторяющихся однотипных циклов, каждый из которых представляет собой законченную операцию загрузки рабочего органа, перемещения его из исходной точки в пункт назначения и разгрузки. Основные механизмы таких установок, как правило, имеют реверсивный электропривод, рассчитанный на работу в интенсивном повторно-кратковременном режиме. В каждом рабочем цикле имеют место неуставившиеся режимы работы электропривода: пуски, реверсы, торможения [4].

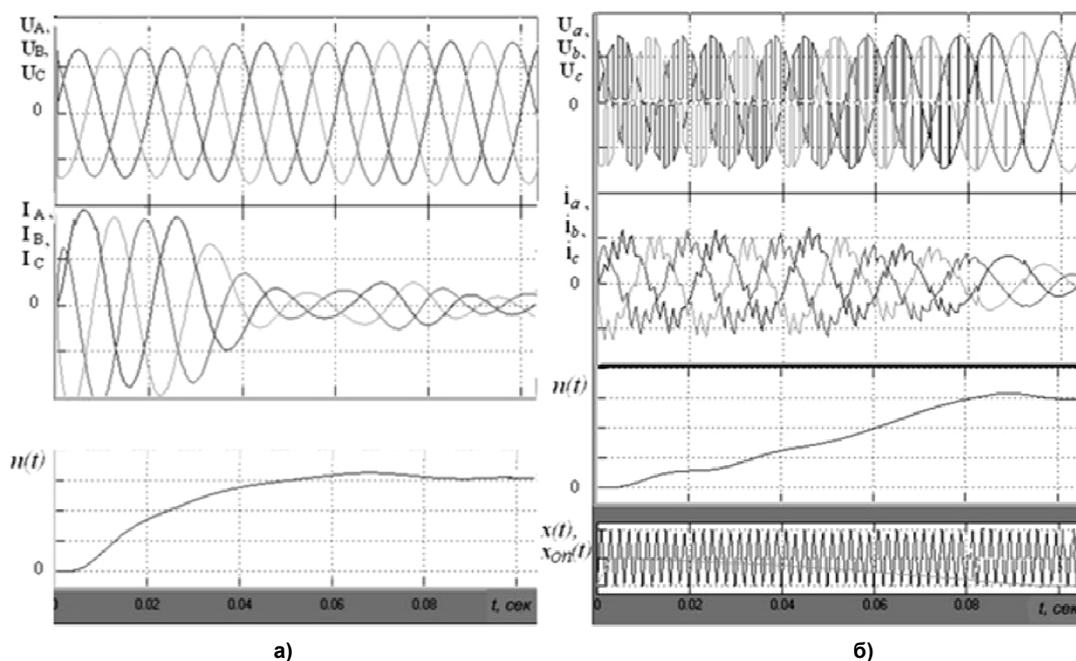


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования фазных напряжений $U_a(t)$, $U_b(t)$, $U_c(t)$ и токов $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ статорных обмоток, а также скорости вала $n(t)$ асинхронного двигателя в режимах прямого (а) и плавного (б) пуска

Электромеханические системы

На рис. 3 изображена схема управления асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в энергосберегающих системах позиционирования на базе трансформаторно-транзисторного модуля, выполненного по минимальной структуре на одном силовом транзисторе, размещённом в общей для всех фаз трансформатора цепи первой или второй обмотки.

В случае соединения первичных обмоток по схеме звезды такой цепью является нулевая точка звезды, функции которой в схеме рис. 2 выполняет единственный силовой транзистор $V0$ и $V8$ на выходе диодного моста $V1-V6$ и $V7-V14$. Можно видеть, что коммутации транзисторов в этой схеме способны привести к одновременному регулированию напряжения вольтодобавки во всех трёх статорных обмотках двигателя ($V0$ во время пуска и позиционирования, $V8$ во время тормоза), при-

чём эти процессы происходят без прерывания и заметного искажения формы токов на сетевом входе и в статорных обмотках двигателя. Для защиты от возникающих в моменты запираия $V0$ и $V8$ перенапряжений предусмотрен вывод избыточной электромагнитной энергии первичных обмоток в параллельно подключенные демпфирующие конденсаторы C_f .

Изменения статорного напряжения в режимах пуска, тормоза и позиционирования задаются формой управляющего сигнала $x(t)$ на входе широтно-импульсного модулятора. Представленные на рис. 4 результаты компьютерного моделирования отражают образование ШИМ сигнала в зависимости от опорного $x_{on}(t)$ и управляющего $x(t)$ сигналов во время пускового и тормозного режимов в разомкнутой системе позиционирования [10, 11].

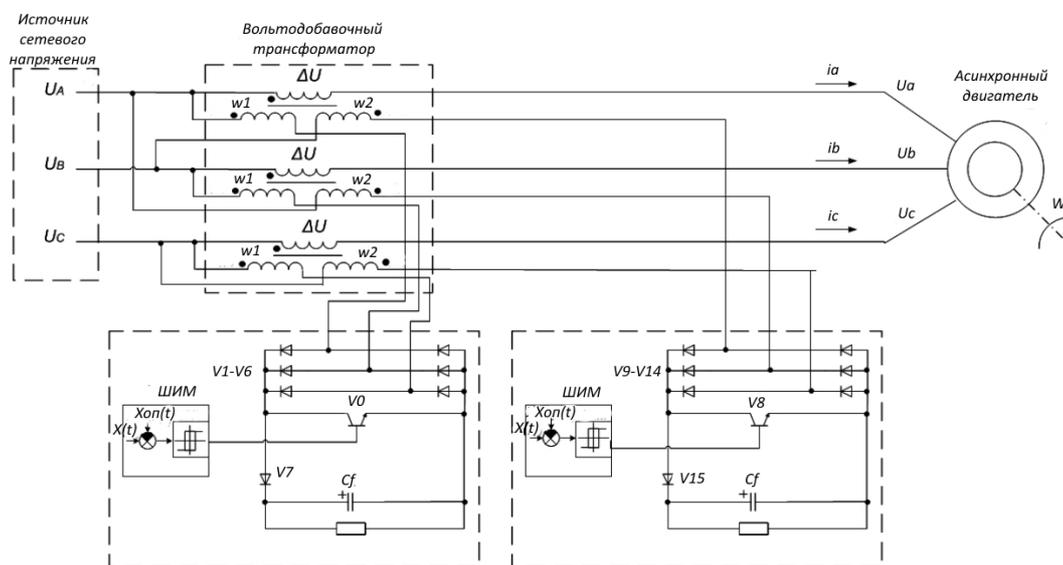


Рис. 3. Схема управления асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в энергосберегающих системах позиционирования на базе унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля

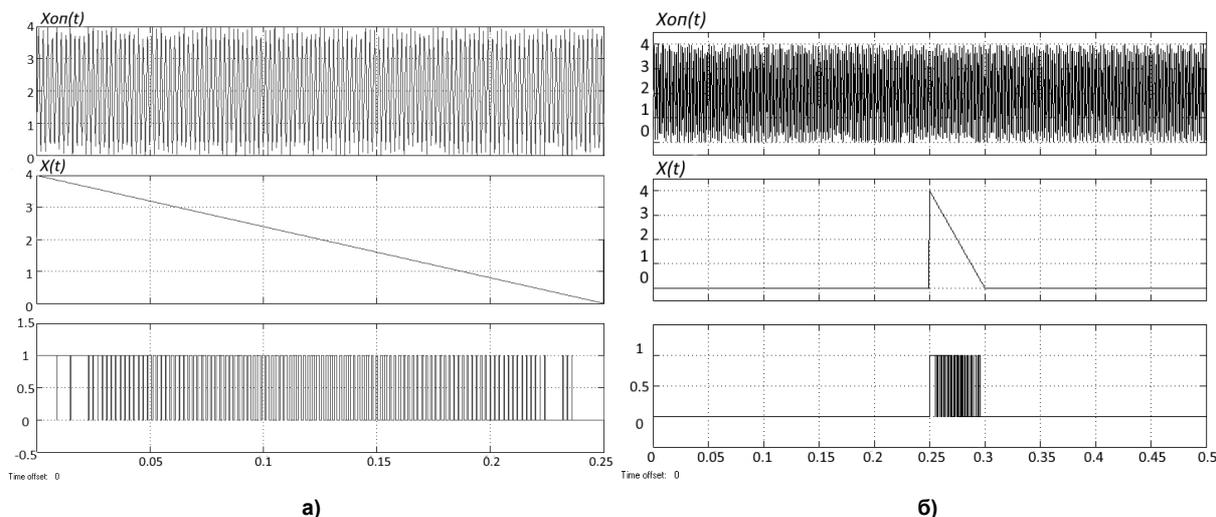


Рис. 4. Графики образования ШИМ сигнала управления транзисторами $V0$ и $V8$ в режимах пуска (а) и торможения (б) асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в энергосберегающих системах позиционирования

Во время пускового режима происходит плавное наращивание напряжения статорных обмоток с нуля до номинального значения, полученного уменьшением до нуля встречного напряжения первичных обмоток $w1$ вольтодобавочного трансформатора $U_{a(b,c)}(t) = U_{A(B,C)}(t) - \Delta U_{a(b,c)}(t)$ при $\Delta U_{a(b,c)}(t) \rightarrow 0$, а в момент торможения напряжение статорных обмоток двигателя уменьшается за счет последовательного включения вторичной обмотки $w2$ вольтодобавочного трансформатора к сети от источника питания, причём чередование фаз для которого изменено для перехода двигателя в режим торможения противовключением: $U_{a(b,c)}(t) = U_{B(A,C)}(t) - \Delta U_{a(b,c)}(t)$ при $\Delta U_{a(b,c)}(t) \rightarrow \max$. Полученный процесс плавного пуска с нулевых начальных значений результирующего напряжения и торможения противовключением показан графиками тока статорных обмоток и скорости вала на рис. 5.

Очевидно, что использование нерегулируемых режимов пуска, торможения и позиционирования асинхронного электропривода дает ограниченный набор возможных траекторий движения, чаще всего

не удовлетворяющих требованиям технологического процесса. Поэтому переход к регулируемому электроприводу с возможностью формирования управляемых переходных процессов является объективной необходимостью удовлетворения требований современных технологических установок, а также дает возможность оптимизировать энергопотребление электропривода в целом.

В результате компьютерного моделирования позиционной разомкнутой схемы на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с использованием системы управления на основе унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля были получены графики мгновенной потребляемой мощности из сети по фазе А за время пуска и торможения асинхронного двигателя. Сравнение полученных графиков с графиками мгновенной потребляемой мощности из сети по фазе А при прямой работе двигателя от сети без использования регулирующих систем показано на рис. 6.

Технический результат рассматриваемого унифицированного трансформаторно-транзисторного

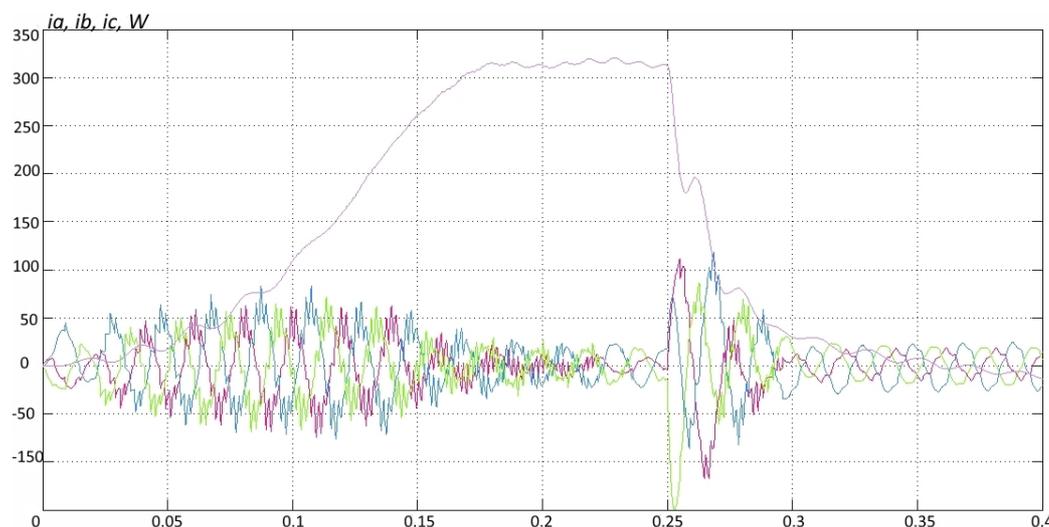


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования фазных токов $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$ статорных обмоток, а также скорости вала $n(t)$ асинхронного двигателя в позиционной разомкнутой системе

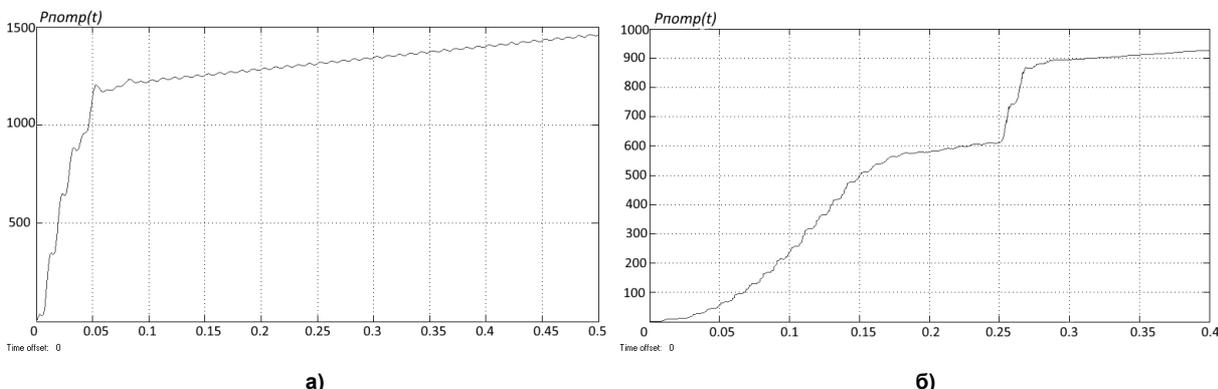


Рис. 6. Графики мгновенной потребляемой мощности из сети $P_{\text{потр}}(t)$ по фазе А за время пуска и торможения асинхронного двигателя в позиционных разомкнутых системах: а) не используя регулирующие устройства; б) с использованием предлагаемого устройства

модуля заключается в расширении функциональных возможностей системы управления асинхронным двигателем, регулирование которого возможно как в двигательном, так и тормозном режимах при вращении двигателя в обоих направлениях.

Заключение

Высокая степень унификации позволит снизить стоимость оборудования на стадии проектирования и производства оборудования. При высоком уровне унификации оборудования достигается снижение эксплуатационных и ремонтных затрат, поскольку привод является самым дорогостоящим элементом [2].

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработан унифицированный трансформаторно-транзисторный модуль для построения ряда энергосберегающих систем управления асинхронным двигателем.

По приведённым результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Предлагаемый вариант унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля в системах управления асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в энергосберегающих системах управления устраняет недостатки альтернативных решений, часто выражающихся в неоправданно большом количестве полупроводниковых ключей, а также в существенных искажениях напряжений и токов.

2. Необходимость введения в схему ПРУ вольтодобавочного трансформатора технико-экономически оправдывается сравнительно малой, по причине кратковременности нагружения, установленной мощностью данного элемента, а также возможностью уменьшения массо-габаритных показателей трансформатора вследствие питания напряжением повышенной частоты.

3. Применение унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля в системах управления асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором дает возможность для решения задачи энергосбережения при оптимизации режимов пуска, торможения и позиционирования электропривода.

Работа выполнялась при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК» (договор № 9533ГУ/2015 от 01.02.2015 г.)

Литература

1. Макаров, В.Г. Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения / В.Г. Макаров // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2011. – Вып. 6. – С. 79–92.

2. Козярук, А.Е. Применение унифицированной системы управления электроприводами самосвала и экскаватора и способы ее диагностики / А.Е. Козярук, С.И. Таранов // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2013. – Вып. 1. – С. 104–108.

3. Бурулько, Л.К. Расчет и проектирование следящего привода: учеб. пособие / Л.К. Бурулько. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – Ч. 2 – 120 с.

4. Бурулько, Л.К. Электрооборудование промышленности. Электроприводы промышленных механизмов и устройств: учеб. пособие / Л.К. Бурулько, Ю.Н. Дементьев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 180 с.

5. Кобзев, А.В. Стабилизаторы переменного напряжения с высокочастотным широтно-импульсным регулированием / А.В. Кобзев, Ю.М. Лебедев, Г.Я. Михальченко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 120 с.

6. Розанов, Ю.К. Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты / Ю.К. Розанов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 184 с.

7. Старостина, Я.К. Малоэлементное пускорегулирующее устройство для турбомеханизмов / Я.К. Старостина, С.Н. Сидоров // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2014. – Т. 16, № 4 (3). – С. 624–626.

8. Пат. 2110136 Российская Федерация. Способ широтно-импульсного регулирования напряжения на выходе сетевого преобразователя / С.Н. Сидоров, Ю.Л. Шикин; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический ун-т; опубл. 27.04.1998, Бюл. № 12.

9. Пат. 2596218 Российская Федерация. Пускорегулирующее устройство для асинхронного двигателя / С.Н. Сидоров, Я.К. Старостина; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет; опубл. 10.09.2016.

10. Старостина, Я.К. Малоэлементное пускорегулирующее устройство для асинхронного электропривода в режиме минимального энергопотребления / Я.К. Старостина, С.Н. Сидоров // *Труды 7-й Международной (19-й Всероссийской) по автоматизированному электроприводу АЭП*, 2014, г. Саранск. – Изд-во Мордовского университета. – 2014. – С. 93–96.

11. Starostina, Ya.K. The Start-up and Controlling Device for the Asynchronous Electric Drive on the Diode-transistor Modules / Ya.K. Starostina, S.N. Sidorov // *Russian Electromechanics*. – 2015. – № 4. – С. 42–49. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-4-42-49

Старостина Ярослава Константиновна, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов», Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск; yaroslava.starostina@bk.ru.

Сидоров Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов», Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск; s.sidorovul73@mail.ru.

Поступила в редакцию 21 марта 2017 г.

DOI: 10.14529/power170209

CONSTRUCTION OF A NUMBER OF ENERGY SAVING ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES BASED ON UNIFIED TRANSFORMER-TRANSISTOR MODULE

Ya.K. Starostina, yaroslava.starostina@bk.ru,

S.N. Sidorov, s.sidorovul73@mail.ru

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation

The paper considers a new unified construction of the transformer and transistor module executed on the minimum structure at one power transistor placed in the transformer common for all phases of the circuit allowing to minimize the number of power semiconductor keys. This unified module belongs to the converting equipment applied in AC adjustable electric drives for the smooth amplitude start-up, countercurrent braking, and also for implementation of the asynchronous engines positioning mode. Making a row of asynchronous electric drives on the basis of the unified transformer and transistor module allows one to meet the energy saving requirements imposed on asynchronous electric drives during their operation. The ways for reduction of mass-dimensional indices of the booster transformer which forms a structural basis of the offered device by the modulation elimination of a network low frequency tension component in its primary winding are shown. The solution efficiency is confirmed by the analysis of the direct and smooth start-up experimental diagrams, braking, and also by the mode of the asynchronous engine positioning in the computer program MATLAB/Simulink. Energy consumption lowering at start-up, braking and positioning of the asynchronous engine, when using of the unified transformer and transistor module as a basic element of the electric drive management system, is proven by the experimental diagrams obtained in the computer program MATLAB/Simulink.

Keywords: asynchronous engine, unification, pulse width modulation, booster transformer, positioning, simulation modeling, transistor key.

References

1. Makarov V.G. [Urgent Problems of Asynchronous Electric Drive and Methods of Their Decision]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2011, no. 6, pp. 79–92. (in Russ.)
2. Kozyaruk A.E., Taranov S.I. [Application of the Unified Management System for the Dump Truck and Excavator Electric Drives and Methods of its Diagnostics]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University], 2013, no. 1, pp. 104–108. (in Russ.)
3. Burul'ko L.K. *Raschet i proektirovanie sledyashchego privoda: Uchebnoe posobie. Chast' 2* [Calculation and Design of Follow-up Drive: Manual. Part 2]. Tomsk, TPU Publ., 2004. 120 p.
4. Burul'ko L.K., Dement'ev Yu.N. *Elektrooborudovanie promyshlennosti. Elektroprivody promyshlennykh mekhanizmov i ustroystv: uchebnoe posobie* [Industrial Electric Equipment. Electric Drives of Industrial Mechanisms and Devices: Manual]. Tomsk, Tomsk Polytechnical University Publ., 2012. 180 p.
5. Kobzev A.V. *Stabilizatory peremennogo napryazheniya s vysokochastotnym shirotno-impul'snym regulirovaniem* [Alternating Voltage Stabilizers with High-frequency Pulse-width Regulation]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 120 p.
6. Rozanov Yu.K. *Poluprovodnikovye preobrazovateli so zvenom povyshennoy chastoty* [Semiconductor Transformers with Increased Frequency Elements]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 184 p.

7. Starostina Ya.K., Sidorov S.N. [Few-Element Starting-Regulating Device for Turbo-Mechanisms]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2014, vol. 16, no. 4(3), pp. 624–626.

8. Sidorov S.N., Shikin Yu.L. *Sposob shirotno-impul'snogo regulirovaniya napryazheniya na vykhode setevogo preobrazovatelya* [Method of Pulse-Width Voltage Regulation at Network Transformer Output]. Patent RF, no. 2110136, 1998.

9. Sidorov S.N., Starostina Ya.K. *Puskoreguliruyushchee ustroystvo dlya asinkhronnogo dvigatelya* [Start-up Regulating Device for Asynchronous Engine]. Patent RF, no. 2596218, 2016.

10. Starostina Ya.K., Sidorov S.N. [Low-Element Starting and Control Device for Asynchronous Electric Drive Turbomachines]. *Trudy 7-y Mezhdunarodnoy (19-y Vserossiyskoy) po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP* [Proceedings of the 7-th International (19-th All-Russian) on the Automated Electric Drive AED]. Saransk, Mordovia University Publ, 2014, pp. 93–96. (in Russ.)

11. Starostina Ya.K., Sidorov S.N. [The Start-up and Controlling Device for the Asynchronous Electric Drive on the Diode-Transistor Modules]. *Russian Electromechanics*, 2015, no. 4, pp. 42–49. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-4-42-49

Received 21 March 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Старостина, Я.К. Построение ряда энерго-сберегающих асинхронных электроприводов на основе унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля / Я.К. Старостина, С.Н. Сидоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 67–74. DOI: 10.14529/power170209

FOR CITATION

Starostina Ya.K., Sidorov S.N. Construction of a Number of Energy Saving Asynchronous Electric Drives Based on Unified Transformer-Transistor Module. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 67–74. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170209