

ISSN 0013-5860

A large, stylized logo consisting of a blue 'E' and a blue 'T' that overlap. The 'E' is on the left and the 'T' is on the right, with the vertical stem of the 'T' overlapping the right side of the 'E'.

*Электротехника*

**11** 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Матушкин Н.Н., Хижняков Ю.Н. Южаков А.А.</b> Модификация контура свободной турбины авиационного двигателя . . . . .	2
<b>Файзрахманов Р.А., Володин В.Д., Шаронов А.А., Полевщиков И.С.</b> Анализ перспективных методик управления двухдвигательным электроприводом . . . . .	6
<b>Щербинин А.Г., Терлыч А.Е., Мансуров А.С.</b> Экспериментальные и численные исследования токовой нагрузки силовых кабелей в зависимости от условий прокладки . . . . .	11
<b>Петроченков А.Б.</b> Функции эффективности для основного электротехнического оборудования предприятий минерально-сырьевой отрасли . . . . .	15
<b>Судаков А.И., Чабанов Е.А.</b> Высокоточная и достоверная идентификация переходных процессов мощных синхронных машин вероятностно-статистическими методами . . . . .	21
<b>Каменских А.Н., Степченко Ю.А., Тюрин С.Ф.</b> Проблемы анализа полумодулярности и энергонадежности отказоустойчивых самосинхронных схем. . . . .	27
<b>Файзрахманов Р.А., Мурзакаев Р.Т., Бурьлов А.В., Шилов В.С.</b> Формирование энергоэкономичного маршрута режущего инструмента станков гидроабразивной и лазерной резки с ЧПУ . . . . .	32
<b>Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю., Гатаулин Т.В.</b> Математическое моделирование нестационарных процессов тепломассопереноса в прямоугольном кабельном канале. . . . .	37
<b>Даденков Д.А. Казанцев В.П.</b> О синтезе пассивно-адаптивных систем управления электроприводом . . . . .	42
<b>Костыгов А.М., Кычкин А.В., Артемов С.А.</b> Автоматизированная система удаленного энергомониторинга подвижных объектов с электроприводом . . . . .	48
<b>Макагонов Н.Г., Посягин А.И., Южаков А.А.</b> Структура и алгоритм работы коммутатора в нейронной сети самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя . . . . .	51
<b>Исцелемов Д.А., Любимов Э.В.</b> Программный комплекс «SMTTest» для испытательных станций синхронных турбомашин. . . . .	56
<b>Авторы опубликованных статей . . . . .</b>	62

## CONTENTS

<b>N.N. Matushkin, Yu.N. Khizhnyakov, A.A. Yuzhakov.</b> Modification of the jet engine free turbine contour . . . . .	2
<b>R.A. Fayzrakhmanov, V.D.Volodin, A.A.Sharonov, I.S. Polevshchikov.</b> Analysis of prospective management techniques twin-engined electric . . . . .	6
<b>A.G. Scherbinin, A.E. Terlych, A.S. Mansurov.</b> Experimental and numerical investigations of current load of power cables depending on the cables layout . . . . .	11
<b>A.B. Petrochenkov.</b> The functions of the efficiency of basic electrotechnical equipment in mineral resource industry . . . . .	15
<b>A.I. Sudakov, E.A. Chabanov.</b> Precise and accurate identification of transient processes of high-power synchronous machines by probabilistic and statistical methods . . . . .	21
<b>A.N. Kamenskikh, Yu.A. Stepchenkov, S.F. Tyurin.</b> The problem of a fault-tolerant self-timed circuit analysis on semi-modularity and energy-reliability . . . . .	27
<b>R.A. Faizrakhmanov, R.T. Murzakaev, A.V. Burylov, V.S. Shilov.</b> Generation of the energy-efficient route of waterjet and laser cnc cutting tool . . . . .	32
<b>N.M. Trufanova, E.Yu. Navalikhina, T.V. Gataulin.</b> Mathematical modeling of transitional processes Heat in a rectangular cable channels . . . . .	37
<b>D.A. Dadenkov, V.P. Kazantsev.</b> Synthesis and research of passive and adaptive control systems of the electric drive . . . . .	42
<b>A.M. Kostygov, A.V. Kychkin, S.A. Artemov.</b> Energy monitoring system for moving objects with electric drive . . . . .	48
<b>N.G. Makagonov, A.I.Posyagin A.A.Yuzhakov.</b> Commutator structure and work algorithm in self-routing analog-to-digital converter neuron network. . . . .	51
<b>D.A. Istselemov, E.V. Lyubimov.</b> «SMTTest» software system for synchronous machines test stands . . . . .	56
<b>Autors of published article . . . . .</b>	62

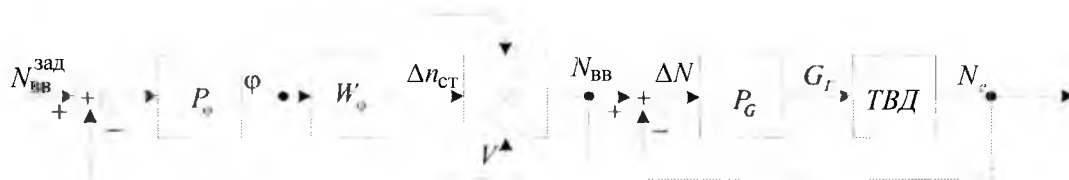


Рис. 6. Каскадная схема управления ТВД вертолета

процесс изменения  $n_{ст}$ . По скорости и направлению изменения  $n_{ст}$  можно судить о дисбалансе мощностей, что является причиной автоколебаний  $n_{ст}$ ;

– в каскадных системах управления ТВД возможно применение адаптивных нейронных регуляторов;

– в систему управления летательным аппаратом необходимо ввести ограничение по  $n_{ст}$ , которое в целом снижает эффективность работы авиационного двигателя;

– данные модификации управления ТВД требуют встроенного датчика крутящего момента.

### Список литературы

1. Дудкин Ю.П., Титов Ю.К., Филиппенков Р.Г., Хижняков Ю.Н. Нечеткое управление частотой вращения свободной турбиной газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17, № 6.
2. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Нейро-нечеткий регулятор частоты газотурбинного двигателя // Приборы. 2010. № 5.
3. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
4. Леготкина Т.С., Данилова С.А. Методы идентификации систем. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008.

## Анализ перспективных методик управления двухдвигательным электроприводом

ФАЙЗРАХМАНОВ Р.А., ВОЛОДИН В.Д., ШАРОНОВ А.А., ПОЛЕВЩИКОВ И.С.

Успехи силовой электроники сделали реально-стью гибридные автомобили, а также транспортные средства, использующие только электрическую энергию – не только привычные электровозы, трамваи и троллейбусы, но и электромобили, такие, как Tesla-S и ElLada. В современных транспортных средствах на электрической тяге широко используется многодвигательный электропривод и каждому электродвигателю необходима собственная система управления, что увеличивает габариты, занимаемые управляющими инверторами и регуляторами, а следовательно, растет и потребляемая от источника питания мощность. Для снижения потребляемой мощности, а также уменьшения габаритов электронных систем управления многодвигательным электроприводом разрабатываются новые схемотехнические и программные решения. В статье приведен обзор перспективных методов управления двухдвигательным электроприводом: пятиканального и девятиключевого инверторов. Рассматриваются схемотехнические и программные решения, с помощью которых реализуются более оптимальные методы управления двумя электродвигателями.

**Ключевые слова:** двухдвигательный электропривод, трехфазный электродвигатель, система управления, пятиканальный инвертор, девятиключевой инвертор, DSP.

*Electric drive and electric motor is becoming more widely used in society and the economy. Advances power electronics have made a reality hybrid cars and vehicles using only electrical energy – not just the usual electric locomotives, trams and trolleybuses, but also electric vehicles, such as the Tesla-S and El Lada. In modern vehicles on electric traction is widely used multimotor electric motor and each requires its own control system, which increases the size occupied by the master inverter and controls, and, consequently, so does the consumption of power from the power source. In order to reduce power consumption and reduce the size of electronic control systems for electric multiimpellent develop new hardware and software solutions. This article provides an overview of promising methods of control twin-engined electric drive: five-channel and nine-key inverters. Considered as schematics and software solutions, which are implemented using more optimal methods to control two electric motors.*

**Key words:** electric twin-engine, three-phase motor control system, a five-channel inverter, nine-key inverter, DSP.



Рис. 1. Классическая реализация системы управления двухдвигательным электроприводом

Электропривод, содержащий два электродвигателя, используется в транспортных лентах, электромобилях, а также в ходовой части мобильных роботов.

Типовая система управления таким электроприводом состоит из следующих элементов:

- частотных регуляторов, управляющих вращением валов электродвигателей (в терминологии [1] «интеллектуальных ключей»);

- управляющего микропроцессорного устройства, реализующего алгоритм управления частотными регуляторами; в конвейерах данную функцию выполняет программируемый логический контроллер, реализующий алгоритм управления электродвигателями в зависимости от нагрузки на ленту конвейера [2], в электромобилях функции электронного дифференциала выполняет DSP [1].

Можно предположить, что кроме этих элементов в системе может присутствовать микропроцессорное устройство, осуществляющее еще более высокий уровень управления. Например, борт-компьютер электромобиля, осуществляющий управление DSP дифференциала [1]. Обобщенно структура такой системы представлена на рис. 1, где микропроцессорное устройство, осуществляющее управление электродвигателями посредством частотных регуляторов, названо контроллером электродвигателей, а микропроцессорное устройство, реализующее управление всей системой, если таковое имеется, названо основным управляющим микрокомпьютером.

Однако данная система имеет ряд недостатков:

- большие габариты;

- высокая стоимость;

- относительно большая потребляемая мощность (особенно если каждый частотный регулятор имеет собственный выпрямитель).

Для решения данных проблем за рубежом ведутся разработки в области частотных регуляторов (в зарубежной литературе используется термин «инвертор»). Основными направлениями были приняты следующие:

- снижение габаритов и массы системы управления за счет объединения двух частотных регуляторов и контроллера электродвигателей в одном блоке – фактически, все эти задачи берет на себя один микроконтроллер или DSP;

- уменьшение количества силовых ключей путем оптимизации алгоритмов управления двумя электродвигателями; для этих целей были разработаны пятиканальный и девятиключевой инверторы;

- введение общего выпрямителя для питания ключей обоих электродвигателей.

Однако данные разработки нацелены на создание нового типа частотного регулятора, что останавливает отечественных исследователей, так как указанные разработки используют максимальное количество доступных на рынке готовых узлов. Цель данного исследования – обобщить зарубежный опыт создания перспективных систем управления двухдвигательным электроприводом, на основе которых можно будет вести разработки отечественных устройств такого типа, соответствующих передовым мировым образцам.

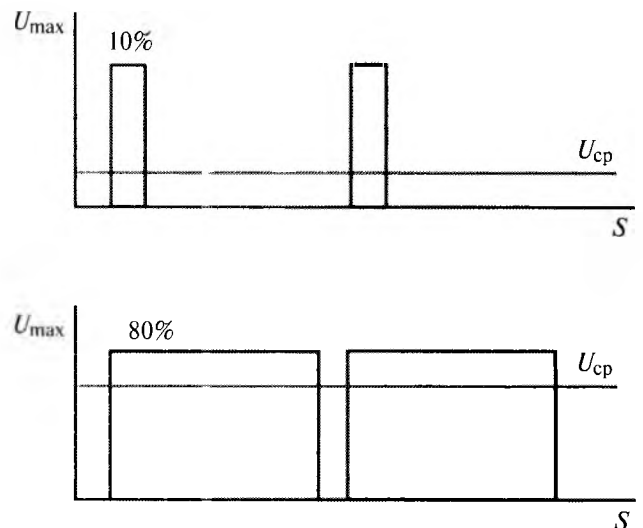


Рис. 2. Взаимосвязь между скажностью и средним напряжением



Рис. 3. Генерация синусоидальных колебаний с помощью ШИМ

**Применение широтно-импульсной модуляции для управления электродвигателями**

Большинство трехфазных электродвигателей, как синхронных, так и асинхронных, используют трехфазное переменное напряжение, т.е. на обмотки подаются синусоидальные сигналы, смещенные относительно друг друга на 120°. В силовой электронике такие напряжения создаются средствами широтно-импульсной модуляции (ШИМ). До появления микроконтроллеров с модулями ШИМ формирование необходимых сигналов осуществлялось аналоговыми средствами путем сравнения треугольного сигнала несущей с сигналом, подлежащим модуляции. С появлением микроконтроллеров с модулями ШИМ, либо реализующих ШИМ, как одну из функций таймера, цифровые методы широтно-импульсной модуляции стали доминирующими [3].

Принцип регулирования с помощью ШИМ основан на инертности объекта управления, не успевающего переключаться с частотой несущей, но при этом на нагрузке появляется напряжение, пропорциональное скважности импульсов несущей частоты. Такое напряжение, получаемое на нагрузке, называют средним напряжением. На рис. 2 графически показана взаимосвязь между скважностью и средним напряжением, получаемым на нагрузке.

В таком случае среднее напряжение вычисляется по следующей формуле:

$$U_{\text{ср}} = S U_{\text{max}},$$

где  $S$  – скважность сигнала несущей частоты;  $U_{\text{max}}$  – напряжение на нагрузке, получаемое при минимальной скважности (обычно постоянное напряжение питания нагрузки);  $U_{\text{ср}}$  – среднее напряжение на нагрузке, получаемое в результате регулирования.

Как видно из рис. 2, подобный метод позволяет формировать любые напряжения на нагрузке в диапазоне от нуля до постоянного напряжения питания нагрузки. Аналогичным образом возможно формирование не только постоянных напряжений, но и переменных или пульсирующих напряжений различной формы. В частности, возможно формирование синусоидального напряжения, которое используется для питания электродвигателя [4] (рис. 3).

Так как для питания электродвигателей необходимо, чтобы одна полуволна синусоиды была положительной, а другая отрицательной, то для этой цели используется двухплечевой ключ, верхнее плечо которого используется для генерации положительной полуволны, а нижнее плечо – для генерации отрицательной. В качестве переключающих элементов обычно используются MOSFET или IGBT транзисторы [3]. Типовая схема силовой части трехфазного инвертора с ключами на транзисторах структуры MOSFET приведена на рис. 4.

Постоянное напряжение получается путем выпрямления двух- или трехфазного напряжения сети с помощью выпрямителя, после чего с помощью каналов ШИМ управляющего микроконтроллера создается трехфазное переменное напряжение необходимой частоты, которое подается на обмотки статора электродвигателя. Именно такая схема силовой части трехфазного инвертора используется в подавляющем большинстве частотных и векторных регуляторов электропривода. Такие регуляторы используются, например, в разработках [1, 2]. Развитием данного типа инверторов является пятиканальный инвертор.

**Пятиканальный инвертор**

Схема пятиканального инвертора, именуемого в англоязычной литературе, как

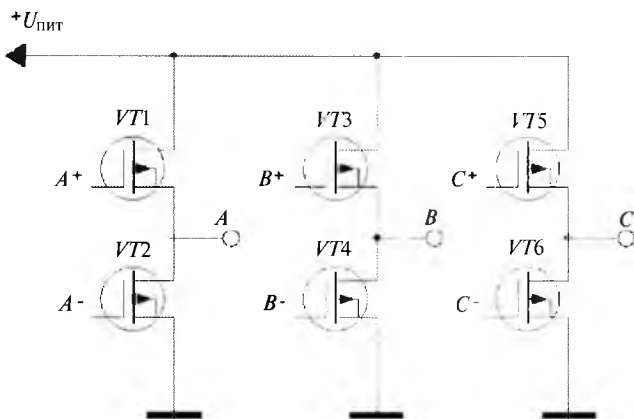


Рис. 4. Типовая схема трехфазного инвертора на транзисторах структуры MOSFET

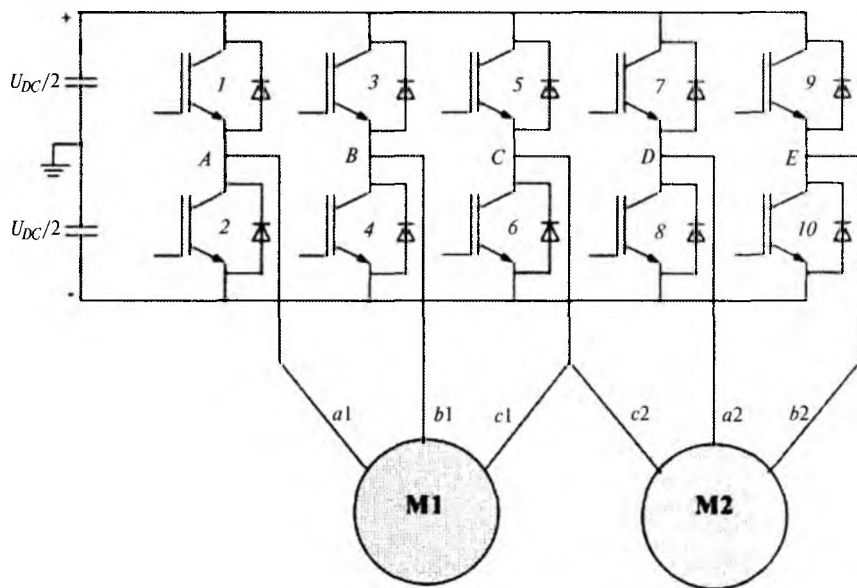


Рис. 5. Структура пятиканального инвертора на IGBT-транзисторах

Five-leg inverter (или сокращенно FLI) показана на рис. 5.

Схемотехнически такой инвертор напоминает два классических трехфазных инвертора за исключением того, что фазы *C* электродвигателей объединены между собой и управляются одним ключом. За счет этого исключаются два транзистора и одна линия ШИМ, что ведет к уменьшению размеров и стоимости инвертора.

Для управления таким инвертором были разработаны специальные алгоритмы [5, 6], осуществляющие преобразование выходных значений стандартных программных вектор-

ных регуляторов (значения для фаз *A, B, C* трехфазного электродвигателя) в сигналы, пригодные для управления пятиканальным инвертором.

На сегодняшний день наибольшее распространение получил метод, называемый DZS (doublezero-voltage sequence) – двойного напряжения смещения нулевой точки. Данный метод предполагает формирование напряжений на фазах инвертора следующим образом:

$$\begin{cases} U_A = U_{A1} + U_{C2}; \\ U_B = U_{B1} + U_{C2}; \\ U_C = U_{C1} + U_{C2}; \\ U_D = U_{A2} + U_{C1}; \\ U_E = U_{B1} + U_{C1}, \end{cases}$$

где  $U_A, U_B, U_C, U_D, U_E$  – напряжения на выходах инвертора (рис. 5);  $U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}$  и  $U_{A2}, U_{B2}, U_{C2}$  – напряжения фаз первого и второго электродвигателя, получаемые с выходов векторных регуляторов.

Более наглядно структуру этого алгоритма иллюстрирует рис. 6. Как видно, путем взаимного сложения значений напряжений на обмотках, получаемых с векторных регуляторов, вычисляются значения, которые передаются модулям ШИМ для формирования напряжений на каналах инвертора.

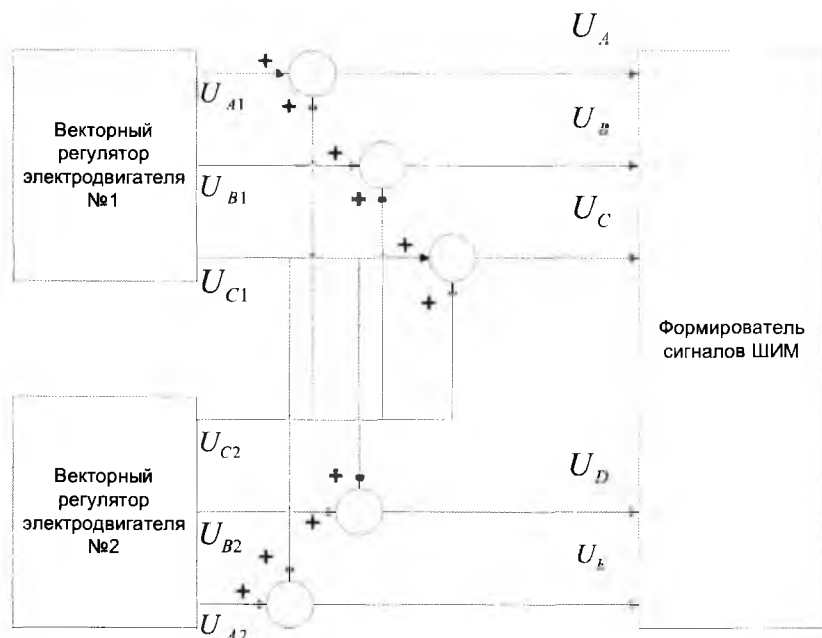


Рис. 6. Структура системы управления пятиканальным инвертором с использованием DZV-алгоритма

### Девятиключевой инвертор

Другой перспективный метод управления двухдвигательным электроприводом – использование инвертора с девятью ключами [7]. Использование данного инвертора также преследует цель – уменьшение количества силовых элементов, размеров инвертора и потерь. Структура такого инвертора показана на рис. 7. Данный метод, позволяет сократить количество переключающих элементов до девяти, однако в отличие от пятиканального инвертора каждому переключающему элементу необходим отдельный канал ШИМ (для пятиканального инвертора достаточно пяти каналов ШИМ, при реали-

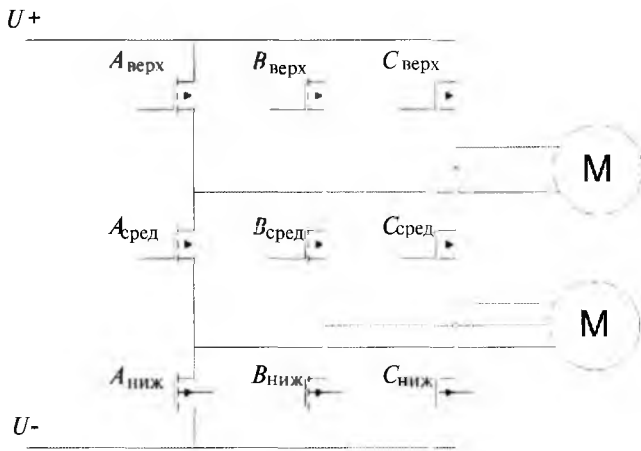


Рис. 7. Структура девятиключевого инвертора на основе MOSFET-транзисторов

зации двух классических инверторов с использованием одного управляющего микроконтроллера будет использоваться шесть каналов ШИМ).

Принцип действия такого инвертора поясняет диаграмма сигналов (рис. 8). Как видно, в различные моменты времени инвертор оказывается в режиме, когда нижние или верхние ключи открыты и в регулировании не участвуют, а подключенные электродвигатели управляются в обычном для трехфазного инвертора режиме. Например, когда открыты нижние транзисторы, для верхнего электродвигателя

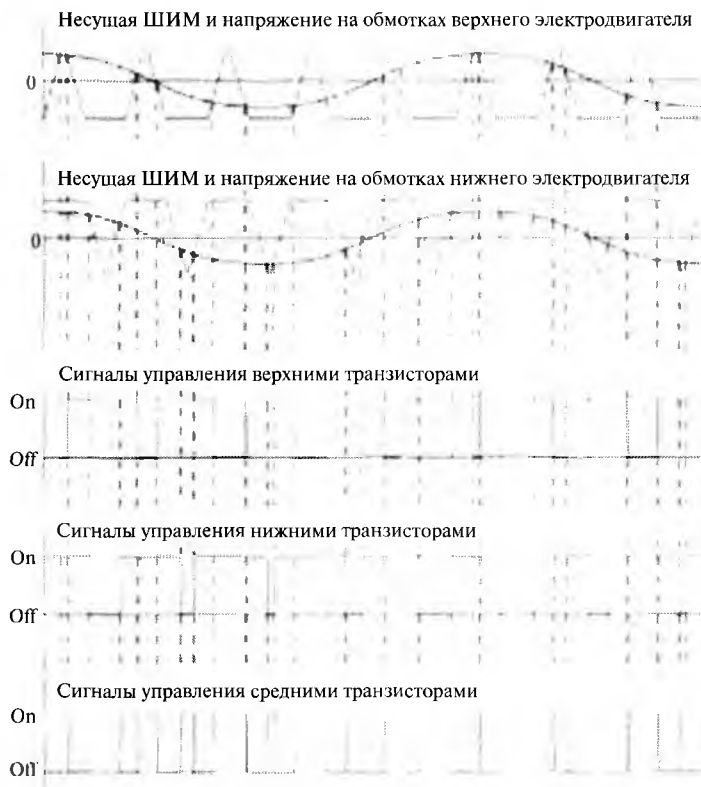


Рис. 8. Диаграмма, поясняющая работу девятиключевого инвертора

роль ключей, формирующих положительную полуволну синусоиды, выполняют верхние транзисторы, а роль ключей, формирующих отрицательную полуволну – средние. Если открыты верхние ключи, то для нижнего электродвигателя роль ключей, формирующих положительную полуволну, выполняют средние транзисторы, а роль формирователей отрицательной полуволны – нижние транзисторы. В [7] данные режимы называются соответственно первым и вторым режимом работы.

Сигналы для управления верхними и нижними транзисторами формируются с помощью векторных регуляторов. Сигналы для управления средними транзисторами формируются путем инверсии сигналов управления верхними ключами и объединения инвертированных сигналов и сигналов управления нижними ключами по логической схеме ИЛИ.

Рассмотренные методы управления двухдвигательным электроприводом и алгоритмы, заложенные в них, проверены на асинхронных трехфазных электродвигателях [6] и электродвигателях типа PMSM (электродвигателях, по принципу работы близких к синхронным трехфазным электродвигателям) [5].

### Список литературы

1. Голубчик Т.В., Феофанова Л.С., Феофанов С.А., Лазарев Д.Б., Насибулов И.Р. Разработка алгоритмов работы электрического дифференциала с микропроцессорным управлением с использованием интеллектуальных ключей // Современные проблемы науки и образования. 2014. №2. URL: science-education.ru/116-12366
2. Тарасов А.С. Разработка и исследование системы двухдвигательного электропривода конвейеров для транспортировки сыпучих материалов: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.03. Липецк, 2013.
3. Горбунов Р.Л., Посконный Г.И. Исследование трехфазного широтно-импульсного преобразователя переменного напряжения для повышения энергоэффективности асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324, №4.
4. Archana P., Karthick R. Closed loop PWM control for induction motor drive using dual output three phase inverter // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2014. Vol. 3. Issue 3. pp. 7684-7691. URL: ijareeie.com/upload/2014/march/20\_ClosedLoop.pdf
5. Hiroyuki Enokijima, Kazuo Oka, Kouki Matsuse. Independent position control of two permanent magnet synchronous motor driver fed by five-leg inverter // Journal of International Council on Electrical Engineering. 2011. Vol. 1, №4.
6. M.H.N. Talib, Z. Ibrahim, N. Abdul Rahim, N. Mohd Yaakop. Development of combined vector and direct torque control methods for independent two induction motor drives // 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2012), Melaka, Malaysia: 6-7 June 2012.
7. Tsutomu Kominami, Yasutaka Fujimoto. A novel nine-switch inverter for independent control of two three-phase loads // Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE.