

# СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-111-119  
УДК 621.33

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТИРИСТОРНЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА СУДАХ

*С. В. Головки, А. В. Дьяченко, Н. Г. Романенко*

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Российская Федерация*

Двигатели постоянного тока часто используются во многих системах судового электропривода. Благодаря прогрессу промышленной электроники и технологий стало возможным разработать более эффективные схемы управления судовыми электродвигателями. В обычных методах управления скоростью в системе происходят потери мощности, которые можно минимизировать с помощью стратегии использования силовой электроники. Рассматривается тиристорное управление двигателями постоянного тока судового электропривода. Описаны системы управления двигателем постоянного тока, представлены имитационные модели в программе MATLAB Simulink. Перечислены тиристорные методы управления скоростью двигателя постоянного тока: однофазный полууправляемый преобразователь (для двигателей мощностью до 15 кВт); однофазный привод с управляемым преобразователем (позволяет работать в двух квадрантах); трехфазный полууправляемый преобразователь; трехфазный управляемый преобразователь; однофазный реверсивный преобразователь, реализованный соединением двух однофазных преобразователей (позволяет обеспечить работу во всех режимах); трехфазный реверсивный преобразователь, реализованный аналогично однофазному. Проиллюстрирована механическая характеристика двигателя постоянного тока при изменении напряжения, подводимого к обмотке якоря. Отмечено, что управление напряжением якоря благоприятнее для скоростей ниже номинальной скорости, управление потоком предпочтительнее для скоростей выше номинальной. Сделан вывод о том, что управление скоростью с применением устройств силовой электроники обеспечивает большую экономию энергии, в отличие от традиционных методов управления скоростью, т. к. при традиционных методах происходят значительные потери энергии.

**Ключевые слова:** тиристоры, двигатель постоянного тока, регулирование скорости, модель тиристорного преобразователя, характеристики.

**Для цитирования:** Головки С. В., Дьяченко А. В., Романенко Н. Г. Сравнительный анализ тиристорных схем управления двигателями постоянного тока, применяемых на судах // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 2. С. 111–119. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-111-119.

### Введение

К настоящему моменту достигнуты значительные улучшения в технологии производства и изготовления полупроводников, создано большое многообразие различных типов силовых полупроводниковых приборов.

Рост силовой электроники стал возможен благодаря развитию микроэлектроники, появилась возможность управления мощными полупроводниковыми устройствами. Коммутационные устройства работают с использованием современных алгоритмов управления.

Целью цепей силовой электроники является изменение электрической энергии от одной формы к другой от источника к нагрузке с высочайшей эффективностью, высокой доступностью и высокой надежностью при минимальных затратах, наименьших размерах и весе [1].

Основной целью настоящей работы является изучение различных тиристорных схем управления двигателем постоянного тока, в частности применяемых в судовых электроприводах, например гребных электрических установках. Скорость вращения вала двигателя контролируется с использованием различных типов выпрямителей. При этом источники питания являются идеальными, но возможны некоторые отклонения в выходном сигнале для практической реализации системы на судах. Это может произойти из-за поведения оборудования на входе/выходе других физических и электрических изменений параметров.

### Материалы исследования

Для анализа характеристик требуется построение модели двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Из-за взаимодействия магнитного поля статора с током в проводниках якоря создается крутящий момент.

Добавление внешнего резистора к приводу постоянного тока для управления скоростью вращения вала двигателя на судах нецелесообразно, т. к. большая часть энергии теряется в виде тепла из-за внешнего резистора. Управление напряжением якоря предпочтительнее для скоростей ниже номинальной, а управление потоком – для скоростей, превышающих номинальную скорость, но в то же время максимальная мощность двигателя снижается, поскольку для данного максимального тока якоря поток меньше, чем номинальное значение, и, следовательно, максимальный крутящий момент меньше максимального номинального крутящего момента [2].

Рис. 1 иллюстрирует механическую характеристику с использованием метода управления напряжением якоря.

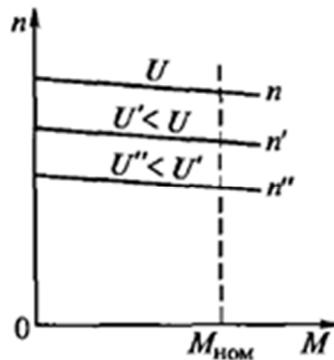


Рис. 1. Механическая характеристика двигателя постоянного тока при изменении напряжения, подводимого к обмотке якоря

Ниже представлены тиристорные методы управления скоростью двигателя постоянного тока [3]:

1. Однофазный полууправляемый преобразователь. Этот преобразователь используется для двигателей мощностью до 15 кВт;
2. Однофазный привод с управляемым преобразователем. Преобразователь позволяет работать в двух квадрантах;
3. Трехфазный полууправляемый преобразователь;
4. Трехфазный управляемый преобразователь;
5. Однофазный реверсивный преобразователь, реализованный соединением двух однофазных преобразователей, что позволяет обеспечить работу во всех режимах;
6. Трехфазный реверсивный преобразователь, реализованный аналогично однофазному.

### Результаты моделирования

Тиристорная схема управления двигателем постоянного тока смоделирована в программе MATLAB Simulink.

Формы выходного напряжения источника приведены на рис. 2.

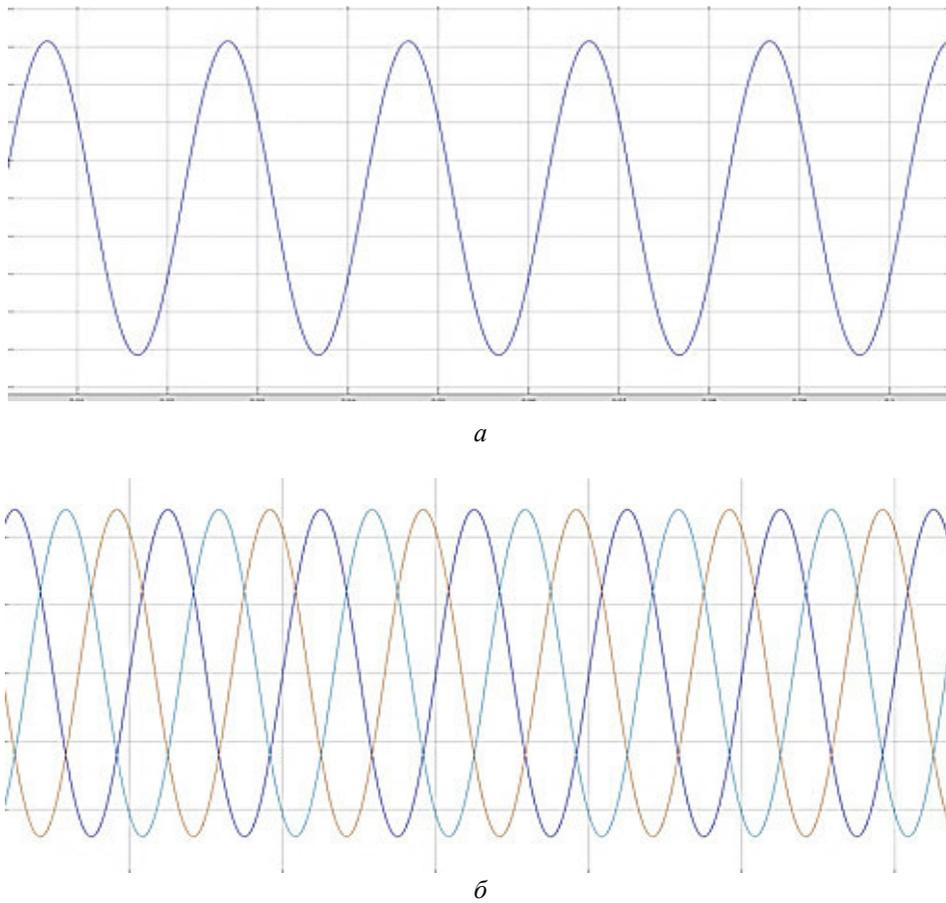


Рис. 2. Форма выходного напряжения источника питания:  
 а – для однофазных моделей; б – для трехфазных моделей

1. Результаты моделирования полупроводящего однофазного преобразователя.

Имитационная модель представлена на рис. 3, данные моделирования полупроводящего однофазного преобразователя приведены в табл. 1.

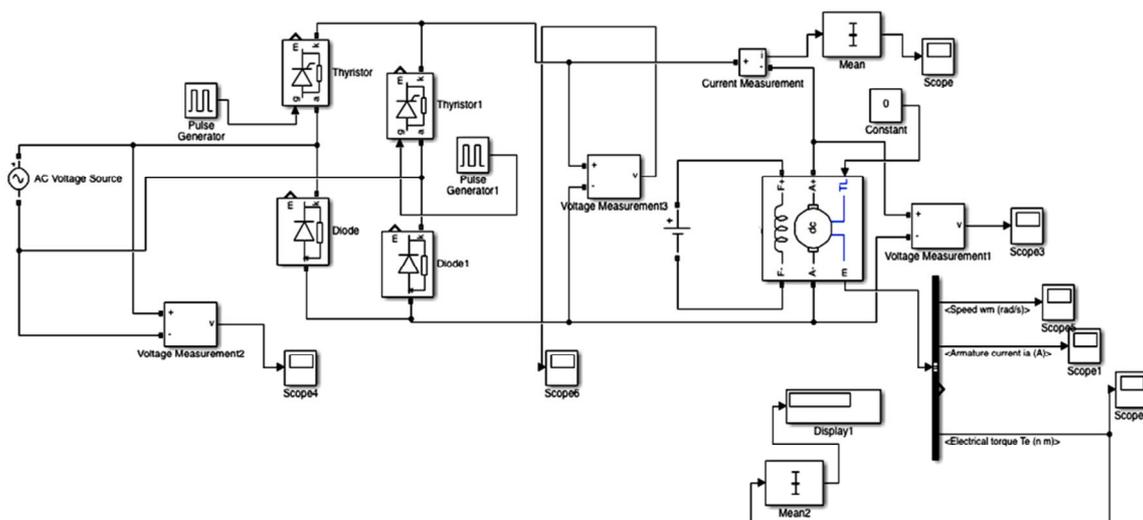


Рис. 3. Модель полупроводящего однофазного преобразователя

Таблица 1

Данные моделирования полупроводящего однофазного преобразователя

Угол открытия (T1)	Угол открытия (T2)	Нагрузка	Скорость, рад/с
0	180	Без нагрузки	189
30	210	Без нагрузки	176
60	240	Без нагрузки	153
0	180	С нагрузкой	120
30	210	С нагрузкой	111
60	240	С нагрузкой	95

На рис. 4 приведена форма выходного сигнала полупроводящего однофазного преобразователя.



Рис. 4. Форма выходного напряжения полупроводящего однофазного преобразователя

2. Результаты моделирования управляемого однофазного преобразователя.

Имитационная модель представлена на рис. 5, данные моделирования управляемого однофазного преобразователя приведены в табл. 2.

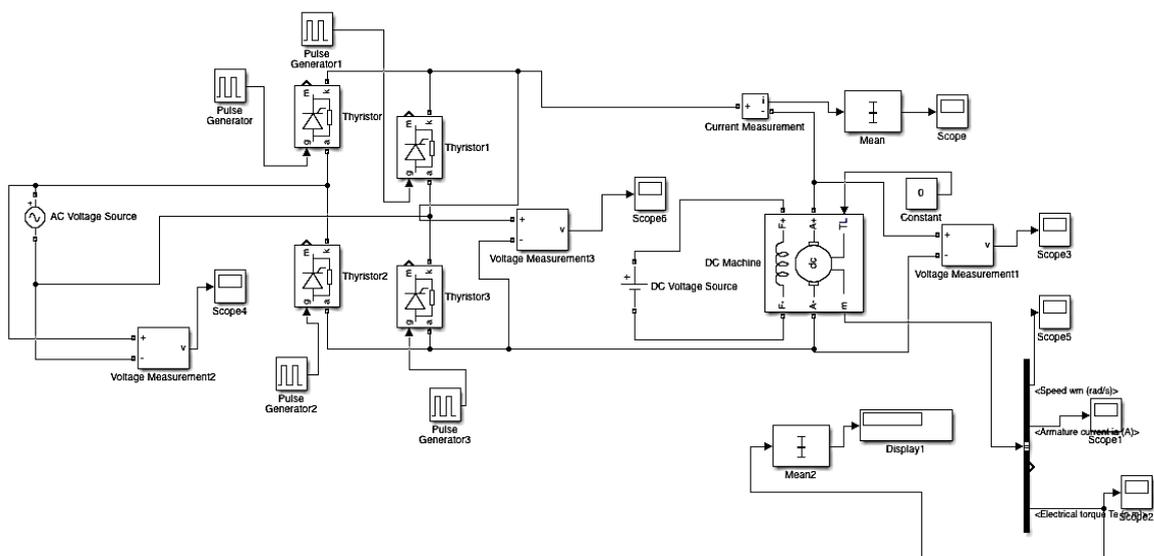


Рис. 5. Модель управляемого однофазного преобразователя

Данные моделирования управляемого однофазного преобразователя

Угол открытия (T1)	Угол открытия (T2)	Нагрузка	Скорость, рад/с
0	180	Без нагрузки	185
30	210	Без нагрузки	180
60	240	Без нагрузки	140
0	180	С нагрузкой	125
30	210	С нагрузкой	100
60	240	С нагрузкой	75

На рис. 6 приведена форма выходного сигнала управляемого однофазного преобразователя.

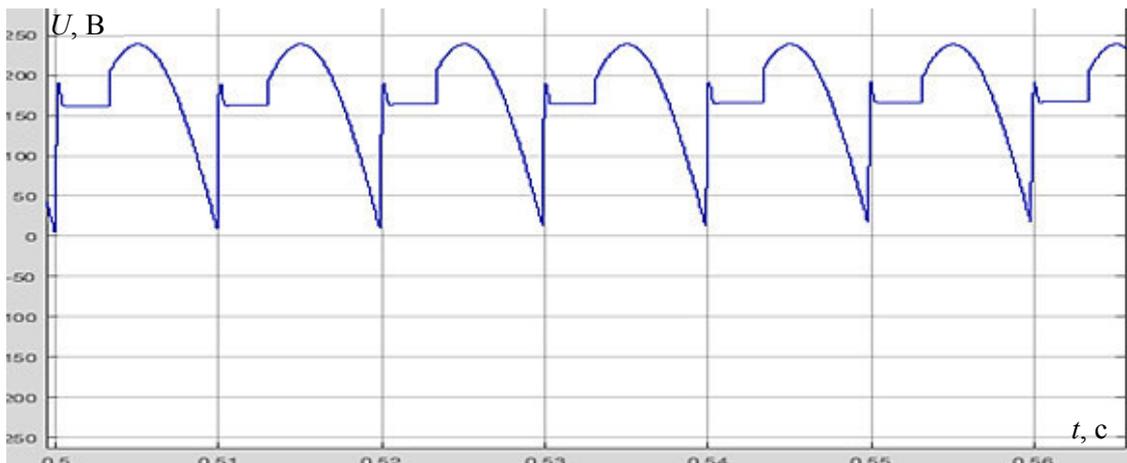


Рис. 6. Форма выходного напряжения преобразователя

### 3. Результаты моделирования трехфазного полууправляемого преобразователя.

Имитационная модель представлена на рис. 7, данные моделирования полууправляемого трехфазного преобразователя приведены в табл. 3.

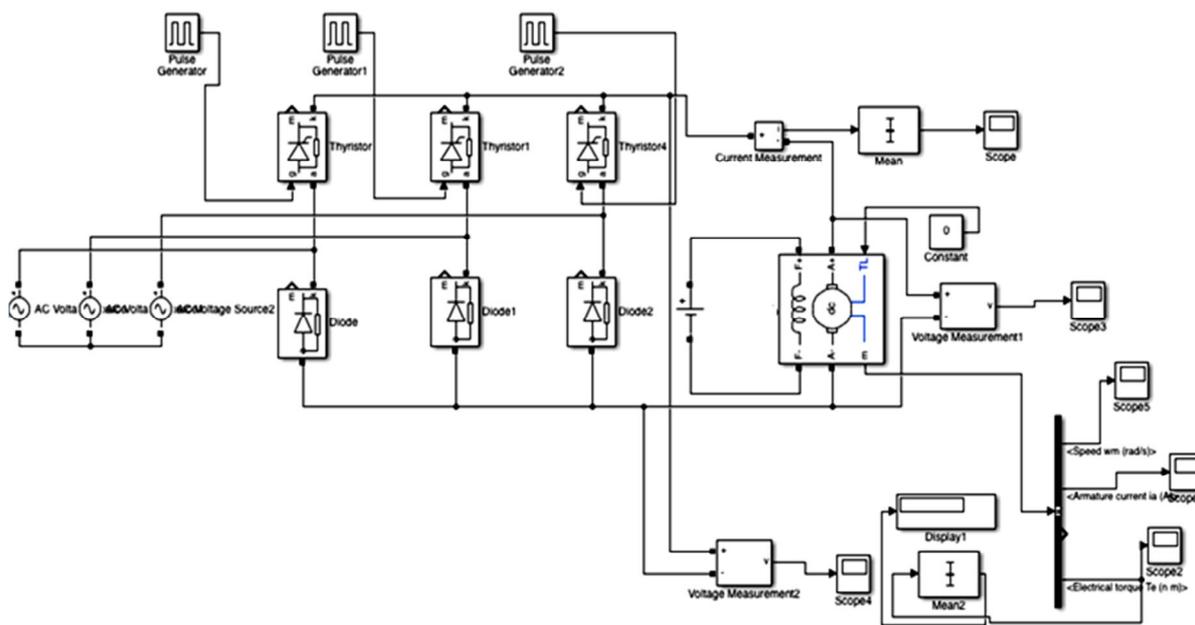


Рис. 7. Модель полууправляемого трехфазного преобразователя

Данные моделирования полупроводящего трехфазного преобразователя

Угол открытия (T1)	Угол открытия (T2)	Угол открытия (T3)	Нагрузка	Скорость, рад/с
0	120	240	Без нагрузки	345
30	150	270	Без нагрузки	342
60	180	300	Без нагрузки	318
0	120	240	С нагрузкой	255
30	150	270	С нагрузкой	225
60	180	300	С нагрузкой	180

4. Результаты моделирования трехфазного управляемого преобразователя.

Имитационная модель представлена на рис. 8, данные моделирования управляемого трехфазного преобразователя приведены в табл. 4.

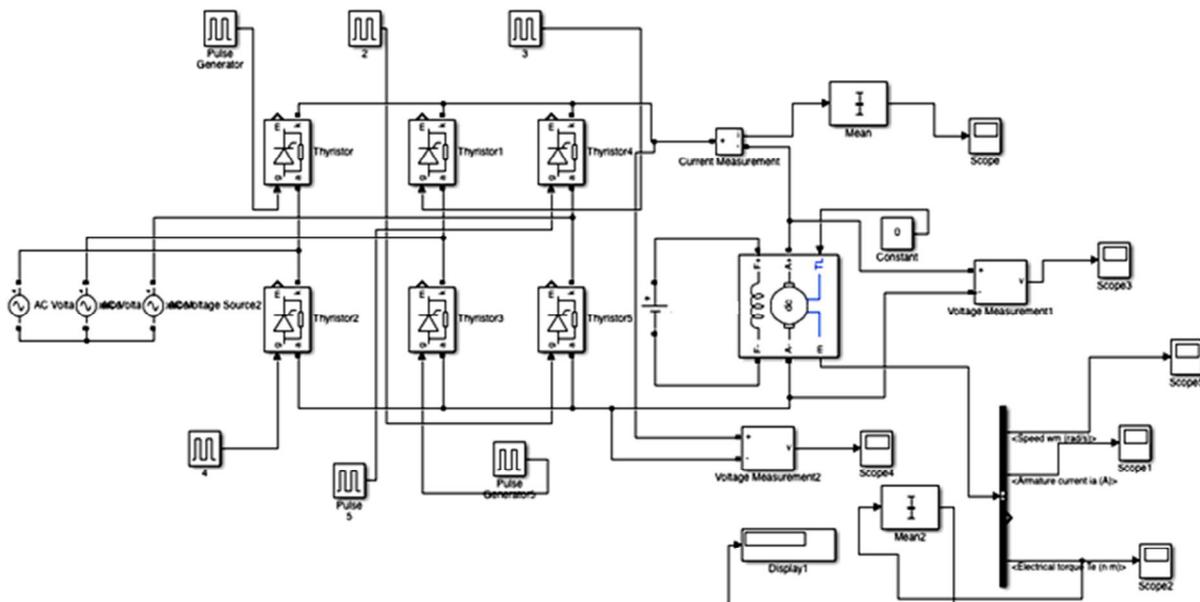


Рис. 8. Модель управляемого трехфазного преобразователя

Данные моделирования управляемого трехфазного преобразователя

Угол открытия (T1)	Угол открытия (T2)	Угол открытия (T3)	Угол открытия (T4)	Угол открытия (T5)	Угол открытия (T6)	Нагрузка	Скорость, рад/с
0	60	120	180	240	300	Без нагрузки	275
30	90	150	210	270	330	Без нагрузки	260
60	120	180	240	300	360	Без нагрузки	250
0	60	120	180	240	300	С нагрузкой	148
30	90	150	210	270	330	С нагрузкой	95
60	120	180	240	300	360	С нагрузкой	85

В схемах можно использовать только половину тиристоров. Получающаяся при этом несимметричная (полупроводящая) мостовая схема имеет более простую систему управления и меньшую стоимость.

Так же, как в симметричной схеме, при работе полупроводящего выпрямителя на активную нагрузку наступает режим прерывистого тока.

В полупроводящей схеме, по сравнению с полностью управляемой, кратность пульсаций выходного напряжения снизилась в три раза и не требует применения более мощных и громоздких фильтрующих элементов. Поэтому наиболее целесообразно использовать полупроводящую

схему для регулирования выходных параметров двигателя постоянного тока в небольших пределах. Регулировочная характеристика выпрямителя с неполным числом тиристоров не зависит от характера нагрузки.

Преимуществом полупроводимой мостовой схемы является меньшая реактивная мощность, потребляемая из сети.

5. Результаты моделирования однофазного управляемого реверсивного преобразователя. Имитационная модель представлена на рис. 9.

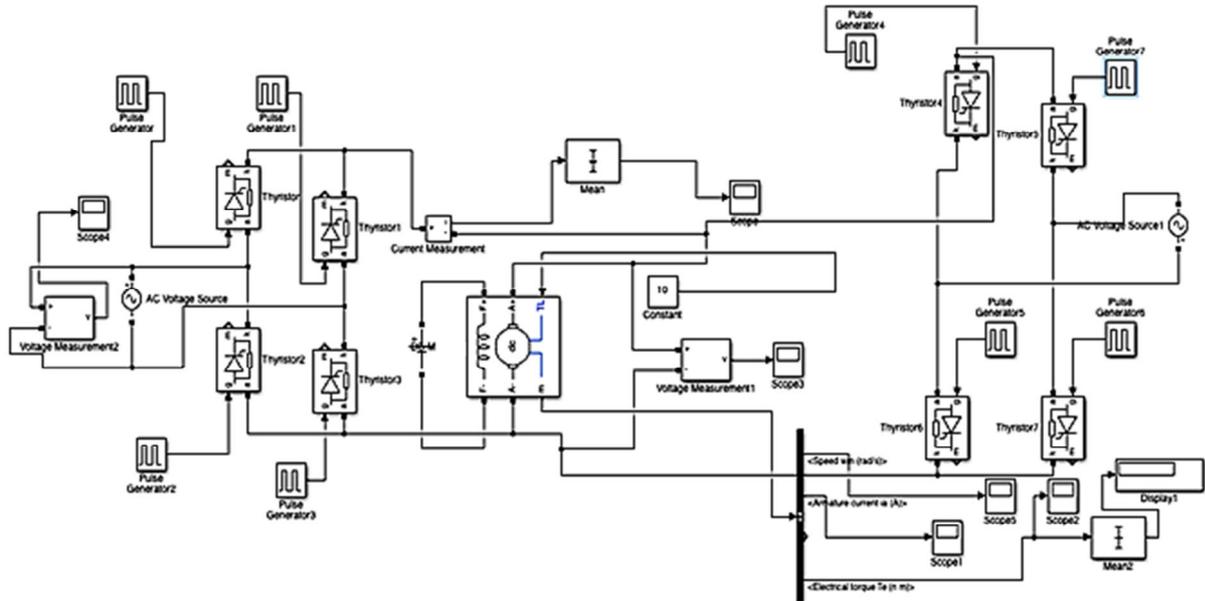


Рис. 9. Модель управляемого однофазного реверсивного преобразователя

6. Результаты моделирования трехфазного управляемого реверсивного преобразователя. Имитационная модель представлена на рис. 10.

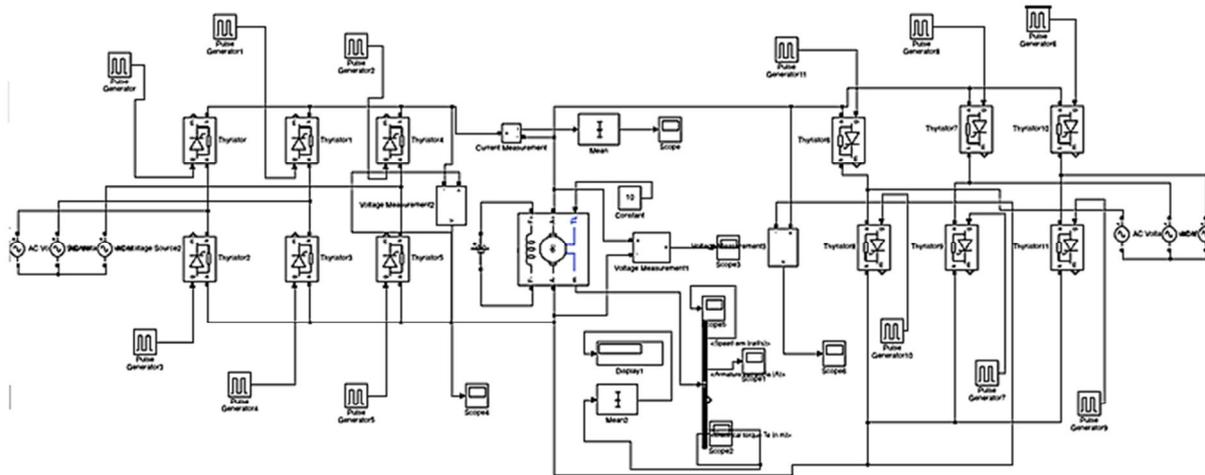


Рис. 10. Модель управляемого трехфазного реверсивного преобразователя

На практике для изменения полярности выходного напряжения выпрямителя широкое применение получили реверсивные выпрямители, состоящие из двух нереверсивных выпрямителей.

Если в качестве нагрузки выпрямителя использовать двигатель постоянного тока, то можно получить четырехквadrантный привод. Это значит, что в I и II квадрантах машина работает в двигательном и тормозном режимах при положительных значениях момента нагрузки;

в III и IV – то же, но при отрицательных значениях момента (например, при подъеме груза привод судовой лебедки нагружен положительным моментом, при спуске – отрицательным) [4].

Если внимательно рассмотреть схему реверсивного электропривода, мы увидим, что включение одной группы тиристорov (назовем ее анодной, т. к. аноды тиристорov имеют общую точку) вращает двигатель в одну сторону, включение катодной группы – в противоположную. Существуют различные способы управления обеими группами тиристорov – отдельный и согласованный. Последний может быть линейным и нелинейным.

### **Заключение**

Проведено изучение выходных характеристик двигателя постоянного тока с использованием тиристорного управления. Управление скоростью с использованием устройств силовой электроники дает большую экономию энергии, чем традиционные способы управления скоростью, поскольку в традиционных способах происходят большие потери энергии.

Модель управления на основе тиристорov успешно реализована в среде MATLAB Simulink, которая оказывает базовую помощь в проектировании.

Модели и описание их характеристик позволяют подбирать наиболее оптимальные системы для конкретных случаев, в частности для использования в судовых электроприводах.

### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. *Абрамович М. И., Бабайлов В. М., Либер В. Е. и др.* Диоды и тиристоры в преобразовательных установках. М.: Энергоатомиздат, 1992. 432 с.
2. *Электротехника.* Системы управления электроприводами. URL: <https://electrono.ru/category/sistupravlepriv> (дата обращения: 18.02.2020).
3. *Преображенский В. И.* Полупроводниковые выпрямители. М.: Энергоатомиздат, 1986. 136 с.
4. *Мастерская* своего дела. Работа управляемых выпрямителей. URL: <https://msd.com.ua/elektroprivoda-metallorzhushhix-stankov/rabota-upravlyaemyx-vypryamitelej/> (дата обращения: 19.02.2020).

Статья поступила в редакцию 24.04.2020

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Головко Сергей Владимирович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук; доцент кафедры электрооборудования и автоматики судов; [g\\_s\\_v\\_2007@mail.ru](mailto:g_s_v_2007@mail.ru).

**Дьяченко Артем Владиславович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; магистрант кафедры электрооборудования и автоматики судов; [Sadwyn1997@gmail.com](mailto:Sadwyn1997@gmail.com).

**Романенко Николай Геннадьевич** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; зав. кафедрой электрооборудования и автоматики судов; [nikolayrom@yandex.ru](mailto:nikolayrom@yandex.ru).



### **COMPARATIVE ANALYSIS OF THYRISTOR SCHEMES OF MARINE DC MOTOR CONTROL**

***S. V. Golovko, A. V. Dyachenko, N. G. Romanenko***

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russian Federation*

**Abstract.** The article considers the problem of the DC motors control that are often used in many electric drive systems. Due to the progress of industrial electronics and technology it has become possible to develop more efficient motor control circuits. The conventional speed control

methods commit power losses in the system, which can be minimized by using the power electronics strategy. There is considered the thyristor control of DC motors of the ship electric drive. The DC motor control systems are described and simulation models in the MATLAB Simulink program are presented. The thyristor methods for controlling a DC motor speed are listed: single-phase semi-controlled converter (for motors with power up to 15 kW); single-phase drive with a controlled converter (available to operate in two quadrants); three-phase semi-controlled converter; three-phase controlled converter; single-phase reverse converter realized by connecting two single-phase converters (ensuring multi-mode operation); three-phase reverse converter realized as a single-phase converter. The mechanical characteristic of a DC motor was illustrated when the voltage supplied to the armature winding changed. It has been stated that control of the armature voltage is more favorable for speeds below the rated speed; flow control is preferable for speeds above the nominal speed. It has been inferred that speed control by means of power electronics devices provides large energy savings, in contrast to the traditional speed control methods, since the traditional methods experience significant energy losses.

**Key words:** thyristors, DC motor, speed control, thyristor converter model, characteristics.

**For citation:** Golovko S. V., Dyachenko A. V., Romanenko N. G. Comparative analysis of thyristor schemes of marine DC motor control. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;2:111-119. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-111-119.

#### REFERENCES

1. Abramovich M. I., Babajlov V. M., Liber V. E. i dr. *Diody i tiristory v preobrazovatel'nyh ustanovkah* [Diodes and thyristors in converting units]. Moscow, Energoatomizdat, 1992. 432 p.
2. *Elektrotehnika. Sistemy upravleniya elektroprivodami* [Electrical engineering. Electric drive control systems]. Available at: <https://electrono.ru/category/sistupravlelpriv> (accessed: 18.02.2020).
3. Preobrazhenskij V. I. *Poluprovodnikovye vypryamiteli* [Semiconductor rectifiers]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 136 p.
4. *Masterskaya svoego dela. Rabota upravlyaemyh vypryamitelej* [Workshop of business. Operation of controlled rectifiers]. Available at: <https://msd.com.ua/elektroprivoda-metallorzhushhix-stankov/rabota-upravlyaemyx-vypryamitelej/> (accessed: 19.02.2020).

The article submitted to the editors 24.04.2020

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Golovko Sergey Vladimirovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation; [g\\_s\\_v\\_2007@mail.ru](mailto:g_s_v_2007@mail.ru).

**Dyachenko Artem Vladislavovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Master's Course Student of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation; [Sadwyn1997@gmail.com](mailto:Sadwyn1997@gmail.com).

**Romanenko Nikolay Gennadievich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation; [nikolayrom@yandex.ru](mailto:nikolayrom@yandex.ru).

