

УДК 621.31

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕРТОРОМ С ШИМ-МОДУЛЯЦИЕЙ В ПАКЕТЕ MATLAB SIMULINK

Малышев Юрий Сергеевич¹, к.т.н., доцент

e-mail: elektrikasp@mail.ru

Бурмакин Олег Анатольевич¹, к.т.н., доцент

e-mail: boa_71@mail.ru

Попов Сергей Васильевич¹, к.т.н., доцент

e-mail: popovsev3@yandex.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Разработана система управления трехфазным инвертором для имитационной модели частотного электропривода в пакете Mathlab Simulink. Описана разработанная система управления и представлены результаты моделирования системы частотного электропривода для гребной электрической установки. В модели реализована возможность независимого и совместного регулирования амплитуды и частоты выходного сигнала в соответствии с законами частотного управления. Проведён количественный и качественный анализ влияния частоты модуляции, а так же параметров фильтра на качество выходного напряжения. Сделаны выводы об адекватности модели и целесообразности ее применения.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, автономный инвертор, IGBT-транзисторы, частотное регулирование, имитационное моделирование, MATLAB Simulink, электропривод.

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF AN INVERTER CONTROL SYSTEM WITH PWM MODULATION IN THE MATLAB SIMULINK PACKAGE

Yuri S. Malyshev¹, Ph.D., Associate Professor

e-mail: elektrikasp@mail.ru

Oleg A. Burmakin¹, Ph.D., Associate Professor

e-mail: boa_71@mail.ru

Sergey V. Popov¹, Ph.D., Associate Professor

e-mail: popovsev3@yandex.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A three-phase inverter control system for a variable-frequency electric drive simulation model has been developed using the Mathlab Simulink package. The developed control system is described, and the simulation results for a variable-frequency electric drive system for a propulsion electric plant are presented. The model implements independent and combined control of the output signal amplitude and frequency in accordance with frequency control laws. A quantitative and qualitative analysis of the influence of modulation frequency and filter parameters on the output

voltage quality is conducted. Conclusions are drawn regarding the adequacy of the model and the feasibility of its application.

Keywords: pulse-width modulation, autonomous inverter, IGBT transistors, frequency regulation, simulation modeling, MATLAB Simulink, electric drive.

При разработке судовых электроприводов все чаще внимание уделяется частотному управлению асинхронными электродвигателями (АД). Это связано с его основными преимуществами: возможностью плавного регулирования скорости вращения двигателя практически без потери момента, сравнительно низкими пусковыми токами, широким диапазоном и высокой точностью регулирования [1].

Частотный электропривод может использоваться в судовых механизмах как малой (насосы, лебедки), так и большой мощности, например гребные электрические установки (ГЭУ).

В составе ГЭУ частотные преобразователи (ПЧ) обеспечивают преимущества перед традиционными гребными установками с двигателями внутреннего сгорания. К ним можно отнести: ускоренное реверсирование, снижение механических нагрузок на главную энергетическую установку, возможность интеграции с альтернативными источниками энергии и др. Поскольку ГЭУ являются более сложными по исполнению, при их разработке требуется предварительное математическое моделирование для согласования работы электрооборудования в статических и динамических режимах [2,3].

Ключевым элементом в составе ПЧ является автономный инвертор, формирующий с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) из постоянного в переменное напряжение требуемой формы и частоты для управления АД (см. Рис. 1). От функциональных возможностей ШИМ зависит качество напряжения на выходе инвертора и получение необходимых механических характеристик электродвигателя.

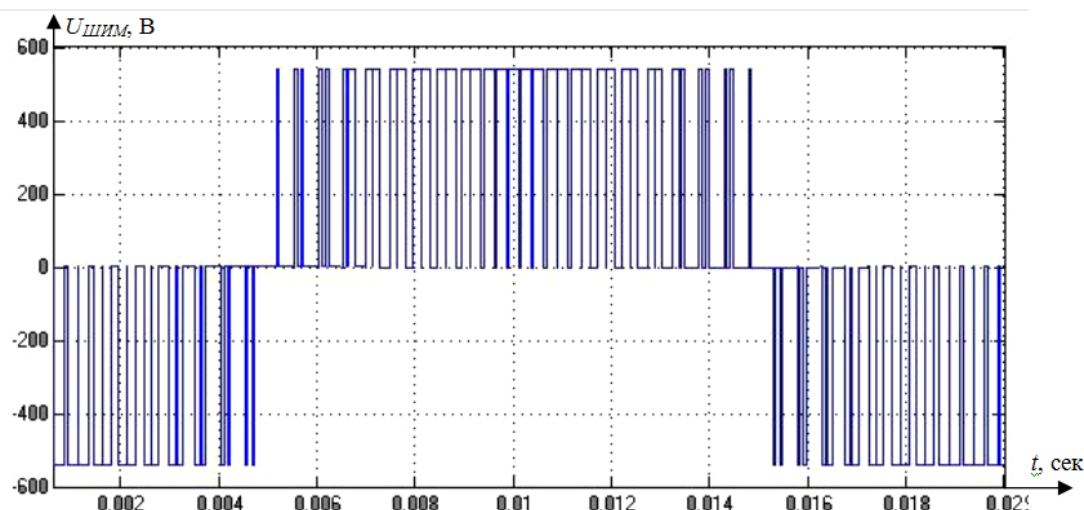


Рисунок 1 – Осциллограмма выходного напряжения инвертора

На Рисунке 2 показана модель системы ПЧ-АД, построенная на базе инвертора (блок Invertor IGBT) и ШИМ (блок Invertor Control System). К выходу инвертора Invertor IGBT подключен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (блок Asynchronous Machine), нагрузка которого может задаваться в блоке Mechanical Load. Также в модели установлены: комплект измерительных приборов для измерения угловой скорости и момента (блок Scope 1), напряжения на статоре асинхронного двигателя (блок Scope 2) и

источник постоянного напряжения (блок DC Voltage Source $U_{out}=540\text{ В}$). Вплоть до 9.14 версии MATLAB Simulink 2023 года выпуска реализация ШИМ представлена только блоком Invertor Control System [4, 5]. Блок Invertor Control System позволяет устанавливать величины напряжения на статоре и частоты вращения двигателя, однако регулировать эти параметры в ходе моделирования не представляется возможным.

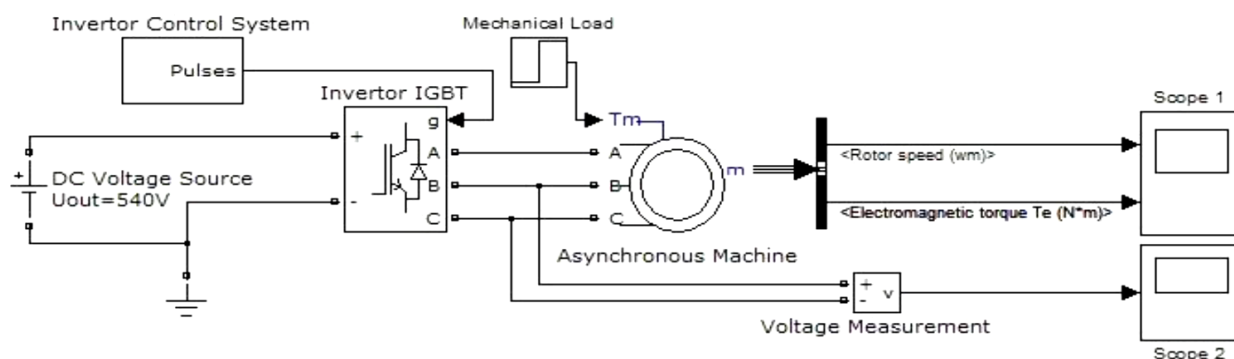


Рисунок 2 – Модель системы ПЧ–АД

Известно, что для изменения скорости АД в частотном ЭП необходимо использовать законы М.П. Костенко, обеспечивающие постоянство магнитного потока в воздушном зазоре в процессе регулирования [4-6]. Также для изучения процессов, происходящих в элементах электропривода, требуется обеспечение раздельного регулирования величин напряжения и частоты.

С целью реализации раздельного управления величинами напряжения и частоты разработана имитационная модель системы управления (СУ) инвертором с ШИМ-модуляцией, в среде MATLAB Simulink. Модель новой СУ инвертором может быть использовано для моделирования электроприводов ГЭУ с учетом специфики их нагрузочных характеристик. Имитационная модель электропривода ГЭУ по системе ПЧ - АД показана на рисунке 3. СУ модели имеет принципиальное отличие от блока управления Invertor Control System (см. Рис. 2), поскольку позволяет выполнить требуемое управление по двум раздельным каналам. В СУ входят: блок задания - Repeating Sequence, узел вычисления значений рабочей частоты модуляции и напряжения, ШИМ. ШИМ, в свою очередь, построен на базе разработанных функциональных модулей:

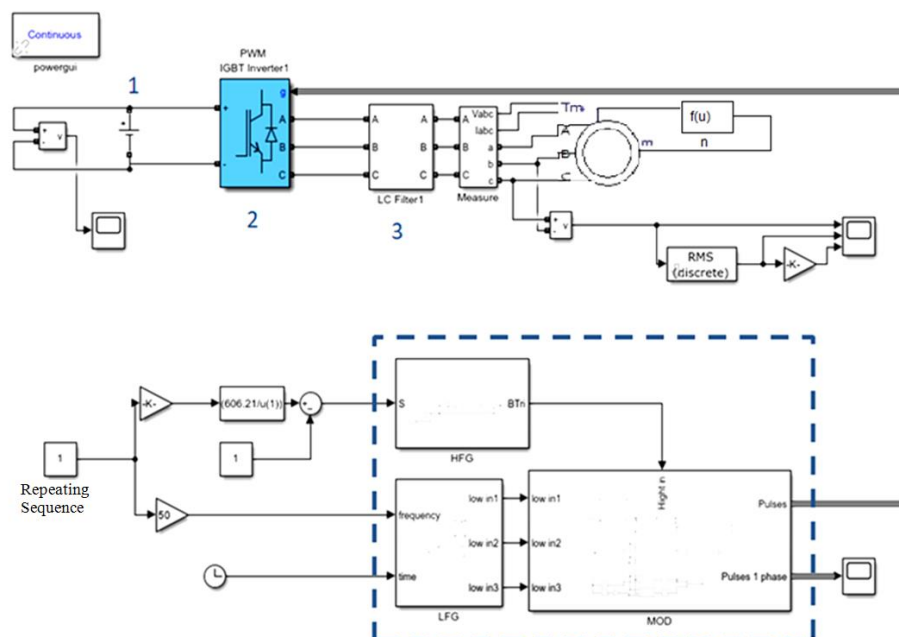


Рисунок 3 – Модель частотного электропривода с отдельным широтно-импульсным модулятором (ШИМ)

1 **Генератор несущей частоты (HFG – High Frequency Generator)** формирует пилообразный сигнал $U_{\text{гпн}}$ фиксированной частоты (в рассматриваемой модели - 2 кГц). Амплитуда напряжения $U_{\text{гпн}}$ регулируется внешним сигналом, поданным на управляющий вход S, и ограничивается блоком Dead Zone (см. Рис. 4).

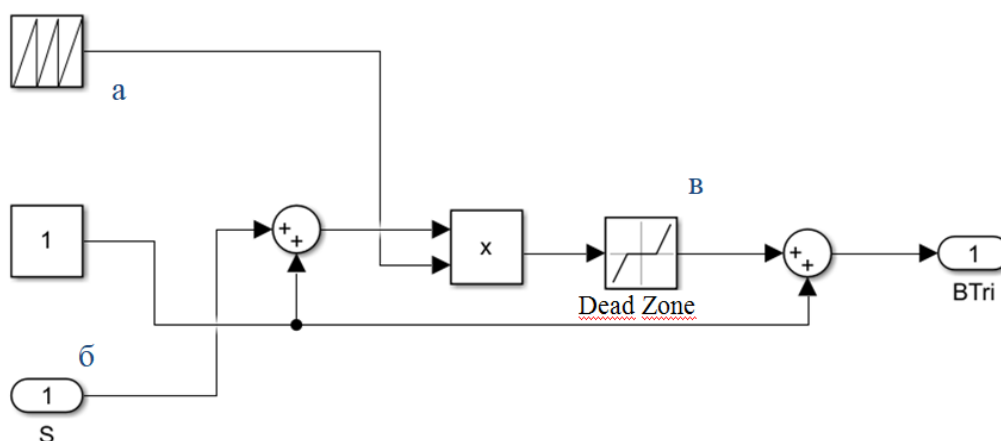


Рисунок 4 – Структурная схема генератора несущей частоты HFG

2 **Генератор модулирующей частоты (LFG – Low Frequency Generator)** генерирует трёхфазный синусоидальный сигнал U_m , частота которого регулируется в зависимости от уровня внешнего сигнала, поданного на вход frequency (см. Рис. 5).

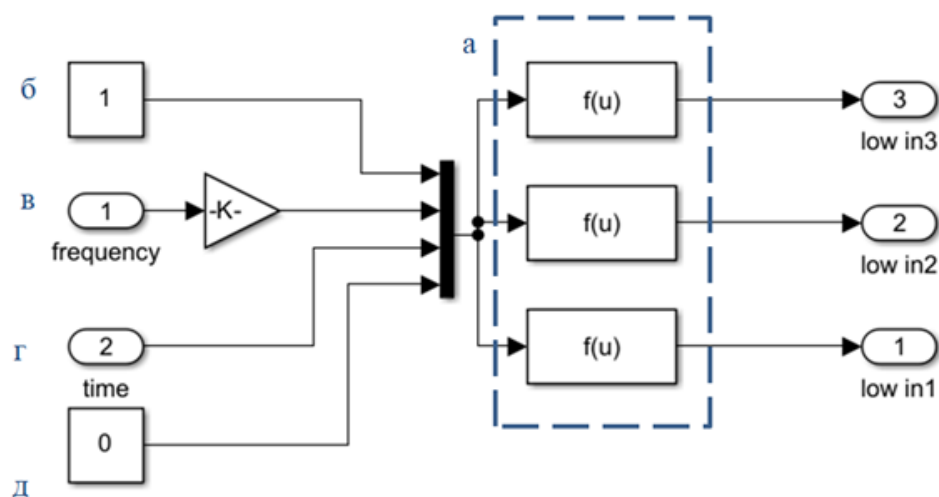


Рисунок 5 – Структурная схема блока модулирующей частоты LFG

3 **Модулятор (MOD – Modulation)** осуществляет сравнение несущего и модулирующего сигналов и формирует импульсы U_y с изменяющейся скважностью для управления силовыми ключами инвертора (см. Рис. 6). Переменная скважность сигналов достигается с помощью динамических ограничителей Dead Zone Dynamic.

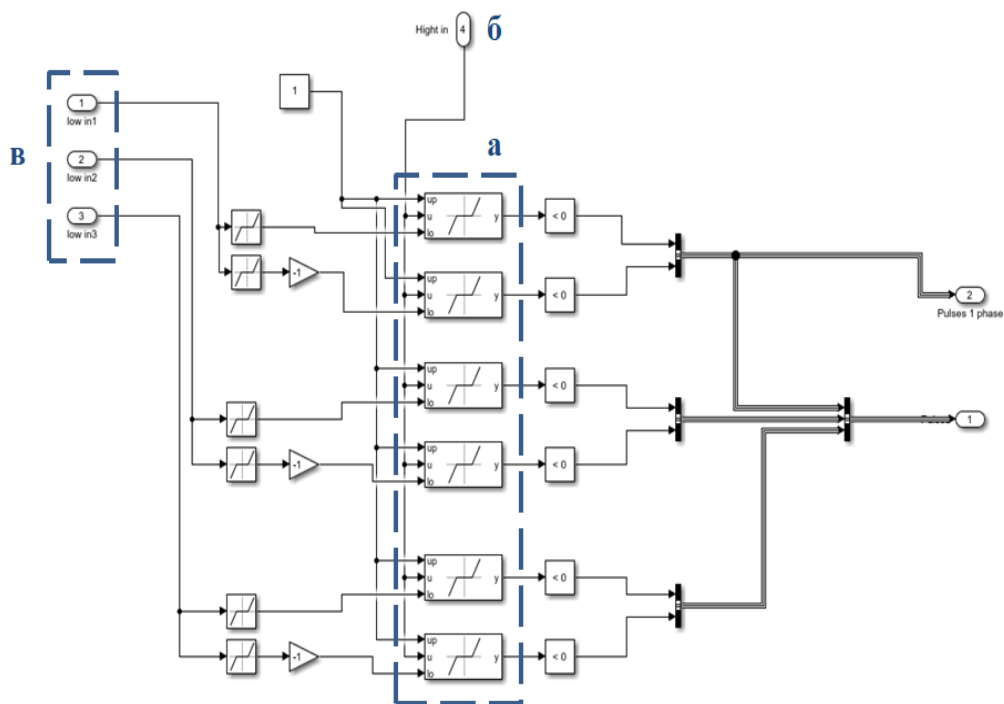


Рисунок 6 – Структурная схема модулятора MOD

На рисунке 7 представлены осциллограммы напряжений на выходах блоков HFG, LFG, MOD, соответственно. Они иллюстрируют работу инвертора по закону ШИМ модуляции.

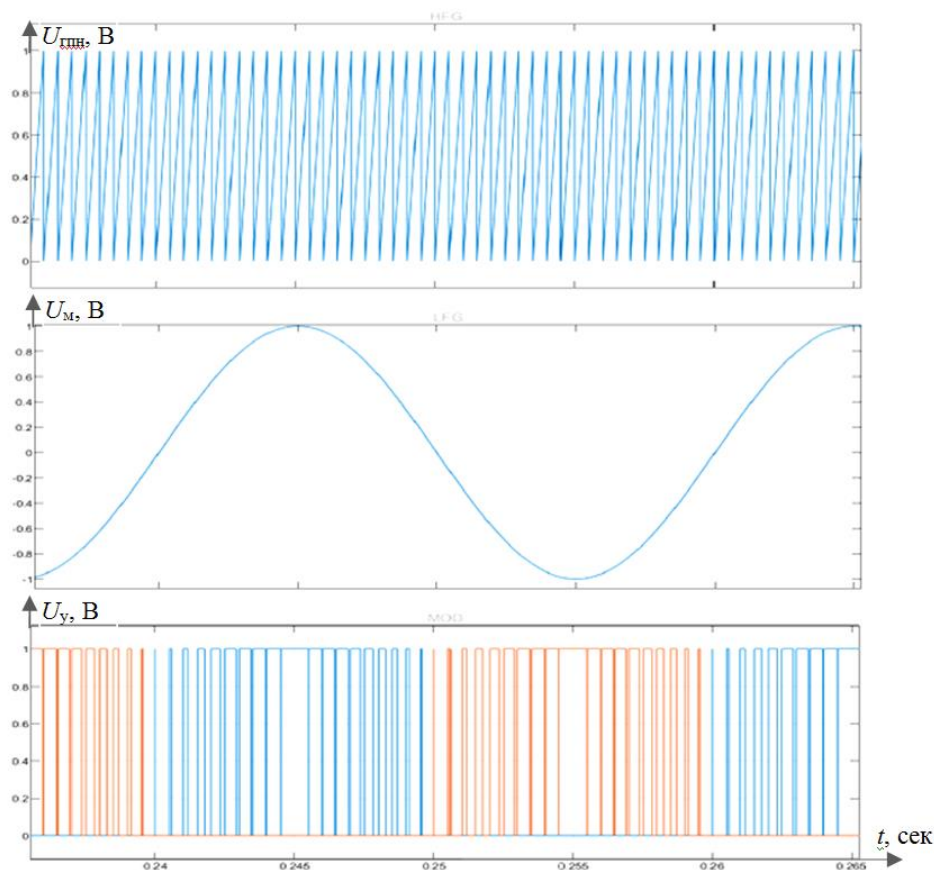


Рисунок 7 – Осциллограммы выходных сигналов блоков, составляющих ШИМ

В результате имитационного моделирования выявлено существенное влияние параметров фильтра на качество выходного напряжения при изменении частоты в диапазоне 5–50 Гц. Определена необходимость введения корректирующих звеньев в СУ для выполнения частотного регулирования, в указанном диапазоне частот, приближенного к классическим законам управления.

Заключение

Разработанная модель реализует алгоритм ШИМ для управления автономным инвертором в статических режимах работы и обеспечивает раздельное регулирование амплитуды и частоты выходного напряжения в соответствии с законами частотного управления.

Перспективным направлением развития имитационной модели ГЭУ является интеграция модели инвертора с детализированной моделью двигателя и механической нагрузкой. Такая модель позволит выполнить моделирование процессов и построить не только статические, но и динамические характеристики всей системы - «преобразователь – двигатель – рабочий орган».

Модель может быть полезна при разработке частотных электроприводов судовых механизмов различного назначения, требующих регулирования скорости вращения электродвигателя.

Список литературы:

1. Преимущества использования регулируемого электропривода в технологических процессах [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://studbooks.net/2028848/matematika_himiya_fizika/preimuschestva_ispolzovaniya_reguliruemogo_elektroprivoda_tehnologicheskikh_protssesah (дата обращения: 10.06.2026)

2. Гребные электрические установки. Учебное пособие. кол. авторов. Н.Новгород 2015 г.
3. Гибридная энергетическая установка речного прогулочного теплохода / О.А. Бурмакин, С.В. Попов, Ю.С. Малышев // Речной транспорт (XXI век). 2025. - № 4 (116).- с. 36 – 40.
4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. – 2001.
5. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК. – 2002.
6. Томашевский Д.Н. Автономные инверторы: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 120 с.

