

УДК 621.313

*Еремочкин С.Ю., доцент, д.т.н., кафедры
«Электротехника и автоматизированный электропривод»*

Алтайский государственный технический университет

им. И.И. Ползунов

Россия, г. Барнаул

Россоха Е.С. магистрант

2 курс магистратуры, кафедры

«Электротехника и автоматизированный электропривод»

Алтайский государственный технический университет

им. И.И. Ползунов

Россия, г. Барнаул

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ФИЛЬТРОВ В СИСТЕМАХ ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ИХ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

***Аннотация:** В статье рассмотрена одна из проблем внедрения частотно-регулируемого привода (далее по тексту - ЧРП) – а именно высокий уровень электромагнитных помех в выходной сети. В работе исследуется влияние выходных фильтров на качество напряжения и электромагнитную совместимость частотно-регулируемого электропривода. Рост применения частотно-регулируемых приводов в промышленности требует повышения качества выходного напряжения и снижения уровня высокочастотных помех. Улучшение эксплуатационных показателей ЧРП, таких как повышение коэффициента мощности, приближение к синусоидальной форме выходного напряжения, уменьшение электрических потерь, оказывает весомый вклад в эффективность энергосистемы в целом. Также применение выходных фильтров позволяет расширить границы применения ЧРП. В качестве примера можно привести удлинение линии питания частотный*

преобразователь-электродвигатель на значительные расстояния, при учете работоспособности ЧРП.

Ключевые слова: *электропривод, автоматизация, выходной фильтр, частотное регулирование.*

Yeremochkin S.Y., Associate Professor,

***Doctor of Technical Sciences, Department of Electrical Engineering and
Automated Electric Drive,***

Altai State Technical University named after I.I. Polzunov

Russia, Barnaul

***Rossokha E.S. Master's student 2nd year of the Master's degree,
Department of Electrical Engineering and Automated Electric Drive***

Altai State Technical University named after I.I. Polzunov

Russia, Barnaul

USE OF OUTPUT FILTERS IN HIGH-FREQUENCY ELECTRIC DRIVE SYSTEMS TO IMPROVE THEIR OPERATING CHARACTERISTICS

Abstract: *This paper investigates the application of output filters in variable frequency drive systems intended for induction motor control. The study focuses on reducing electromagnetic interference generated by pulse-width modulation at the inverter output. A simulation model of a frequency-controlled electric drive was created in the SimInTech software environment to analyze the operation of sine filters and dU/dt filters. The influence of these filters on the shape of the output voltage, suppression of high-frequency harmonics, and improvement of*

electromagnetic compatibility was examined. The simulation results indicate that the installation of output filters decreases voltage distortion, lowers thermal stress on the motor windings, and improves the operational reliability of the electric drive system, especially when long cable connections are used between the inverter and the motor.

Keywords: *variable frequency drive, induction motor, output filter, electric drive, electromagnetic interference, sine filter, dU/dt filter, pulse-width modulation, electromagnetic compatibility.*

Современные системы электропривода всё чаще используют частотное управление асинхронными двигателями, поскольку такой способ позволяет гибко изменять скорость вращения и снизить энергопотребление [1]. Несмотря на высокую энергоэффективность частотно-регулируемого привода, применение силовых полупроводниковых ключей приводит к появлению высокочастотных составляющих в выходном напряжении преобразователя. Коммутационные процессы сопровождаются резкими фронтами импульсов, вследствие чего ухудшается электромагнитная совместимость системы и увеличивается воздействие на изоляцию обмоток асинхронного двигателя [1, 2].

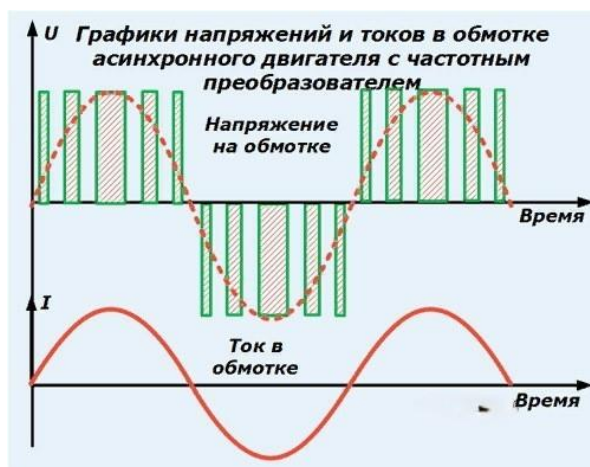


Рисунок 1 - график напряжения и тока на выходе из частотного преобразователя

На выходе преобразователя частоты формируется широтно-импульсное напряжение, содержащее высокочастотные гармонические составляющие. Несмотря на то, что среднее значение напряжения соответствует синусоидальному закону, наличие резких фронтов импульсов приводит к возникновению электромагнитных помех, повышенному нагреву обмоток двигателя и ускоренному старению изоляции [1, 2].

Высокочастотные помехи появляются как в питающей сети, так и в цепи между преобразователем частоты и асинхронным двигателем. Их возникновение связано с коммутацией силовых ключей и особенностями формирования ШИМ-сигнала. Для уменьшения негативного воздействия подобных процессов применяются различные технические решения, включая использование выходных фильтров и совершенствование алгоритмов управления преобразователем [1].

Для исследования влияния выходных фильтров была разработана имитационная модель частотно-регулируемого электропривода в среде SimInTech. В качестве объекта исследования использовался трёхфазный асинхронный двигатель типа АИР56А4. Питание электропривода осуществлялось от однофазной сети 220 В через частотный преобразователь с синусоидальной ШИМ-модуляцией. Частота коммутации силовых ключей составляла 4 кГц. Исследование проводилось для трёх режимов: без фильтра, с синус-фильтром и с фильтром dU/dt .

Напряжение на выходе преобразователей частоты, особенно в устройствах с непосредственной связью с сетью или на тиристорах, часто отклоняется от синусоидальной формы. Это вызывает дополнительные проблемы, такие как нагрев двигателя и повышенный шум при работе привода.

Для устранения этих проблем в выходной цепи преобразователя частоты применяются два основных типа фильтров:

- 1) Синусовые фильтры:

Синусоидальный фильтр представляет собой LC-цепь, устанавливаемую между преобразователем частоты и электродвигателем. Основное назначение устройства заключается в подавлении высокочастотных гармоник, возникающих при широтно-импульсной модуляции. За счёт сглаживания формы напряжения уменьшается тепловая нагрузка на статорные обмотки и снижается вероятность повреждения изоляции двигателя при длительной эксплуатации [3].

Применение: двигатели с частым рекуперативным торможением, старые электрические машины, приводы, работающие в условиях высоких температур или агрессивных сред [3].

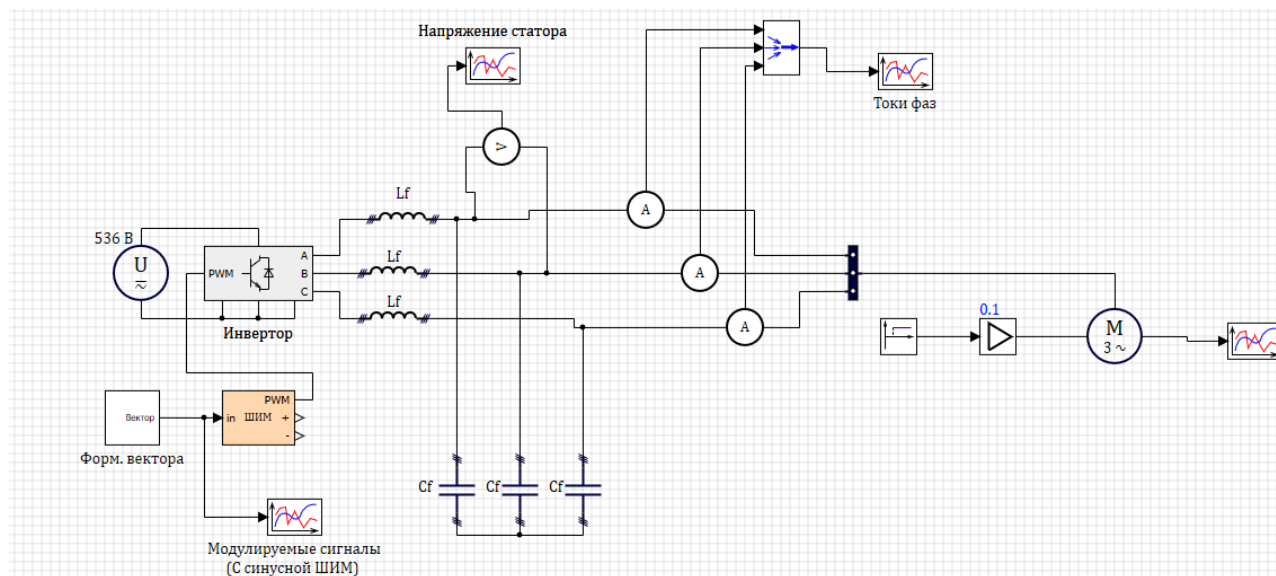


Рисунок 2 – Схема подключения синус-фильтра

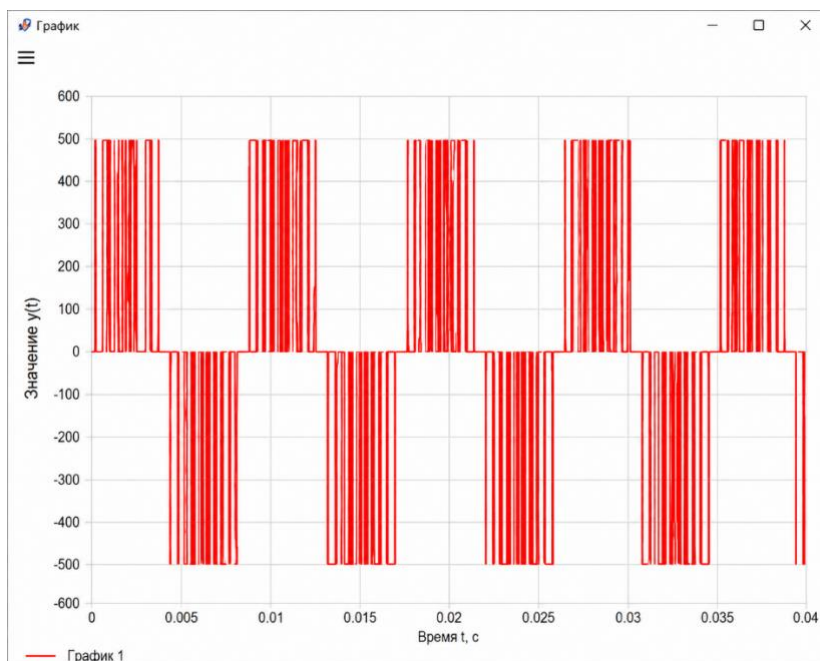


Рисунок 3 – Напряжение после ПЧ

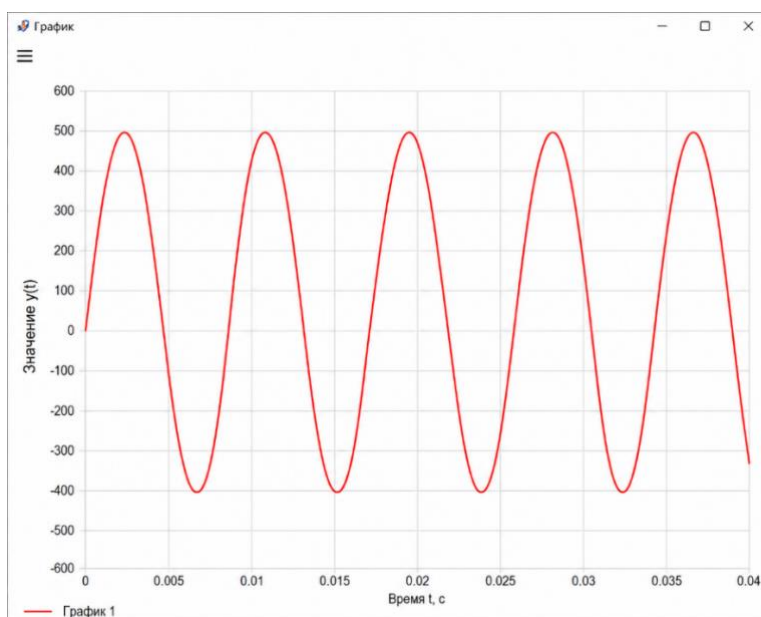


Рисунок 4 – Напряжение после синус-фильтра

Проведённое моделирование показало, что применение синус-фильтра позволяет существенно уменьшить амплитуду высокочастотных выбросов. При этом форма выходного напряжения становится близкой к синусоидальной, что положительно влияет на тепловой режим работы электродвигателя и снижает уровень акустических шумов.

2) Фильтры dU/dt :

Фильтр dU/dt предназначен для ограничения скорости изменения выходного напряжения преобразователя частоты. В отличие от синусоидального фильтра он не формирует идеальную синусоиду, однако эффективно уменьшает импульсные перенапряжения на выводах двигателя. Использование такого фильтра особенно актуально при модернизации существующих электроприводов, где требуется минимизировать воздействие ШИМ на изоляцию обмоток без значительного увеличения стоимости системы [3].

Применение: приводы на 680 В, двигатели с частым рекуперативным торможением, короткие кабели (менее 15 м).

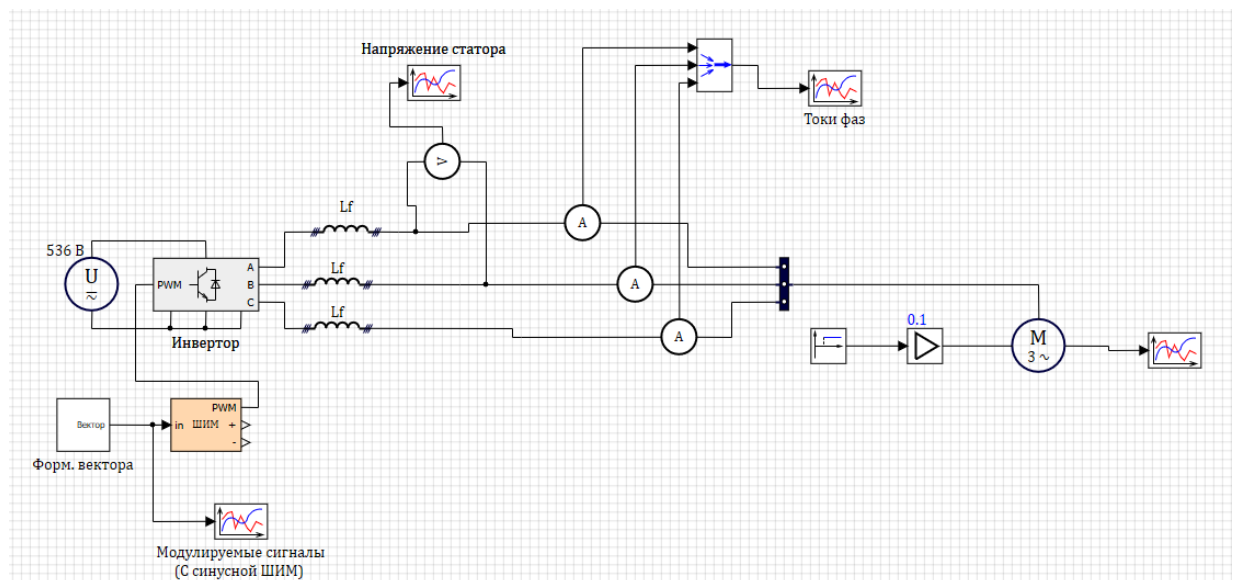


Рисунок 5 – Схема подключения dU/dt

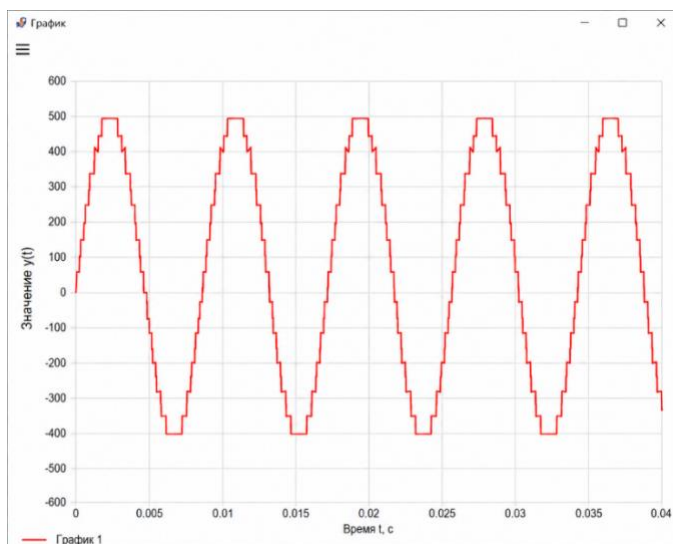


Рисунок 6 – Напряжение после фильтра dU/dt

После применения фильтра dU/dt наблюдается уменьшение скорости изменения напряжения и снижение амплитуды импульсных выбросов. Однако форма напряжения всё ещё содержит ступенчатые участки, обусловленные работой ШИМ-преобразователя.

Использование фильтров позволяет значительно улучшить работу электропривода: снизить потери в двигателе и преобразователе частоты, уменьшить нагрев и шум, а также продлить срок службы оборудования. В зависимости от конкретных условий эксплуатации (длина кабеля, тип двигателя, частота торможения и т.д.) выбирается подходящий тип фильтра. Например, синусовые фильтры подходят для сложных условий, а фильтры dU/dt — для модернизации старых систем или коротких длин кабельных линий преобразователь частоты - электродвигатель. Сравнительные характеристики различных видов фильтров приведены в таблице 1.

Синусоидальные фильтры и фильтры dU/dt решают схожую задачу — снижение негативного влияния импульсного напряжения преобразователя частоты на электродвигатель. Однако принцип их работы и эффективность различаются. Синус-фильтр обеспечивает практически полное сглаживание выходного напряжения до синусоидальной формы, тогда как фильтр dU/dt

лишь уменьшает скорость нарастания напряжения и снижает амплитуду высокочастотных выбросов.

Таблица 1

Сравнительные характеристики выходных фильтров

Параметр	Фильтр dU/dt	Синусоидальный фильтр
Воздействие на изоляцию двигателя	Снижает влияние импульсных перенапряжений и уменьшает скорость изменения напряжения на выводах двигателя	Обеспечивает практически синусоидальную форму напряжения, уменьшая нагрузку на изоляцию
Уровень высокочастотных помех	Частично уменьшает высокочастотные выбросы	Эффективно подавляет высокочастотные гармоники
Влияние на подшипниковые токи	Незначительно уменьшает вероятность возникновения подшипниковых токов	Существенно ограничивает подшипниковые токи
Допустимая длина кабельной линии	Рекомендуется использовать при небольшой длине кабеля между ПЧ и двигателем	Может применяться при значительной длине кабельной линии
Форма выходного напряжения	Сохраняются ступенчатые участки напряжения	Напряжение становится близким к синусоидальному
Стоимость и габариты	Более компактное и экономичное решение	Отличается большими размерами и более высокой стоимостью

Область применения	Модернизация существующих электроприводов, работа с короткими кабелями	Электроприводы с повышенными требованиями к качеству напряжения и ЭМС
Влияние на акустический шум	Частично снижает уровень шума	Значительно уменьшает акустические шумы двигателя

По результатам проведённого моделирования установлено, что применение выходных фильтров в системе частотно-регулируемого электропривода способствует снижению уровня высокочастотных помех и уменьшению коммутационных перенапряжений. Исследование показало, что синусоидальный фильтр обеспечивает наиболее качественное сглаживание выходного сигнала, формируя напряжение, близкое к синусоидальному.

Фильтр dU/dt , в свою очередь, не обеспечивает полного сглаживания формы напряжения, однако эффективно ограничивает скорость его нарастания и уменьшает воздействие импульсных выбросов на изоляцию двигателя. Благодаря меньшим габаритам и стоимости данный тип фильтра может применяться при модернизации существующих электроприводов.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения выходных фильтров в преобразовательной технике и показывают целесообразность их использования при эксплуатации асинхронных электроприводов с частотным управлением.

Список источников:

1. А.А. Евсиков, В. А. Коковин, А. П. Леонов. Автоматизированный электропривод с частотным управлением: учебное пособие: Дубна : Гос. ун-т «Дубна», 2020. — 121 [1] с.

2. Р.Ф. Бекишев, Ю.Н. Дементьев. Общий курс электропривода: Учебное пособие; Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 302 с.

3. Входной и выходной дроссель для частотного преобразователя [Электронный ресурс]. <https://drives.ru/stati/drossel-dlya-chastotnogo-preobrazovatelya/> (дата обращения: 08.04.25).