

УДК 621.311

Арсентьев Григорий Олегович,

аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
e-mail: arsentev\_1986@bk.ruИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО ИНВЕРТОРА  
ПРИ РАБОТЕ НА АСИНХРОННУЮ НАГРУЗКУ

Arsent'yev G.O.

IMPROVEMENT OF CHARACTERISTICS OF THE WIDE-PULSE INVERTER WHEN  
WORKING FOR ASYNCHRONOUS LOAD

**Аннотация.** Показана актуальность проблемы исследования работы инверторов в составе преобразователя частоты. Получены характеристики работы широтно-импульсного инвертора при работе на асинхронную нагрузку. По результатам исследований сделаны выводы по определению связи между формой выходного тока и тока в звене постоянного напряжения и режимом работы асинхронного двигателя. Определено, что наибольшее влияние на внутренние и выходные характеристики частотного преобразователя оказывает инвертор.

**Ключевые слова:** инвертор, широтно-импульсный модулятор, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, моделирование.

**Abstract.** The urgency of the problem of studying the operation of inverters in the frequency Converter is shown. The characteristics of the pulse-width inverter when working on an asynchronous load are obtained. According to the results of research, conclusions are made to determine the relationship between the form of output current and current in the DC voltage link and the mode of operation of the asynchronous motor. It is determined that the inverter has the greatest influence on the internal and output characteristics of the frequency Converter. the Converter has an inverter.

**Keywords:** inverter, pulse width modulator, asynchronous motor, frequency Converter, simulation.

Частотные преобразователи получили широкое распространение в электромеханических системах в качестве регулятора координат, в частности, частоты вращения ротора. Эти преобразователи имеют большие возможности и преимущества в области создания автоматизированных систем, предназначенных для управляемого преобразования электрической энергии в механическую. Такое развитие продиктовано потребностями промышленных и энергетических предприятий, заинтересованных во внедрении автоматизированных систем управления, гибком регулировании технологического процесса.

Работа преобразователей частоты (ПЧ) имеет свою специфику, связанную с их конструкцией, принципом действия, схемными решениями, элементной базой и т.д. Большое разнообразие этих устройств обусловлено широким представительством производителей, как отечественных, так и импортных, каждый из которых стремится получить свои конкурентные преимущества на рынке сбыта высокотехнологичных интеллектуальных устройств. При этом наиболее широкое распространение получила двухзвенная структура ПЧ, включающая в себя выпрямитель

(если реализована функция рекуперации - то управляемый) и инвертор.

На рис. 1 приведена структурная схема ПЧ, преобразующего входное напряжение  $U_{вх}$  с постоянными параметрами в выходное напряжение  $U_{вых}$  с регулируемыми величинами напряжения и частоты. Выпрямитель (В) формирует параметры звена постоянного тока. Инвертор (И) формирует заданные параметры выходного напряжения  $U_{вых}$  – число фаз, величину и частоту. Кроме того, в схеме обязательно присутствуют необходимые фильтрующие элементы, предназначенные для повышения (поддержания, сохранения) качества электроэнергии. При этом обязательно присутствуют фильтр звена постоянного тока (Фп), который служит для выравнивания формы, снижения пульсаций постоянного напряжения и выходной фильтр (Фвых) для улучшения формы токовой характеристики нагрузки. В зависимости от требований других потребителей, работающих в одной энергосистеме с ПЧ, могут применяться дополнительные внешние фильтрующие устройства (Фвх).

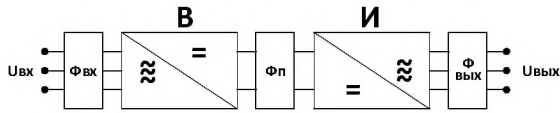


Рисунок 1 – Структурная схема ПЧ

Схема выпрямления определяется параметрами питающего напряжения  $U_{вх}$ : величиной, частотой и числом фаз. Кроме того, от схемы выпрямления зависит величина выпрямленного напряжения. Элементная база  $В$  формируется исходя из заявленных характеристик ЧП – в виде неуправляемых, частично или полно управляемых силовых полупроводниковых элементов. При необходимости, в соответствии с применяемой элементной базой, выстраивается система управления. При этом следует отметить, что  $В$  может отсутствовать в структуре ЧП, в случае питания его от постоянного напряжения.

Основным назначением  $И$  является формирование выходного напряжения, подаваемого на асинхронную нагрузку. Схемные

решения  $И$  определяются, в основном, типом силовых полупроводниковых элементов, частично или полностью управляемых соответствующими сигналами, которые формирует система управления  $И$ . Принцип работы инвертора основан на широтно-импульсной модуляции (ШИМ), формировании  $U_{вых}$  условно синусоидальной формы с помощью прямоугольных импульсов с регулируемой частотой и шириной. Такая особенность работы  $И$  влияет как на характеристики нагрузки, в частности асинхронной, так и на условия функционирования звена постоянного тока [1..2].

Для определения особенностей работы ПЧ со звеном постоянного тока были проведены модельные исследования системы. В качестве виртуальной системы моделирования использовалась широко применяемая программа MatLab [2]. Структура виртуальной модели приведена на рисунке 2.

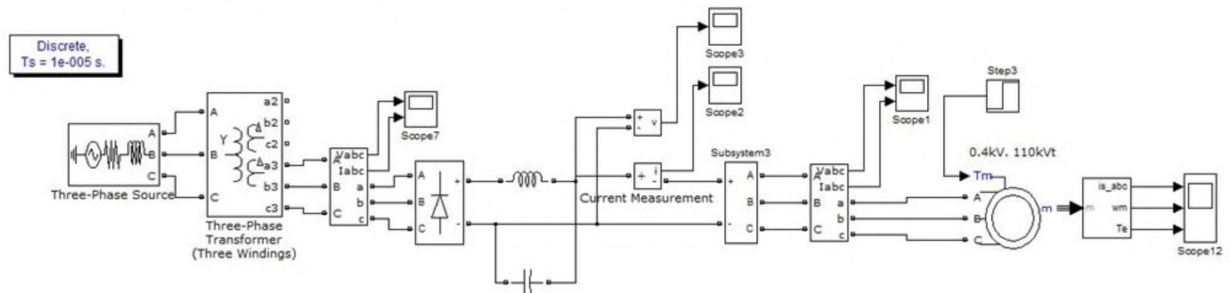


Рисунок 2 – Модель для исследования системы ПЧ-АД

Модельные исследования проводились для различных режимов работы системы ПЧ-асинхронный двигатель (АД). В качестве асинхронной нагрузки исследовался АД с короткозамкнутым ротором: 110 кВт, 220/380 В, 1500 об/мин. При определении особенностей работы системы исследовались два режима работы – холостой ход и номинальная нагрузка. На рис. 3 приведены общие результаты моделирования, характеризующие основные свойства системы.

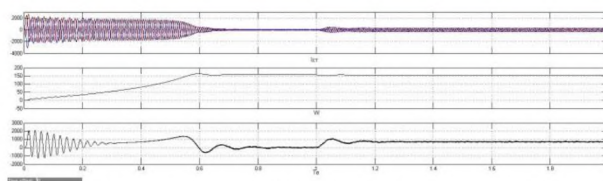


Рисунок 3 – Общие характеристики системы ПЧ-АД

Реализована модель прямого пуска АД на холостом ходу с последующей его нагрузкой (через 1 секунду) до номинального режима. Полученные результаты подтверждают адекватность виртуальной модели реальным характеристикам АД. В установившемся режиме холостого хода ток статора ( $I_{ст}$ ) составил 53 А, после нагрузки номинальным моментом 700 Н/м ( $T_m$ ) ток возрос до 300 А. При этом частота вращения ротора ( $W$ ) уменьшилась на 24 об/мин.

На рис. 4 приведены выходные характеристики системы ПЧ-АД.

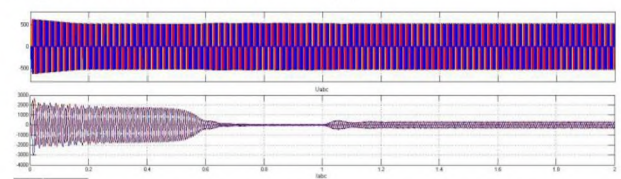


Рисунок 4 – Выходные характеристики системы ПЧ-АД



Следует обратить внимание на типичную работу инвертора в режиме ШИМ, когда основной целью формирования выходной характеристики является создание токовой зависимости синусоидальной формы. Это обосновано тем, что принцип работы АД основан на создании вращающегося магнитного поля статора, форма и гармонический спектр которого на прямую зависят от токовой синусоидальности. Чем ближе кривая распределения тока к синусоиде, тем лучше энергетические характеристики системы. Для выполнения этих условий, ШИМ формирует с помощью разно широких прямоугольных импульсов псевдо синусоиду напряжений ( $U_{abc}$ ), которая создает токи в статорной обмотке синусоидальной формы ( $I_{abc}$ ).

На рис. 5 приведены характеристики звена постоянно тока.

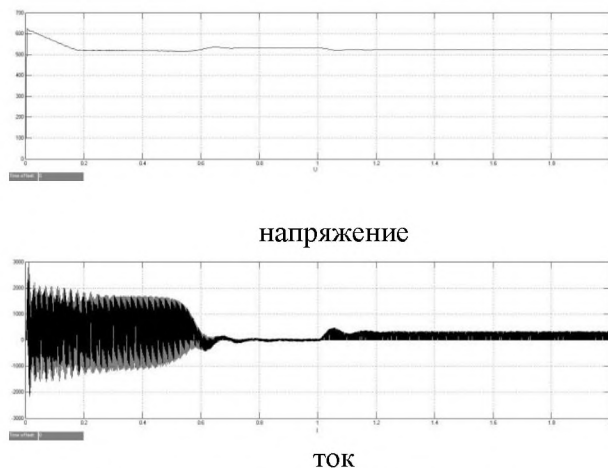


Рисунок 5 – Характеристики звена постоянного тока

Выпрямленное напряжение достаточно стабильно, пульсации практически отсутствуют. Наброс нагрузки до номинальной понизил напряжение на 18 В, и это можно объяснить увеличением падения напряжения из-за наличия внутреннего сопротивления В.

Большой интерес представляет собой токовая характеристика выпрямленного напряжения. Она имеет явные пульсационные составляющие, величина которых изменяется при изменении режима работы АД. Предварительные исследования таких характеристик на примере активно-индуктивных нагрузок показали, что прослеживается связь между видом пульсаций и параметрами нагрузки, соотношениями активной и реактивной мощностей [3].

Для более подробного рассмотрения работы ПЧ, определения взаимосвязей меж-

ду выпрямительным звеном и И, проведены модельные исследования системы ПЧ-АД в режимах холостого хода и при номинальной нагрузке. В результате исследований получены характеристики ШИП, определяющие работу И при разных нагрузках АД и изменении частоты выходного напряжения. Для выявления деталей преобразования приведены общая, 3-х фазная система инвертированного напряжения, и показана работа одной фазы И.

На рис. 6-8 представлены характеристики И в режиме холостого хода.

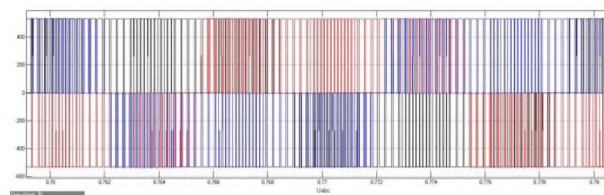


Рисунок 6 –Трехфазное напряжение инвертора при холостом ходе

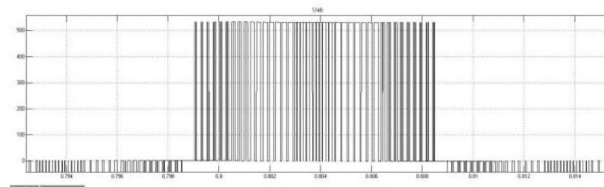


Рисунок 7 – Однофазное напряжение инвертора при холостом ходе

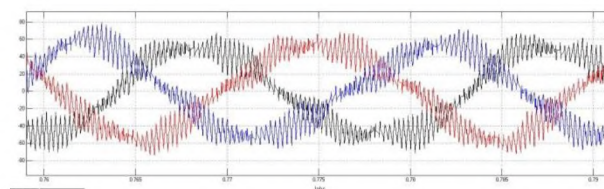


Рисунок 8 – Трехфазный ток инвертора при холостом ходе

Выходное напряжение формируется трехфазной системой прямоугольных импульсов заданной ширины (рис. 6). Амплитуда импульса номинального напряжения определяется напряжением звена постоянного тока и составляет 530 В (рис. 7). На примере однофазного напряжения хорошо прослеживается формирование псевдо синусоиды на один полупериод. Амплитудное значение тока холостого хода (рис. 8) составило 62 А. Синусоида имеет пульсационную составляющую, с шириной импульса, соответствующей работе ШИМ.

На рис. 9-11 представлены характеристики И в режиме номинальной нагрузки.

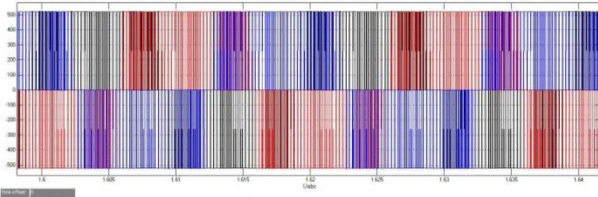


Рисунок 9 – Трехфазное напряжение инвертора при номинальной нагрузке

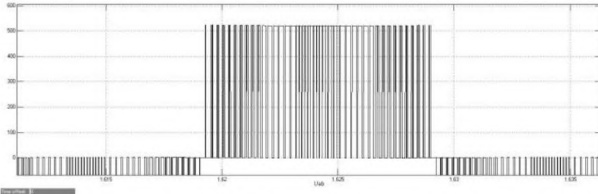


Рисунок 10 – Однофазное напряжение инвертора при номинальной нагрузке, 50 Гц

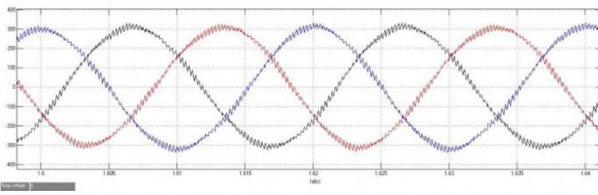


Рисунок 11 – Трехфазный ток инвертора при номинальной нагрузке

При переходе к режиму номинальной нагрузки ширина и распределение импульсов ШИМ инвертора практически не изменились (рис. 9). Это подтверждается рассмотрением работы одной фазы И. При этом напряжение импульса уменьшилось и составило 515 В, что так же подтверждается результатами измерений в звене постоянного тока. Выходная токовая характеристика (рис. 11) соответствует номинальной нагрузке (ток 300 А). Пульсации практически отсутствуют, синусоида правильная, без искажений. Это подтверждает нормальную работу инвертора, при которой его основным назначением является формирование кривой распределения тока.

Регулирование скорости вращения ротора АД осуществляется изменением частоты выходного напряжения И. На рис. 12 приведен пример однофазного напряжения, формируемого ШИМ для частоты 25 Гц.

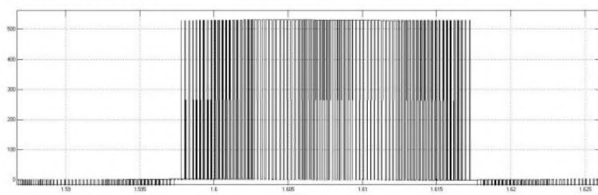


Рисунок 12 – Однофазное напряжение инвертора при номинальной нагрузке, 25 Гц

Время формирования полупериода напряжения ШИМ увеличилось в два раза за счет изменения ширины прямоугольного импульса при сохранении неизменной амплитуды напряжения, в соответствии с частичной реализацией регулирования ( $U_{\text{вых}} = \text{const}$  при  $f = \text{var}$ ).

На рис. 13 и 14 приведены токовые характеристики звена постоянного тока отдельно для исследуемых режимов

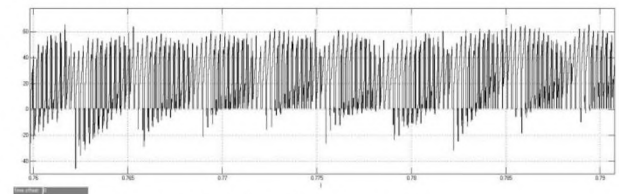


Рисунок 13 – Характеристики звена постоянного тока при холостом ходе

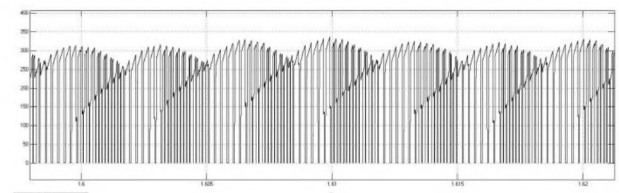


Рисунок 14 – Характеристики звена постоянного тока при номинальной нагрузке

Эти характеристики показывают, что токовые зависимости так же определяются работой ШИМ. Режим работы ключа на активно-индуктивную нагрузку объясняет связь между режимом работы АД и характером пульсаций:

- при холостом ходе (рис. 13), где преобладает потребление АД реактивной мощности, пульсации имеют отрицательные составляющие, т.к. ток за период пульсации не успевает полностью скоммутироваться и уходит в отрицательные значения;

- в режиме номинальных нагрузок АД (рис. 14) преобладает активная мощность, и токовые пульсации имеют только положительные значения.

Таким образом, проведенные исследования системы ПЧ-АД показали, что наибольшее влияние на ее характеристики оказывает работа ШИМ, формирующей синусоидальные токовые характеристики АД, и определяющей характер токовых изменений, пульсаций в звене постоянного тока. Импульсный режим работы накладывает высокочастотную составляющую на токовые характеристики.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арсентьев О.В., Коновалов Ю.В. Особенности проектирования частотно-регулируемых асинхронных двигателей: Сборник научных трудов Ангарской государственной технической академии. – Ангарск: Изд-во АГТА, 2007. - С. 90-92.
2. Арсентьев О.В. Исследование частотно-управляемой асинхронной нагрузки при физическом моделировании энергосистемы: Сборник научных трудов Ангарской государственной технической академии. – Ангарск: Изд-во АГТА, 2005. - С. 187-192.
3. Крюков А.В., Арсентьев Г.О., Арсентьев О.В. Исследование коэффициента мощности в системе преобразователь частоты - асинхронный двигатель // Повышение эффективности производства и использования эл. энергии в условиях Сибири / Мат. Всеросс. науч.-практ. конф.- Иркутск: ИРНТУ, 2016. - С.119-122.

УДК 621. 311

*к.т.н., доцент кафедры «Энергоснабжение промышленных предприятий», ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail: arsentyevov@rambler.ru*

*Арсентьев Олег Васильевич,  
магистрант ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: deneto777@gmail.com*

### АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

*Arsent'yev O.V., Dushechkin D.K.*

### AUTOMATION OF WORK OF PUMP INSTALLATIONS OF REVERSE WATER SUPPLY OF MINING AND PROCESSING WORKS

**Аннотация.** Показана актуальность проблемы автоматизации работы насосных установок. Определены особенности работы обратного водоснабжения. Приведен алгоритм расчета по выбору частотного преобразователя. Предложены схемы для включения преобразователя при работе на один двигатель и на группу двигателей через карту переключения насосов. Разработанный алгоритм автоматизации насосного оборудования повышает эффективность работы обратного водоснабжения.

**Ключевые слова:** автоматизация, насосы, преобразователь частоты, электродвигатель.

**Abstract.** The relevance of a problem of automation of work of pump installations is shown. Features of work of reverse water supply are defined. The algorithm of calculation for the choice of the frequency converter is given. Schemes for turning on of the converter during the work on one engine and on group of engines via the card of switching of pumps are offered. The developed algorithm of automation of the pump equipment increases overall performance of reverse water supply.

**Keywords:** automation, pumps, frequency converter, electric motor.

Современный горно-обогатительный комбинат – это сложное предприятие, на котором используется большое количество водных ресурсов, в рамках которого выделяют три основных системы: технологического, хозяйственно-питьевого и пожарного водопроводов.

Большая часть воды используется в технологическом процессе. Учитывая характер производства, систему технологического водоснабжения выполняют обратной, т.е. с повторным использованием воды в техно-

логическом процессе после очистки. Это позволяет существенно уменьшить отбор воды из природного источника, что в свою очередь влияет на объем водопотребления в целом по технологическому процессу, а также снизить неблагоприятное воздействие на природную среду путем снижения сброса загрязненной обработанной воды.

Однако для выполнения задач такого уровня система водоснабжения должна удовлетворять требованиям надежности, экономичности, управляемости и пр. Не-