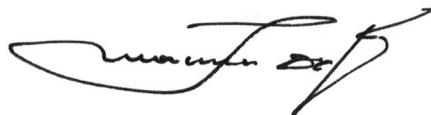


На правах рукописи

Татаринов Денис Евгеньевич



**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ С
АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

*Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и
системы*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Козярук Анатолий Евтихиевич

Официальные оппоненты:

Сеньков Алексей Петрович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», кафедра электротехники и электрооборудования судов, профессор

Воронцов Алексей Геннадьевич – кандидат технических наук, ООО «Научно-производственный центр «Судовые электротехнические системы», начальник отдела преобразовательной техники

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита состоится 25 декабря 2017 г. в 12 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 октября 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Электроэнергетические системы различных промышленных объектов представляют собой совокупность электротехнических комплексов (ЭТК), взаимосвязанных между собой процессами генерирования, преобразования и распределения электроэнергии. ЭТК с асинхронными электроприводами (ЭП) являются основными потребителями таких систем, доля которых с каждым годом постоянно увеличивается. По некоторым данным, на 2002 г. на мировом рынке из общего числа продаваемых регулируемых ЭП асинхронные ЭП составили 56 %. Тенденция роста применения асинхронных ЭП в промышленности наблюдается с 1990 г. по настоящее время.

Одной из основных проблем ЭТК с асинхронными ЭП является проблема обеспечения электромагнитной и электромеханической совместимости силовых полупроводниковых преобразователей (СПП) с оборудованием сети и асинхронными двигателями (АД).

СПП являются причиной появления высших гармоник напряжения как в энергосистеме, так и в нагрузке, оказывая негативное влияние как на работу устройств, получающих от них питание, так и на другое оборудование, работающее в одной энергосистеме с преобразователями.

Существует большое разнообразие схемных и конструктивных решений, позволяющих уменьшить влияние преобразователей на оборудование, к которым относят применение многоуровневых и многотактных схем преобразователей, применение дросселей, синусных фильтров и других типов фильтров, однако эти решения приводят к усложнению схем, увеличению массогабаритных показателей и стоимости оборудования.

Изучению вопросов обеспечения электромагнитной и электромеханической совместимости в ЭТК с СПП и АД большое внимание уделено в работах Анисимова Я.Ф., Васильева Е.П., Вершинина В.И., Загрина Э.А., Козярука А.Е., Зиновьева Г.С., Виноградова А.Б., Жежеленко И.В., Пронина М.В., Воронцова А.Г., Калачикова П.Н., Емельянова А.П., Ефимова А.А., Васильева Б.Ю., Каплина А.И., Строганова Ю., Belkhat D., Roger D., Brudny J.F., Cassoret B., Corton R. и др. Однако, несмотря на многочисленные исследования, проведенные в этой области, в существующей

литературе не уделено должного внимания вопросам оценки и снижения высокочастотных пульсаций входных токов активного выпрямителя (АВ) и пульсаций электромагнитного момента АД, питающегося от инвертора. Высокочастотные пульсации входных токов АВ и электромагнитного момента АД приводят к дополнительным потерям в оборудовании, увеличению шума дросселей преобразователя и другого оборудования, включенного в линию питания с преобразователем, увеличению вибрации двигателя, появлению резонансов в приводе и т.д.

Это обуславливает необходимость исследования пульсаций входных токов АВ и электромагнитного момента АД, вызванных работой преобразователя, и разработки алгоритмов управления преобразователем, позволяющих улучшить показатели электромагнитной и электромеханической совместимости оборудования.

Цель работы

Разработка методов и технических средств обеспечения электромагнитной и электромеханической совместимости в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе в части снижения пульсаций электромагнитного момента двигателя и входных токов системы.

Идея работы

Обеспечение электромагнитной и электромеханической совместимости в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе достигается за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления преобразователем частоты с активным выпрямителем, позволяющих снизить высокочастотные пульсации электромагнитного момента двигателя и входных токов активного выпрямителя.

Основные задачи исследований:

1. Разработать имитационную модель асинхронного ЭП, позволяющую исследовать влияние алгоритмов управления преобразователем на показатели электромагнитной и электромеханической совместимости оборудования в различных режимах работы ЭП.
2. Установить зависимости пульсаций электромагнитного момента двигателя и входных токов АВ от режима работы привода, алгоритмов управления преобразователем и их параметров.

3. Выполнить синтез системы управления асинхронным ЭП с усовершенствованными алгоритмами управления преобразователем, позволяющими снизить высокочастотные пульсации электромагнитного момента двигателя и входных токов АВ.

4. Провести экспериментальные исследования электромагнитной и электромеханической совместимости в асинхронном ЭП с усовершенствованными алгоритмами управления преобразователем.

Научная новизна:

1. Установлены зависимости пульсаций электромагнитного момента двигателя от нагрузки и частоты вращения при использовании алгоритмов управления преобразователем на основе пространственно-векторной ШИМ, позволяющие определить параметры и границы применимости алгоритмов с точки зрения энергетической эффективности и электромеханической совместимости оборудования.

2. Выявлен способ снижения уровня высокочастотных пульсаций электромагнитного момента двигателя и входных токов АВ за счет применения в алгоритмах управления преобразователем переменной частоты коммутации силовых ключей, позволяющий уменьшить уровень вибрации и шума оборудования.

3. На основе установленных зависимостей и способа разработаны алгоритмы управления преобразователем, позволяющие обеспечить снижение высокочастотных пульсаций электромагнитного момента двигателя, входных токов АВ и динамических потерь энергии в преобразователе.

Практическая ценность:

1. Разработана методика оценки уровня электромагнитной и электромеханической совместимости в асинхронном ЭП, позволяющая определить параметры алгоритмов управления преобразователем для достижения необходимых показателей совместимости оборудования.

2. Разработана система управления асинхронным ЭП с усовершенствованными алгоритмами управления преобразователем, обеспечивающая снижение высокочастотных пульсаций электромагнитного момента двигателя, входных токов АВ и динамических потерь энергии в преобразователе.

Методы исследования

Научные и практические результаты диссертационной работы получены с использованием: теории обобщенной электрической машины;

методов современной теории управления и теории электропривода; методов имитационного моделирования с использованием численного решения систем дифференциальных уравнений; методов оценки показателей электромагнитной и электромеханической совместимости средствами компьютерного моделирования; экспериментальных исследований.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена результатами вычислительных экспериментов на имитационной модели, а также экспериментальными исследованиями на электротехническом стенде завода «Электросила» ПАО «Силовые машины».

Реализация результатов работы

Разработанная в диссертации методика оценки показателей электромагнитной и электромеханической совместимости в асинхронном ЭП и усовершенствованные алгоритмы управления преобразователем частоты (ПЧ) рекомендованы к использованию при разработке и модернизации ЭТК с асинхронными ЭП в подразделении по системам автоматизации энергетических машин ПАО «Силовые машины», о чем получен акт внедрения основных результатов работы.

Личный вклад автора

Разработана методика оценки показателей электромагнитной и электромеханической совместимости в асинхронных ЭП; установлены зависимости пульсаций электромагнитного момента двигателя и входных токов АВ от режима работы привода, алгоритмов управления преобразователем и их параметров; разработана система управления асинхронным ЭП с усовершенствованными алгоритмами управления преобразователем, обеспечивающая снижение высокочастотных пульсаций электромагнитного момента двигателя, входных токов АВ и динамических потерь энергии в преобразователе; проведены экспериментальные исследования.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на 54-ой международной студенческой научно-практической конференции (г. Краков, Польша, 2013 г.), на VII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (г. Саранск, 2014 г.), на V и VI конференциях молодых специалистов инженерно-технических служб ОАО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург, 2014 г. и 2015 г.), на научных семинарах кафедры электро-

энергетики и электромеханики Санкт-Петербургского горного университета (2014-2016 гг.), на 70-ой международной молодежной научной конференции «Нефть и Газ 2016» (г. Москва, 2016 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано всего 5 печатных работ, в том числе 3 в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, приложений, изложенных на 160 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 88 наименований.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования.

В главе 1 рассмотрены структуры СПП, применяемых в системах с частотно-регулируемыми асинхронными ЭП, и проанализированы проблемы электромагнитной и электромеханической совместимости, возникающие с сетью электроснабжения и АД. Обоснована необходимость повышения электромагнитной и электромеханической совместимости в ЭТК с асинхронными ЭП в части снижения высокочастотных пульсаций входных токов АВ и электромагнитного момента АД.

В главе 2 приведена структура асинхронного ЭП на основе ПЧ с АВ и произведен выбор систем управления АВ и АД с учетом электромагнитной и электромеханической совместимости в ЭП. Выполнен сравнительный анализ алгоритмов управления преобразователем по гармоническому составу напряжения.

В главе 3 разработана имитационная модель асинхронного ЭП, позволяющая производить оценку показателей электромагнитной и электромеханической совместимости в различных режимах работы привода при различных алгоритмах управления преобразователем. Разработана система управления асинхронным ЭП с усовершенствованными алгоритмами управления ПЧ с АВ и методика выбора параметров алгоритмов управления преобразователем.

В главе 4 представлено описание макета экспериментальной установки и методики проведения экспериментальных исследований. На экспериментальной установке проверена адекватность имитационной модели электропривода и проведено исследование электромагнитной и

электрохимической совместимости в асинхронном ЭП при различных алгоритмах управления преобразователем.

Заключение отображает обобщенные выводы по результатам исследований.

По результатам выполненных исследований на защиту выносятся следующие положения:

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Применение алгоритма управления автономным инвертором напряжения с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией адаптивной структуры и переменной частотой коммутации позволяет снизить пульсации электромагнитного момента, вибрации двигателя и динамические потери энергии в преобразователе до 30 %.

При питании АД от АИН в напряжениях и токах возникают искажения, обусловленные коммутацией силовых ключей, приводящие к повышению пульсаций электромагнитного момента двигателя и появлению вибраций, что приводит к ухудшению показателей электрохимической совместимости оборудования.

Выходное напряжение АИН представляет собой высокочастотную последовательность прямоугольных импульсов, длительность которых изменяется по синусоидальному закону, а гармонический состав определяется выражением:

$$U_{\phi A} = \frac{k_M U_{DC}}{2} \sin(\omega_1 t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} U_{mM} \sin(m\omega_h t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} U_{nM} \sin(m\omega_h \pm n\omega_1)t, \quad (1)$$

где $U_{\phi A}$ – фазное напряжение на выходе преобразователя, В; k_M – коэффициент модуляции, о.е.; U_{DC} – напряжение на входе инвертора, В; $\omega_1 = 2\pi f_1$ – частота основной гармоники напряжения, рад/с; U_{mM} – амплитуды гармоник напряжения, (В), кратные несущей частоте $\omega_h = 2\pi f_h$; U_{nM} – амплитуды комбинационных гармоник, (В), частоты которых равны сумме и разности несущей и основной частоты $m\omega_h \pm n\omega_1$.

При питании электродвигателя напряжением (1), гармонические составляющие этого напряжения вызывают появление соответствующих гармоник тока и магнитного потока, которые можно представить выражениями:

$$I_{ст} = I_m \sin(\omega_1 t + \varphi) + \sum_{m=1}^{m=\infty} I_{mM} \sin(m\omega_h t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{nM} \sin(m\omega_h \pm n\omega_1)t, \quad (2)$$

$$\Psi_{\text{рот}} = \Psi_m \sin(\omega_1 t + \varphi_2) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \Psi_{mM} \sin(m\omega_n t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} \Psi_{nM} \sin(m\omega_n \pm n\omega_1)t, \quad (3)$$

где I_m , Ψ_m – амплитудные значения тока статора и потокосцепления ротора, (А, Вб); I_{mM} , Ψ_{mM} – амплитуды гармоник тока статора и потокосцепления ротора, (А, Вб), кратные несущей частоте; I_{nM} , Ψ_{nM} – амплитуды комбинационных гармоник тока статора и потокосцепления ротора, (А, Вб), частоты которых равны сумме и разности несущей и основной частоты.

В результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора в воздушном зазоре двигателя возникают электромагнитные моменты двух видов: постоянные и пульсирующие. Если взаимодействуют между собой магнитодвижущая сила тока статора и магнитный поток ротора с одним порядковым номером, то угол между ними остается постоянным, и, следовательно, электромагнитные моменты, создаваемые гармониками одного порядка, будут постоянными. Взаимодействие гармоник статора и ротора разного порядка, частота вращения и угол между которыми разные по величине и изменяются во времени, создают пульсирующие электромагнитные моменты:

$$M_{(ip)} = I_{\text{ст}(i)} \Psi_{\text{рот}(p)} \sin(\theta_{(ip)}), \quad (4)$$

где $M_{(ip)}$ – гармоническая составляющая электромагнитного момента, (Н·м), создаваемая в результате взаимодействия i -ой гармоники тока статора и p -ой гармоники потокосцепления ротора; $I_{\text{ст}(i)}$, $\Psi_{\text{рот}(p)}$ – гармонические составляющие тока статора и потокосцепления ротора, (А, Вб); $\theta_{(ip)}$ – угол между i -ой гармоникой тока статора и p -ой гармоникой потокосцепления ротора, рад.

Таким образом, пульсации электромагнитного момента определяются гармоническим составом питающего двигатель напряжения, который зависит от алгоритмов управления преобразователем и их параметров. Сравнение алгоритмов управления преобразователем по гармоническому составу напряжения (таблица 1) позволило обосновать выбор алгоритмов пространственно-векторной ШИМ (ПВ-ШИМ) т.к. при сопоставимых коэффициентах искажения по напряжению в сравнении с другими алгоритмами, применение алгоритмов ПВ-ШИМ позволяет снизить динамические потери энергии в преобразователе за счет уменьшения количества переключений силовых ключей на периоде ШИМ. Исследование электромеханической совместимости преобразо-

вателя с двигателем было выполнено для алгоритмов с шестью переключениями на периоде ШИМ (7-ПВ-ШИМ) и с четырьмя переключениями на периоде ШИМ (5-ПВ-ШИМ). Алгоритмы управления АИН реализованы в блоке формирования ШИМ (БФ ШИМ), осуществляющем формирование импульсов управления силовыми ключами инвертора (рисунок 1).

Оценка влияния алгоритмов управления инвертором на пульсации электромагнитного момента двигателя производилась в следующих режимах работы:

1. при разных значениях момента сопротивления (M_c) и номинальной частоте вращения двигателя;
2. при разных значениях частоты вращения и моменте сопротивления вентиляторного типа.

Пульсации электромагнитного момента в указанных режимах работы привода были рассчитаны для нескольких значений $f_{\text{ШИМ}}$ инвертора напряжения.

Зависимости пульсаций электромагнитного момента в режиме работы №1, представленные на рисунке 2, показывают значительное увеличение коэффициента пульсаций (k_p) и амплитуды пульсаций (M_m) при снижении величины нагрузки на валу по отношению к величине пульсаций при номинальном моменте сопротивления. При этом на более высоких частотах ШИМ пульсации момента меньше, что позволяет определить диапазон вариации частоты $f_{\text{ШИМ}}$ в зависимости от величины нагрузки, при котором величина пульсаций момента будет поддерживаться на одном уровне в широком диапазоне изменения нагрузок. Так, например, для поддержания величины пульсаций момента в пределах $2 \div 4 \%$ при изменении нагрузки в диапазоне $(0,2 \div 1)M_n$ необходимо регулировать частоту $f_{\text{ШИМ}}$ в пределах $6 \div 2$ кГц. При этом суммарные потери в преобразователе изменятся незначительно, т.к. ток, протекающий через ключи при снижении нагрузки, уменьшится.

На рисунке 3 приведено сравнение зависимостей пульсаций электромагнитного момента, полученных с использованием алгоритмов управления инвертором 5-ПВ-ШИМ и 7-ПВ-ШИМ в режиме работы привода №1 при $f_{\text{ШИМ}} = 2$ кГц, из которых видно, что уровни пульсаций момента во всем диапазоне изменения нагрузки отличаются на величину не более 5 %. При этом необходимо отметить, что алгоритм управления инвертором 5-ПВ-ШИМ обладает преимуществом по энергетиче-

ской эффективности по отношению к алгоритму 7-ПВ-ШИМ за счет меньшего количества переключений силовых ключей на периоде ШИМ, поэтому в режиме работы привода №1 целесообразно применение алгоритма 5-ПВ-ШИМ.

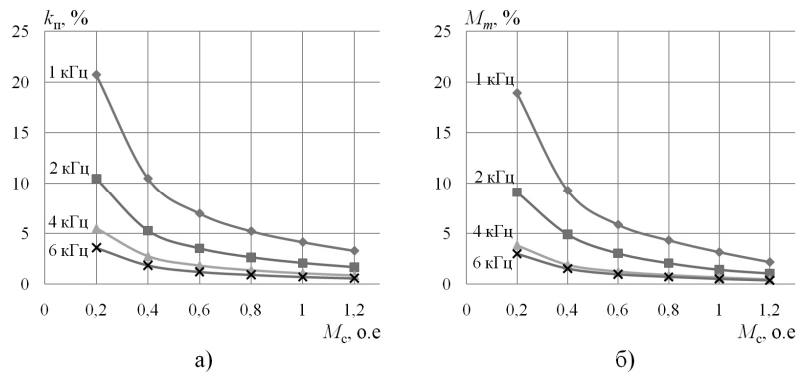


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента пульсаций электромагнитного момента (а) и амплитуды пульсаций (б) от нагрузки на валу в ЭП с алгоритмом 7-ПВ-ШИМ

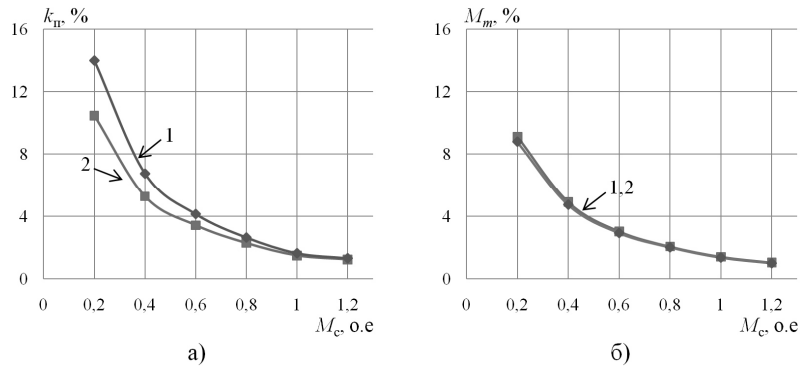


Рисунок 3 – Зависимости коэффициента пульсаций электромагнитного момента (а) и амплитуды пульсаций (б) от нагрузки на валу (где 1 – алгоритм 5-ПВ-ШИМ; 2 – алгоритм 7-ПВ-ШИМ)

На рисунке 4 представлены зависимости пульсаций электромагнитного момента двигателя, полученные с использованием алгоритмов управления инвертором 5-ПВ-ШИМ и 7-ПВ-ШИМ в режиме работы

привода №2 при $f_{\text{ШИМ}} = 2$ кГц. Сравнение приведенных зависимостей показало, что применение алгоритма 5-ПВ-ШИМ при снижении частоты вращения вызывает пульсации момента значительно большие, по сравнению с применением алгоритма 7-ПВ-ШИМ. Представленные зависимости позволяют определить диапазон частот вращения, при котором применение алгоритма управления 5-ПВ-ШИМ не приведет к значительному возрастанию пульсаций момента. Например, в диапазоне частот вращения $\omega_r = (0,7 \div 1)\omega_n$ пульсации момента, обусловленные применением исследуемых алгоритмов управления, имеют сопоставимые значения и не превышают 5 %, поэтому алгоритм управления инвертором 5-ПВ-ШИМ целесообразно применять в указанном диапазоне частот вращения ротора двигателя.

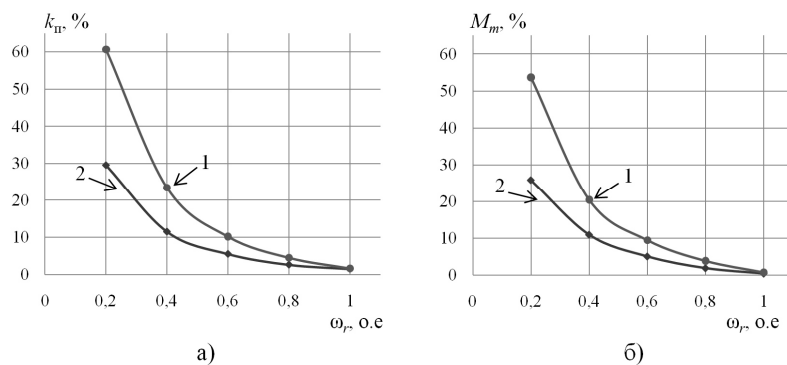


Рисунок 4 – Зависимости коэффициента пульсаций электромагнитного момента (а) и амплитуды пульсаций (б) от частоты вращения (где 1 – алгоритм 5-ПВ-ШИМ; 2 – алгоритм 7-ПВ-ШИМ)

Предложенные рекомендации по применению алгоритмов управления инвертором и обеспечению электромеханической совместимости в асинхронном ЭП, позволяют улучшить совместимость оборудования в режимах работы №1 и №2 путем поддержания коэффициента пульсаций электромагнитного момента на одном уровне в широком диапазоне изменения нагрузок.

Для улучшения уровня электромеханической совместимости в номинальном режиме работы асинхронного ЭП и дополнительного повышения уровня совместимости оборудования в режимах работы №1 и №2, предлагается применение в алгоритмах управления инвертором

переменной частоты коммутации силовых ключей, изменение которой осуществляется в системе управления инвертором в соответствии с выражениями:

$$\begin{cases} \text{если } f_{\text{ШИМ}} < f_{\min}, \text{ то } k = 1; \\ \text{если } f_{\text{ШИМ}} > f_{\max}, \text{ то } k = -1; \\ f' = 2D/T_{\text{var}}; \quad T_{\text{var}} = 1/f_{\text{var}}; \\ f_{\text{ШИМ}} = f_{\text{ШИМ},t} + k \cdot f' \cdot \Delta t; \\ f_{\min} = f_{\text{ШИМ_ср}} - \Delta f_{\max}; \\ f_{\max} = f_{\text{ШИМ_ср}} + \Delta f_{\max}; \end{cases} \quad (5)$$

где k – коэффициент, определяющий знак приращения частоты ШИМ; $f_{\text{ШИМ}}$ – частота ШИМ на текущем шаге расчетов, Гц; $f_{\text{ШИМ},t}$ – частота ШИМ на предыдущем шаге, Гц; $f_{\text{ШИМ_ср}}$ – средняя частота ШИМ, Гц; $\Delta f_{\max}$ – максимальное отклонение частоты от среднего значения, Гц; f' – приращение частоты ШИМ, Гц/с; D – диапазон изменения частоты, Гц; T_{var} – период изменения частоты ШИМ в диапазоне D , с; Δt – шаг расчета, с.

На рисунке 5 представлены осциллограммы установившегося номинального режима работы привода при использовании алгоритма управления инвертором с переменной частотой ШИМ, изменяющейся в диапазоне $D = 1,5 \div 2,5$ кГц с периодичностью $T_{\text{var}} = 1/f_{\text{var}} = 0,02$ с. Представленные осциллограммы показывают, что частота опорного напряжения на каждом шаге работы системы линейно возрастает, а при достижении уровня 2,5 кГц происходит ее постепенное снижение до уровня 1,5 кГц. Это отражается на форме опорного напряжения, а также на амплитуде высокочастотных пульсаций электромагнитного момента двигателя. Изменение частоты опорного напряжения не влияет на форму основной гармоники напряжения, тока и электромагнитного момента двигателя.

Спектральные составы электромагнитного момента двигателя, полученные при постоянной и переменной частотах ШИМ (рисунок 6), показывают снижение амплитуд высокочастотных пульсаций момента ориентировочно в 10 раз при использовании в алгоритмах управления инвертором переменной частоты ШИМ по сравнению с использованием постоянной частоты ШИМ.

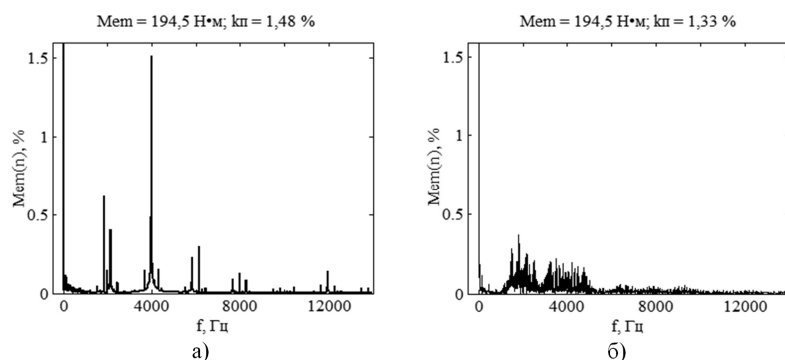


Рисунок 6 – Спектры электромагнитного момента АД при постоянной (а) и переменной (б) частотах ШИМ в алгоритме 7-ПВ-ШИМ

Экспериментальное исследование работы АД при питании от АИН производилось для алгоритмов управления инвертором с постоянной и переменной частотой ШИМ. При исследовании алгоритмов управления инвертором выполнялась оценка уровня вибрации на подшипниках двигателя в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ IEC 60034-14-2014. Макет экспериментальной установки показан на рисунке 7. На рисунке 8 представлен результат исследования алгоритмов управления инвертором с постоянной частотой ШИМ ($f_{\text{ШИМ}} = 4 \text{ кГц}$) и переменной частотой ШИМ, изменяющейся в диапазоне $D = 3,5 \div 4,5 \text{ кГц}$. Эксперимент показал снижение вибрации двигателя ориентировочно на 8 дБ в диапазоне $3 \div 8 \text{ кГц}$ при использовании алгоритма с переменной частотой ШИМ по сравнению с применением алгоритма с постоянной частотой ШИМ.

На основе проведенных исследований и полученных рекомендаций по обеспечению электромеханической совместимости в электроприводе, был предложен алгоритм управления АИН с ПВ-ШИМ адаптивной структуры (рисунок 9), предусматривающий автоматическое регулирование средней частоты ШИМ в зависимости от величины нагрузки и осуществляющий непрерывное изменение частоты ШИМ относительно среднего значения в заданном диапазоне с заданной периодичностью, применение которого позволяет снизить уровень пульсаций электромагнитного момента и вибрации двигателя, а также обеспечивает снижение динамических потерь энергии в инверторе до 30 % (рисунок 10)

за счет выбора алгоритма управления с уменьшенным количеством переключений силовых ключей на периоде ШИМ.

д. о. е.

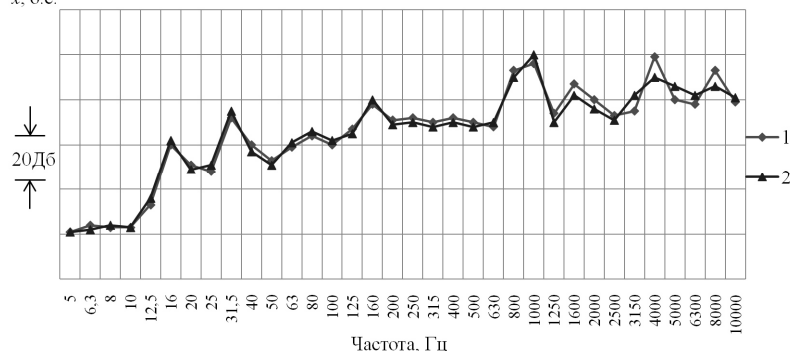


Рисунок 8 – Третьооктавные спектры виброускорений двигателя
(где 1 – алгоритм с постоянной частотой ШИМ;
2 – алгоритм с переменной частотой ШИМ)

2. Применение алгоритма управления активным выпрямителем с переменной частотой коммутации позволяет уменьшить пульсации токов и шум дросселей при сохранении известных преимуществ активного выпрямителя.

При работе преобразователя частоты с АВ во входных токах системы возникают повышенные высокочастотные пульсации которые приводят к дополнительным потерям в оборудовании, возникновению повышенного уровня шума дросселей АВ, трансформаторов и фильтров, работающих в одной линии питания с преобразователем.

Для повышения уровня электромагнитной совместимости АВ, в части снижения высокочастотных пульсаций входных токов преобразователя и уменьшения уровня шума дросселей были приняты те же меры, что и для обеспечения электромеханической совместимости инвертора с двигателем ввиду обратимости этих преобразователей. В частности, был взят способ, основанный на применении переменной частоты коммутации силовых ключей в алгоритме управления выпрямителем.

Расчет электромагнитных процессов в установившемся номинальном режиме работы АВ представлен на рисунке 11 для алгоритма управления выпрямителем с переменной частотой ШИМ, изменение

которой осуществляется в соответствии с выражениями (5) в диапазоне $D = 3,5 \div 4,5$ кГц. Представленные осциллограммы показывают, что изменение частоты ШИМ не влияет на форму основной гармоники тока и напряжения, при этом анализ спектрального состава входных токов АВ, представленный на рисунке 12б, показал уменьшение амплитуд высокочастотных пульсаций в 7 раз по отношению к алгоритму с постоянной частотой ШИМ (рисунок 12а). Применение переменной частоты ШИМ в алгоритмах управления АВ не влияет на коэффициент искажения синусоидальности напряжения и коэффициент мощности ЭП в переходных и установившихся режимах работы, что отражается на зависимостях, представленных на рисунке 13.

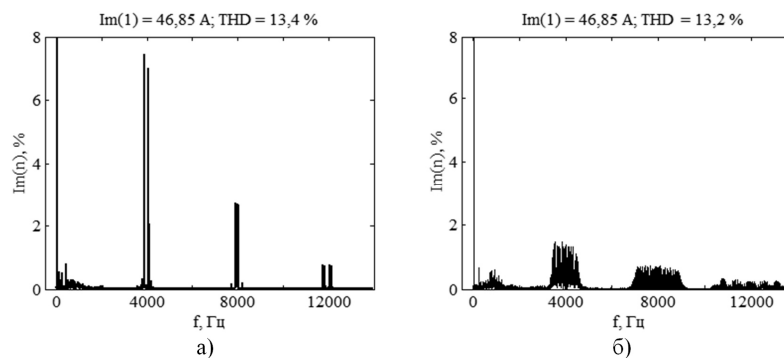


Рисунок 12 – Спектры тока АВ при алгоритме управления с постоянной частотой ШИМ (а) и переменной частотой ШИМ (б)

Экспериментальное исследование работы АВ, в результате которого производилась оценка пульсаций входных токов и уровня шума дросселей при использовании алгоритмов управления выпрямителем с постоянной частотой ШИМ ($f_{\text{ШИМ}} = 4$ кГц) и переменной частотой ШИМ, изменяющейся в диапазоне $D = 3,5 \div 4,5$ кГц, представлено на рисунках 14-16. Оценка уровня шума дросселей АВ производилась по методике, изложенной в ГОСТ Р ИСО 3744-2013. Результаты экспериментального исследования показали снижение пульсаций входного тока выпрямителя в 5 раз и уровня шума дросселей ориентировочно на 6 дБ в диапазоне $3 \div 8$ кГц при использовании алгоритма с переменной частотой ШИМ по сравнению с постоянной частотой ШИМ.

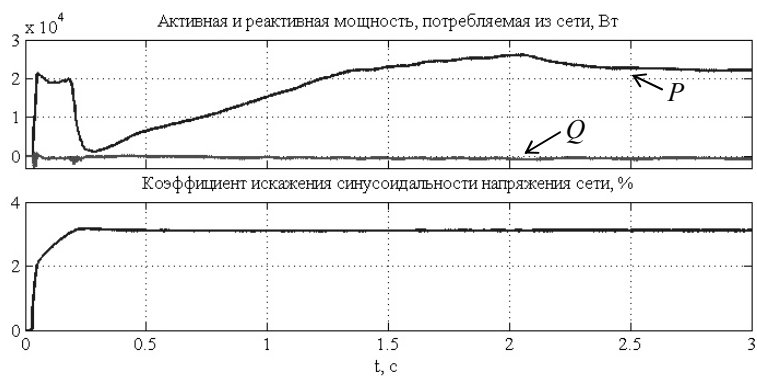


Рисунок 13 – Энергетические показатели электропривода в режиме пуска при алгоритме управления АВ с переменной частотой ШИМ

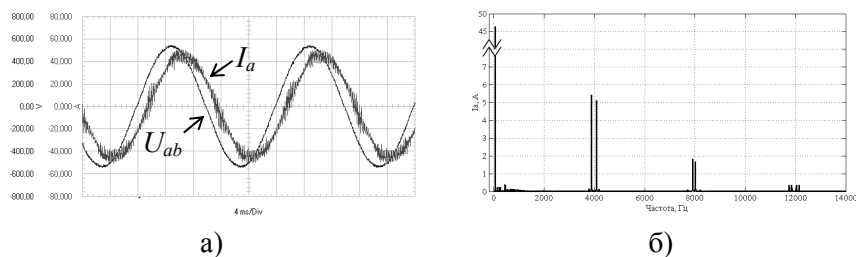


Рисунок 14 – Линейное напряжение и ток АВ (а), спектр тока (б) при использовании алгоритма управления с постоянной частотой ШИМ

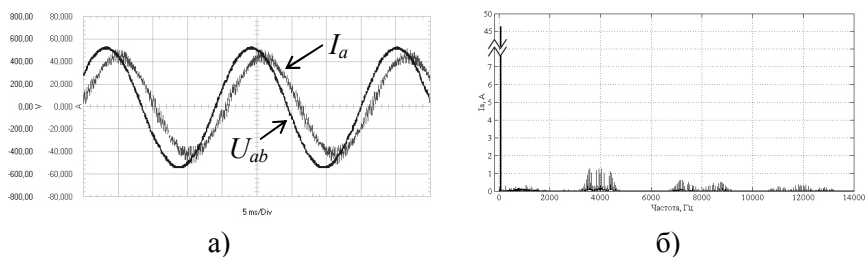


Рисунок 15 – Линейное напряжение и ток АВ (а), спектр тока (б) при использовании алгоритма управления с переменной частотой ШИМ

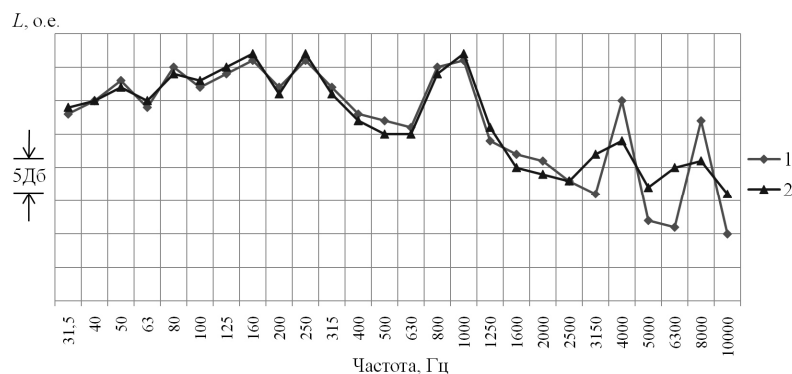


Рисунок 16 – Третьооктавные спектры воздушного шума дросселей АВ
(где 1 – алгоритм с постоянной частотой ШИМ;
2 – алгоритм с переменной частотой ШИМ)

На основе полученных результатов по повышению электромагнитной совместимости АВ с питающей сетью в систему управления ЭП введен блок задания параметров ШИМ (БЗП ШИМ АВ) (рисунок 9), предусматривающий непрерывное изменение частоты ШИМ относительно среднего значения в заданном диапазоне с заданной периодичностью, что позволяет снизить уровень пульсаций входных токов и шума дросселей выпрямителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана модель асинхронного ЭП в программной среде имитационного моделирования *Matlab*, включающая модели АВ, АИН, АД и их системы управления, позволяющая оценивать уровни пульсаций электромагнитного момента двигателя и входных токов системы в различных режимах работы привода при различных алгоритмах управления преобразователем.
2. Получены зависимости пульсаций электромагнитного момента АД от нагрузки и частоты вращения для разных значений $f_{\text{ШИМ}}$ при использовании алгоритмов управления инвертором на основе ПВ-ШИМ, позволяющие определить диапазон вариации частоты $f_{\text{ШИМ}}$, при котором коэффициент пульсаций электромагнитного момента поддерживается на необходимом уровне в широком диапазоне изменения нагрузок

и определить диапазон частот вращения, при котором обеспечивается энергетически эффективный режим работы за счет выбора алгоритма управления инвертором с уменьшенным количеством переключений силовых ключей на периоде ШИМ.

3. Установлено, что использование в алгоритмах управления преобразователем переменной частоты ШИМ позволяет снизить уровень амплитуд высокочастотных пульсаций электромагнитного момента двигателя и входных токов АВ.

4. Выполнен синтез системы управления асинхронным ЭП с усовершенствованными алгоритмами управления преобразователем, включающей в себя: 1) алгоритм управления силовыми ключами АИН с ПВ-ШИМ адаптивной структуры, предусматривающий автоматическое регулирование средней частоты ШИМ в зависимости от величины нагрузки и осуществляющий непрерывное изменение частоты ШИМ относительно среднего значения в заданном диапазоне с заданной периодичностью, позволяющий снизить уровень пульсаций электромагнитного момента, а также обеспечить снижение динамических потерь энергии в инверторе до 30 % за счет выбора алгоритма управления инвертором с уменьшенным количеством переключений силовых ключей на периоде ШИМ; 2) алгоритм управления силовыми ключами АВ, осуществляющий непрерывное изменение частоты ШИМ относительно среднего значения в заданном диапазоне с заданной периодичностью, позволяющий снизить высокочастотные пульсации входных токов системы.

5. Разработана методика оценки уровня электромагнитной и электромеханической совместимости в ЭП, позволяющая определить параметры усовершенствованных алгоритмов управления силовыми ключами АВ и АИН, при которых обеспечивается желаемый уровень совместимости оборудования.

6. Экспериментальное исследование электромеханической совместимости показало, что применение в алгоритме управления инвертором переменной частоты ШИМ позволяет снизить уровень вибрации двигателя (диапазон $3\div 8$ кГц) до 8 дБ по сравнению с применением в алгоритме управления постоянной частоты ШИМ.

7. Экспериментальное исследование электромагнитной совместимости в части высокочастотных пульсаций входных токов АВ подтвердило результаты, полученные на имитационной модели, и показало снижение амплитуды пульсаций токов в 5 раз при использовании алго-

ритма с переменной частотой ШИМ, при этом уровень шума дросселей АВ преобразовался из тонального в широкополосный с уменьшением уровня звукового давления ориентировочно на 6 дБ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Татаринов Д.Е. Обеспечение электромеханической совместимости в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах при регулировании частоты ШИМ / Д.Е. Татаринов, А.С. Григорян, И.А. Пименова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 80-86. DOI: 10.14529/power160112

2. Татаринов Д.Е. Алгоритмические методы обеспечения электромеханической совместимости асинхронных электроприводов при питании от преобразователей частоты / Д.Е. Татаринов, А.Е. Козярук // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 77-83. DOI: 10.14529/power160410

3. Татаринов Д.Е. Обоснование метода оценки адекватности модели асинхронного электропривода с векторной системой управления / Д.Е. Татаринов, Б.А. Чуркин // Естественные технические науки. – 2016. – № 12. – С. 310-317.

4. Пат. 2620129 Российская Федерация, МПК H02M 7/5395. Способ управления автономным инвертором напряжения / А.Е. Козярук, Д.Е. Татаринов, Б.Ю. Васильев // заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. - № 2016116345; заявл. 26.04.2016; опубл. 23.05.2017, Бюл. № 15 – 12 с.

В других изданиях:

5. Татаринов Д.Е. Анализ и методы обеспечения электромеханической совместимости электроприводов переменного тока // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014, Саранск. – 2014. – С. 244-247.

6. Татаринов Д.Е. Обеспечение электромеханической совместимости в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах // Сборник тезисов докладов Юбилейной 70-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и Газ 2016». Том II. – Москва: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2016. – С. 392.

Таблица 1 – Показатели качества алгоритмов управления преобразователем

Алгоритм		Коэффициент модуляции k_M , %				
		1,0	0,8	0,6	0,4	0,2
С-ШИМ	k_U , %	70,18	93,05	121,95	165,31	254,3
	$k_{Г.К}$, %	28,3	26,4	21,3	13,3	5,86
	$k_{Г.2К}$, %	13	37,8	55,6	72,8	93,2
С-ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой 13%	k_U , %	56,11	78,2	101,41	154	236
	$k_{Г.К}$, %	21,5	18,5	12	8,3	4,1
	$k_{Г.2К}$, %	10,6	31,7	48,1	61,6	85,6
С-ШИМ с треугольной предмодуляцией третьей гармоникой	k_U , %	55,29	77,39	108,3	151,24	234,8
	$k_{Г.К}$, %	19	17,3	12	7,63	3,7
	$k_{Г.2К}$, %	10,2	29	49,3	63,2	86,5
7-ПВ-ШИМ	k_U , %	55,8	78	107	149	233
	$k_{Г.К}$, %	20,5	17,8	13	7,11	3,12
	$k_{Г.2К}$, %	10,2	29	47,9	62,4	84,8
5-ПВ-ШИМ	k_U , %	52,5	77,1	106	147,75	231,5
	$k_{Г.К}$, %	17,5	29,2	49,8	68,9	74,4
	$k_{Г.2К}$, %	10,2	18,4	28,6	40	60,4

где k_M – коэффициент модуляции; k_U – коэффициент нелинейного искажения напряжения; $k_{Г.К}$, $k_{Г.2К}$ – коэффициенты первой и второй гармоник частоты ШИМ в спектре напряжения.

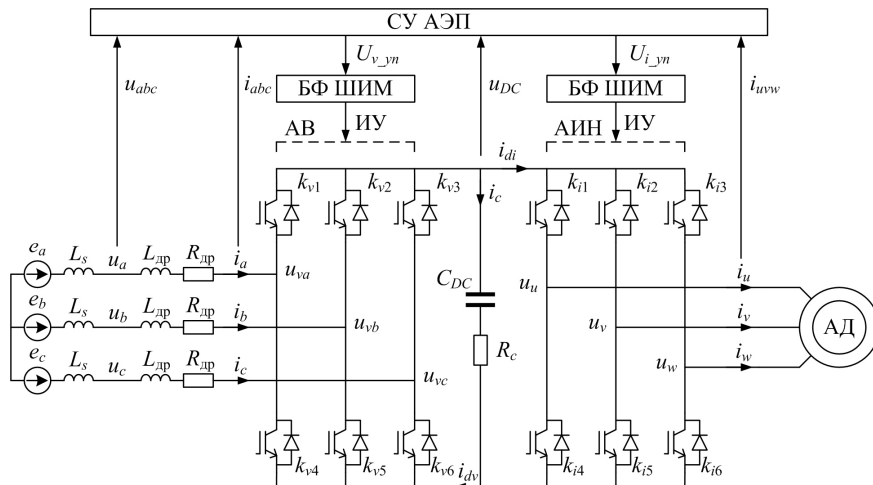


Рисунок 1 – Схема асинхронного ЭП на основе ПЧ с АВ

где e_a , e_b , e_c – трехфазная система ЭДС питания; L_s – индуктивность сети; u_a , u_b , u_c , i_a , i_b , i_c – фазные напряжения сети и токи системы; $R_{др}$, $L_{др}$ – активное сопротивление и индуктивность дросселя; u_{va} , u_{vb} , u_{vc} – фазные напряжения АВ; u_u , u_v , u_w , i_u , i_v , i_w – фазные напряжения и токи АД; БФ ШИМ – блок формирования ШИМ; ИУ – импульсы управления.

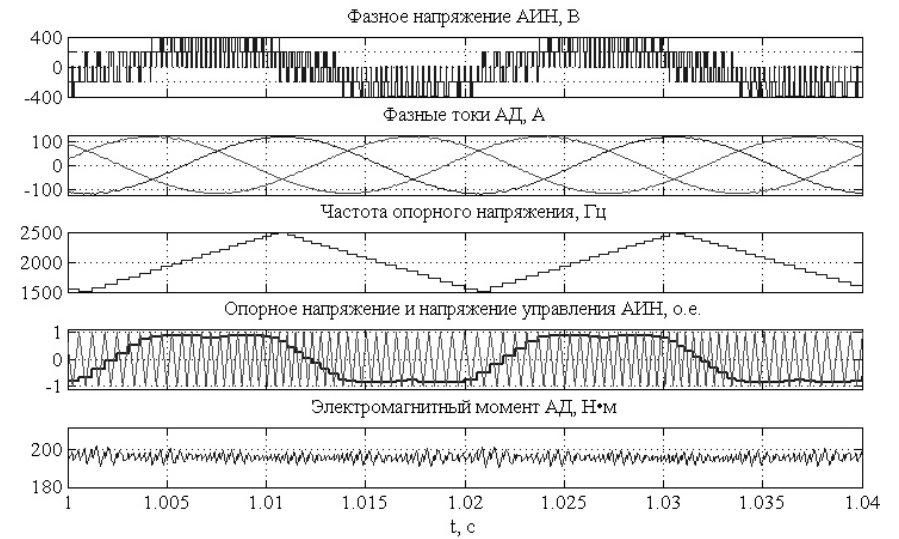


Рисунок 5 – Осциллограммы напряжения, токов и электромагнитного момента двигателя в номинальном режиме работы привода с алгоритмом 7-ПВ-ШИМ и переменной частотой коммутации

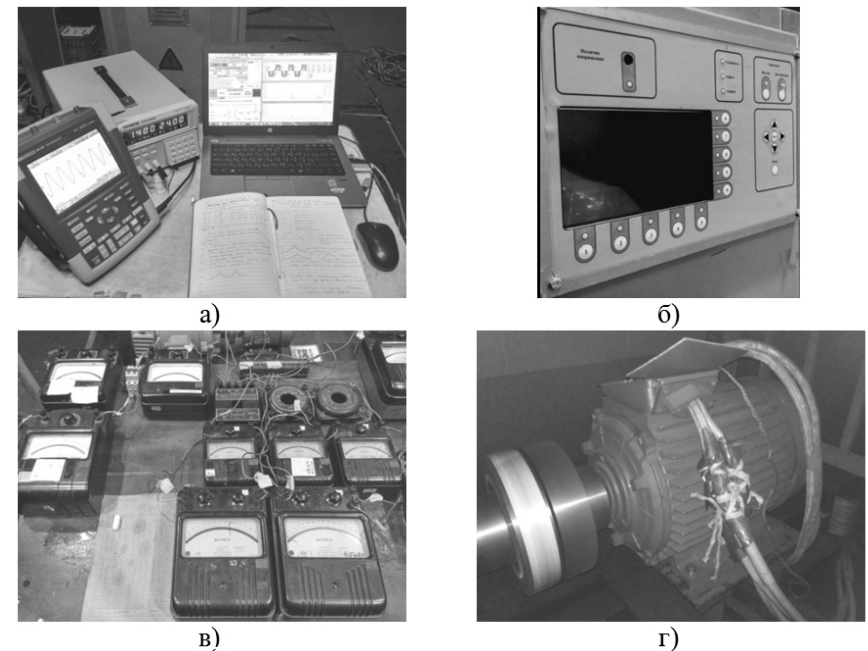


Рисунок 7 – Макет экспериментальной установки (а – ПК с осциллографом; б – лицевая панель ПЧ; в – измерительная аппаратура; г – асинхронный двигатель)

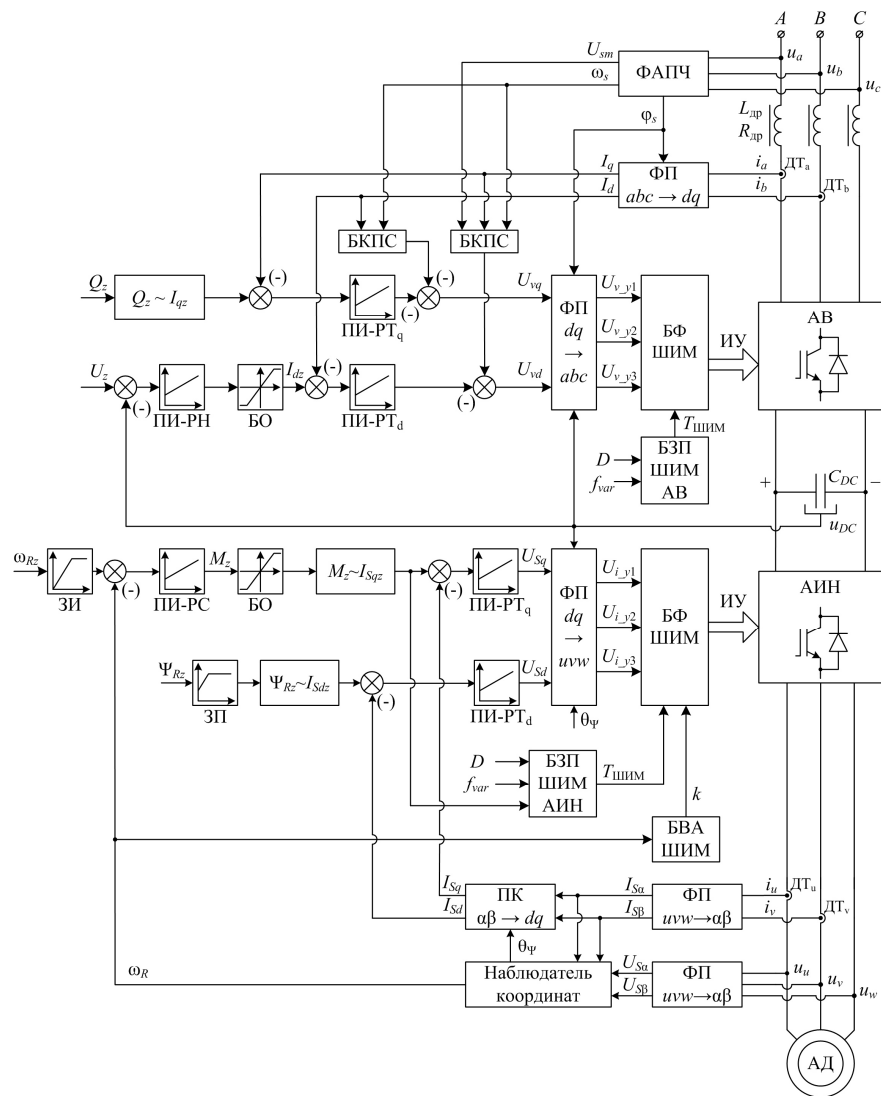


Рисунок 9 – Функциональная схема системы управления асинхронным ЭП с улучшенными показателями электромагнитной и электромеханической совместимости (где БФ ШИМ – блок формирования ШИМ; БЗП ШИМ АВ, БЗП ШИМ АИН – блоки задания параметров ШИМ активного выпрямителя и автономного инвертора; БВА ШИМ – блок выбора алгоритма ШИМ)

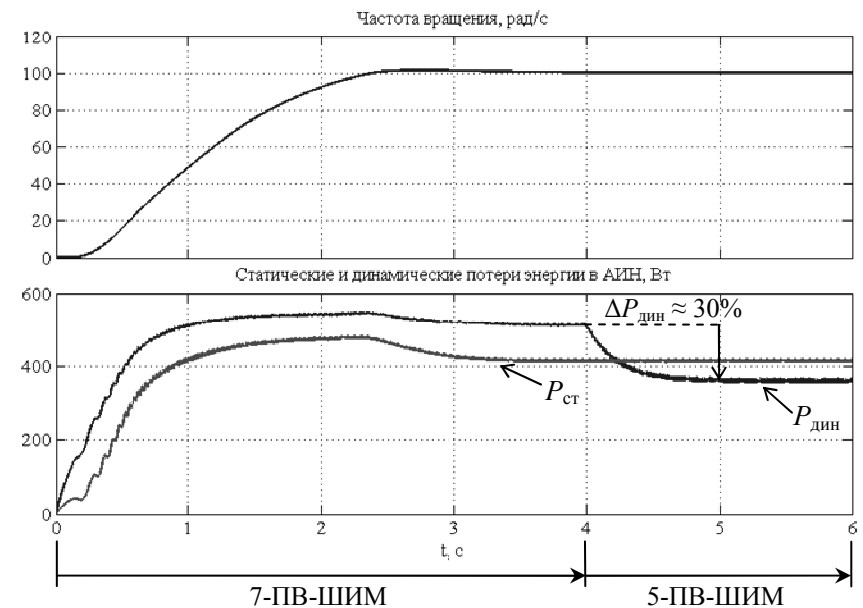


Рисунок 10 – Статические и динамические потери энергии в преобразователе при использовании алгоритма управления адаптивной структуры в режиме пуска асинхронного ЭП

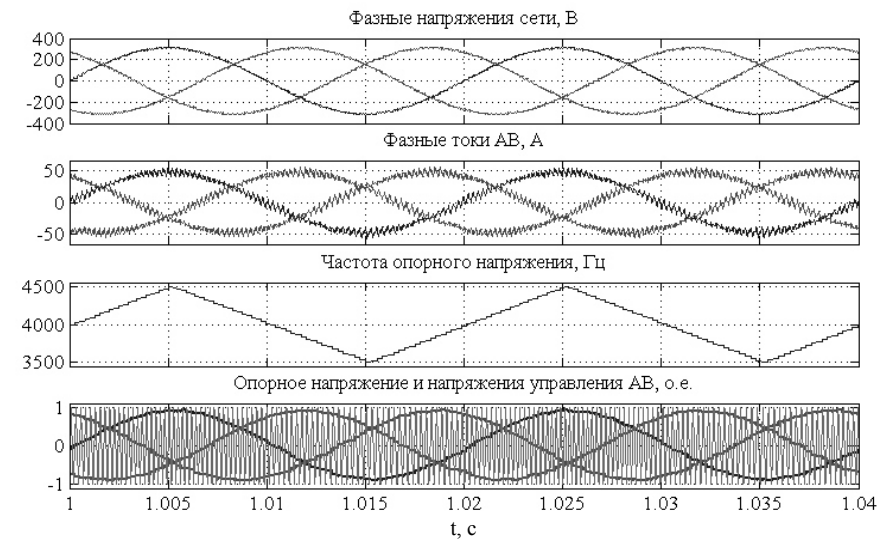


Рисунок 11 – Осциллограммы напряжений и токов АВ в номинальном режиме работы для алгоритма с переменной частотой ШИМ