

Доброскок Никита Александрович

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ШУМОВ И ВИБРАЦИЙ
В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2014

Работа выполнена на кафедре систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель Бруслиновский Борис Васильевич
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ), доцент
кафедры систем автоматического управления

Официальные оппоненты: Сеньков Алексей Петрович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО
«Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет» (СПбГМТУ),
профессор кафедры электротехники
и электрооборудования судов

Григорьев Андрей Владимирович
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО
«Государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С. О. Макарова» (ГУМРФ), доцент
кафедры судовых автоматизированных
электроэнергетических систем

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится «29» декабря 2014 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru.

Автореферат разослан 28 октября 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Белов М. П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В настоящее время регулируемый электропривод (ЭП), выполненный на базе асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором находит широкое применение во всех отраслях промышленности, включая судо- и кораблестроение. При этом одним из существенных требований к показателям работы АД в процессе эксплуатации является обеспечение минимума виброактивности и уровня излучаемого акустического шума. Это требование связано как с решением задачи снижения негативного влияния работы АД на функциональное и общее физическое состояние человека, так и задачи увеличения надежности машин вследствие уменьшения механического напряжения в вибрирующих частях машины. Кроме того, в случае использования АД в специальных системах улучшение виброакустических характеристик (ВАХ) обусловлено необходимостью обеспечения скрытности.

В настоящее время проводится большое количество научно-исследовательских работ, направленных на установление причин возникновения акустических шумов и вибраций, поиск конструктивных решений улучшения ВАХ АД, а также разработку систем управления (СУ) ЭП, позволяющих улучшить ВАХ. Работы в этой области велись и ведутся такими российскими и зарубежными исследователями, как Н. В. Астахов, В. С. Малышев, Н. Я. Овчаренко, Л. К. Волков, Р. Н. Ковалев, Г. Н. Никифорова, Е. Е. Чаадаева, К. Н. Явленский, А. К. Явленский, В. А. Воронкин, В. Я. Геча, Э. А. Городецкий, В. В. Евланов, А. Б. Захаренко, Б. И. Зубренков, А. И. Каплин, В. И. Ледовской, И. В. Складорова, Л. П. Смирнова, М. Х. Шапиро, И. Г. Шубов, A. Astfalck, D. Belkhatat, D. Roger, J. F. Brudny, A. M. Trzynadlowski, B. Cassoret, R. Corton, D. Roger, J.-F. Brudny, W. R. Finley, S. Garcia-Otero, M. Devaney, N. Hashemi, R. Lisner, D. G. Holmes, K. C. Maliti, R. Yakamini, S. C. Chang и др.

Одной из проблем проектирования регулируемого ЭП на базе АД является увеличение уровней вибрации и излучаемого акустического шума при питании АД от преобразователя частоты (ПЧ) с автономным инвертором напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Поэтому проектирование ЭП с улучшенными ВАХ необходимо производить с учетом несинусоидальности напряжения питания статора АД. Разработанные к настоящему времени схемы частотно-регулируемого ЭП рассчитываются либо по эффективному, либо по амплитудному значению первой гармоники напряжения питания АД. Влиянию высших гармонических составляющих напряжения, которые существенно изменяют уровни вибраций и излучаемого акустического шума, уделяется меньшее внимание. Следовательно, актуальным направлением улучшения ВАХ АД при эксплуатации в составе ЭП является проведение комплексного исследования работы АД при питании от АИН с учетом высших гармонических составляющих напряжения, обусловленных использованием различных алгоритмов формирования ШИМ.

Целью диссертационной работы является разработка системы управления ЭП, позволяющей минимизировать влияние несинусоидальности напряжения питания АД, получаемого от ПЧ с двухуровневым АИН, и добиться ВАХ АД, которые по своим параметрам приближались бы к ВАХ АД, получающего питание от источника синусоидального напряжения.

Для достижения поставленной цели в диссертации последовательно решаются следующие задачи

1. Анализ существующих активных методов улучшения ВАХ АД, основанных на управлении спектральными составами токов и напряжений статора АД.

2. Разработка математического описания радиальной составляющей электромагнитных вибровозмущающих сил АД, обусловленных высшими гармоническими составляющими напряжения питания, пригодного для анализа работы АД при управлении посредством изменения частоты и действующего значения напряжения, подаваемого на статор с выхода двухуровневого АИН с различными алгоритмами формирования ШИМ.

3. Анализ влияния алгоритма формирования ШИМ и его настраиваемых параметров на расширение спектра радиальной составляющей электромагнитных вибровозмущающих сил АД.

4. Исследование процессов формирования электромагнитных вибровозмущающих сил при работе АД в составе системы прямого векторного управления при ориентации по полю ротора с адаптивным наблюдателем состояния в условиях ограниченной неопределенности активного сопротивления статора.

5. Проведение экспериментальных исследований ВАХ АД, получающего питание от двухуровневого АИН с различными алгоритмами формирования ШИМ.

Методы и средства исследования. В диссертации использовались методы высшей алгебры, современной теории управления и теории электропривода, рядов и двойных рядов Фурье, функций Ляпунова, а также методы, основанные на применении теории вейвлетов. Компьютерные исследования электромагнитных процессов в АД проведены посредством моделирования в программе Matlab (Simulink), частот собственных колебаний АД – в САПР ANSYS. Экспериментальные исследования проведены на электротехническом стенде филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» с использованием программно-аппаратного комплекса регистрации переходных процессов РЭС-4 и виброанализатора СД-21.

Научные результаты, выносимые на защиту

1. Математическая модель радиальной составляющей электромагнитных вибровозмущающих сил АД при питании статора от АИН с различными алгоритмами формирования ШИМ.

2. Способ минимизации амплитуд гармоник радиальной составляющей магнитных вибровозмущающих сил.

3. Методика выбора алгоритма формирования ШИМ и его параметров для обеспечения за-

данного спектрального состава радиальной составляющей магнитных вибровозмущающих сил.

4. Комплекс программ для ЭВМ и микроконтроллеров, реализующих различные алгоритмы формирования ШИМ.

Научная новизна исследования заключается в следующем

1. Математическая модель радиальной составляющей электромагнитных вибровозмущающих сил АД при питании статора от АИН, отличающаяся тем, что учитывает спектральный состав напряжения питания статора АД для различных алгоритмов формирования ШИМ, рассчитанный на основе теории рядов Фурье и двойных рядов Фурье.

2. Способ минимизации амплитуд гармоник радиальной составляющей магнитных вибровозмущающих сил, заключающийся в минимизации намагничивающего тока за счет оптимизации сигнала задания на потокосцепление ротора в системе прямого векторного управления.

3. Методика выбора алгоритма формирования ШИМ и его параметров, отличающаяся тем, что улучшает ВАХ АД за счет максимизации расстояния между частотами собственных колебаний АД и высших гармоник радиальной составляющей магнитных вибровозмущающих сил.

4. Комплекс программ для ЭВМ и микроконтроллеров, позволяющий применить алгоритм избирательного исключения гармоник для управления АИН при исключении до 12 заданных гармоник линейного напряжения двухуровневого АИН; позволяющий реализовать вариант алгоритма формирования ШИМ, основанного на применении кратномасштабного анализа.

Теоретическая и практическая значимость работы. Проведенные исследования позволяют добиться уменьшения уровней электромагнитных шумов и вибраций АД при работе в составе частотно-регулируемого ЭП, выполненного на базе АД.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных исследований нашли применение при выполнении ОКР «Гибрид», проводимой в филиале «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «КГНЦ» в рамках Федеральной целевой программы № 1 в течение 2012-2014 г. г.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXXXI Всероссийском симпозиуме по механике и процессам управления (г. Миасс Челябинской обл., 2011 г.), заседании секции «Судовые электроэнергетические системы» НТО А.Н. Крылова (г. Санкт-Петербург, 2011 г.), четырех молодежных научно-технических конференциях «Взгляд в будущее» (ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», г. Санкт-Петербург, 2011-2014 г. г.), научно-технической конференции «Судовые единые электроэнергетические системы и гребные электрические установки» (СПбГМТУ, г. Санкт-Петербург, 2013 г.) и ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) в 2012-2014 г. г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, среди которых 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 1 работа в ма-

териалах всероссийского симпозиума, 5 работ в материалах научно-технических конференций, 1 статья в прочих изданиях. Основные положения защищены одним патентом на изобретение и четырьмя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, списка сокращений и библиографического списка. Работа изложена на 162 страницах машинописного текста, включает 93 рисунка и 17 таблиц. Библиографический список включает 75 наименований, среди которых 31 отечественное и 44 иностранных.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена цель и поставлены задачи исследования, описаны методы их решения, сформулированы научные результаты, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ причин и основных характеристик шумов и вибраций АД. Приведена классификация, согласно которой различают шумы и вибрации механического и электромагнитного происхождения, а также аэродинамический шум.

Особо выделены шумы и вибрации, вызванные вибровозмущающими силами электромагнитного происхождения ввиду возможности их целенаправленной коррекции при питании АД от АИН с ШИМ. Анализ методов коррекции вибровозмущающих сил предшествует исследованию влияния этих сил на виброактивность АД в зависимости от направления действия. Так, аксиальные силы вызывают смещение ротора по отношению к сердечнику статора, тангенциальные – создают вращающий электромагнитный момент и вызывают вибрации обмоток. Наибольшее влияние на виброактивность АД оказывают радиальные электромагнитные силы, вызывающие в широком спектре частот изгибные колебания корпуса АД. Поэтому далее в диссертации преимущественно рассматриваются электромагнитные вибровозмущающие силы, действующие в радиальном направлении. Эти силы пропорциональны квадрату индукции электромагнитного поля в воздушном зазоре АД и определяются по общеизвестному выражению

$$f_r(\alpha, t) = \frac{B^2(\alpha, t)}{2\mu_0}, \quad (1)$$

где $B(\alpha, t)$ – мгновенное значение магнитной индукции в воздушном зазоре в точке с координатой α в момент времени t , Тл; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м.

Далее проведен анализ существующих методов улучшения ВАХ АД на основе целенаправленной коррекции спектра напряжения на выходе АИН, а значит, и спектра вибровозмущающих сил АД. Такая коррекция может быть осуществлена для реализации несколькими способами, из которых наиболее перспективны два. Первый – инжекция дополнительной гармоники заданной амплитуды, частоты и начальной фазы в спектр тока статора АД. Параметры вводи-

мой гармоники рассчитываются так, что в результате интерференции порожденной ею составляющей вибровозмущающей силы с уже существующей гармоникой вибровозмущающей силы, вызывающей, например, наибольший уровень излучаемого акустического шума, происходит их взаимоподавление. Таким образом, можно значительно уменьшить уровень акустического шума и вибраций на определенной частоте. Однако такая стратегия имеет ограниченный диапазон применения и не эффективна для АД с двумя парами полюсов. Вторая стратегия заключается в коррекции спектрального состава напряжения на выходе АИН таким образом, чтобы частоты гармоник вибровозмущающих сил, индуцированные несинусоидальностью напряжения питания статора, не накладывались на частоты собственных колебаний конструкции АД. Так избегают резонансных явлений, способствующих резкому возрастанию уровней шумов и вибраций.

Вторая глава посвящена вопросам математического описания и моделирования магнитных вибраций АД. Приведена методика расчета пространственно-временного распределения радиальной составляющей магнитных вибровозмущающих сил вдоль воздушного зазора АД при произвольной форме напряжения питания. Существенной частью этой методики является расчет пространственно-временного распределения радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре при односторонней зубчатости, выполненный в диссертационной работе на основе метода гармонических проводимостей

$$B(\alpha, t) = \frac{\mu_0}{\delta_0 k_\delta k_{\text{нас}}} \left[\sum_{g=1}^{g_1} \sum_{v=1}^{v_1} \sum_{\rho=0}^n F_{1mgv}(v, k_{\text{обv}}, I_{1g}) \frac{\lambda_\rho h\left(\frac{\rho}{n}\right)}{2} \cos(r_{1v}\alpha - g\omega_1 t - \varphi_{1gv}) + \sum_{g=1}^{g_1} \sum_{\mu=1}^{\mu_1} \sum_{\rho=0}^n F_{2mg\mu}(\mu, k_{\text{об}\mu}, k_{\text{ск}\mu}, I_{2g}') \frac{\lambda_\rho h\left(\frac{\rho}{n}\right)}{2} \cos(r_{2\mu}\alpha - \omega_{2g\mu} t - \varphi_{2g\mu}) \right], \quad (2)$$

где $F_{1mgv}(v, k_{\text{обv}}, I_{1g})$ и $F_{2mg\mu}(\mu, k_{\text{об}\mu}, k_{\text{ск}\mu}, I_{2g}')$ – амплитудные значения v -й гармоники МДС статора и μ -й гармоники МДС ротора, зависящие от порядкового номера гармоники, обмоточного коэффициента и коэффициента скоса пазов ротора для высших гармоник, а также амплитудного значения g -й гармоники тока статора и приведенного тока ротора соответственно, А; λ_ρ – амплитуда ρ -й гармоники магнитной проводимости воздушного зазора, Гн; g_1, v_1, μ_1 и n – число высших гармоник тока статора, магнитной индукции, созданных статорной и роторной обмотками, число гармоник проводимости воздушного зазора соответственно, используемых при разложении в ряд Фурье; k_δ и $k_{\text{нас}}$ – коэффициент Картера и коэффициент насыщения магнитной цепи; $h(\rho/n)$ – множитель Бартлетта; ω_1 и $\omega_{2g\mu}$ – частота основной гармоники сети и μ -й гармоники МДС ротора, рад/с; φ_{1gv} и $\varphi_{2g\mu}$ – фазовый угол v -й гармоники МДС статора и μ -й гармоники

МДС ротора соответственно, рад; r_{1v} и $r_{2\mu}$ – порядки гармоник пространственного распределения электромагнитной индукции.

Радиальная составляющая электромагнитных вибровозмущающих сил вычисляется согласно выражению (1) с учетом (2). В качестве примера приведен расчет пространственно-временного распределения удельных вибровозмущающих сил в воздушном зазоре АД типа 4ДМШ мощностью 55 кВт при синусоидальном и ступенчато-прямоугольном напряжении питания с номинальным действующим значением. Результаты расчета при взаимодействии главных гармоник основного поля статора и ротора показаны на рисунке 1, а и б соответственно.

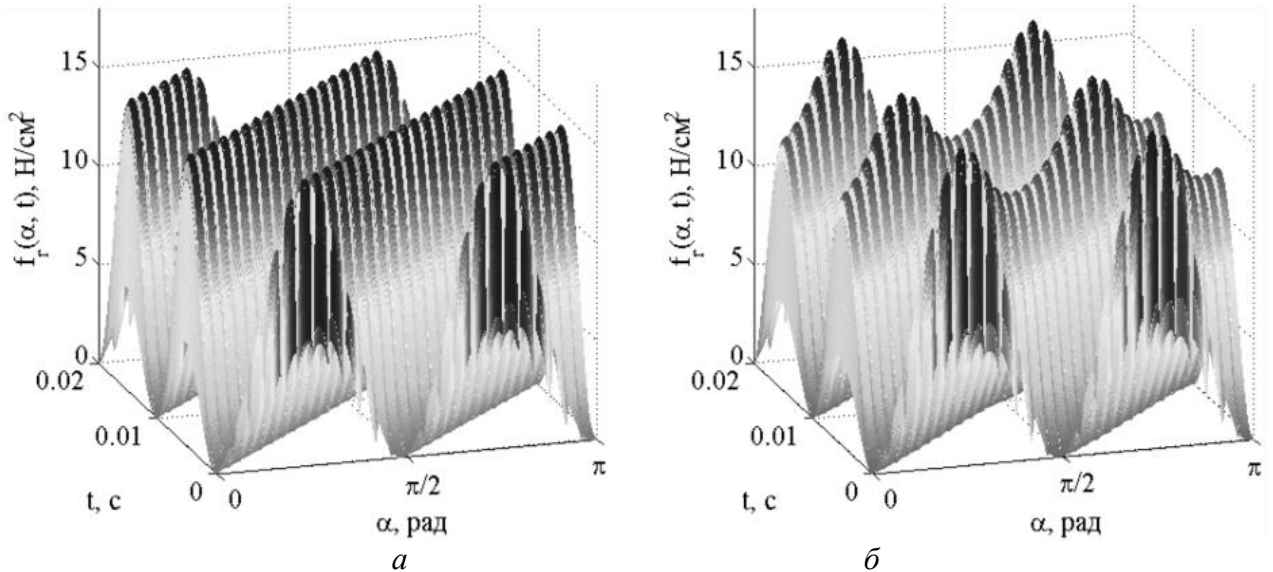


Рисунок 1 – Пространственно-временное распределение вибровозмущающих сил

Далее приведен расчет скорости колебаний точек на поверхности корпуса АД методом электромеханических аналогий

$$\dot{y} = \frac{f_{rmg} \cdot R_i / R_c}{z_c}, \quad (3)$$

где z_c – полное механическое сопротивление статора с учетом сопротивления корпуса, рассчитанное для частоты ω_g удельных вибровозмущающих сил с амплитудой f_{rmg} , $\text{H} \cdot \text{с/м}$; R_i и R_c – радиус расточки и средний радиус спинки статора соответственно, м.

Дополнительно проведен расчет частот собственных колебаний статора АД на основе метода конечных элементов с учетом предварительных напряжений конструкции АД в программном комплексе ANSYS по детализированной 3D-сборке, выполненной в системе трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического моделирования Autodesk Inventor, приведенной на рисунке 2.

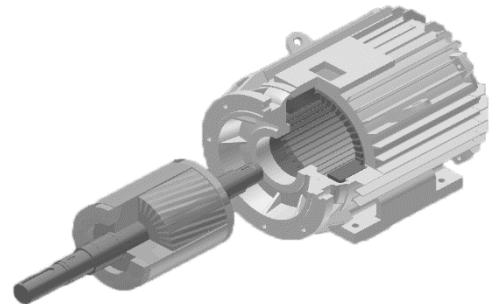


Рисунок 2 - Детализированная 3D-сборка АД типа 4ДМШ

На основании вычисленных частот собственных колебаний АД в заданном режиме работы может быть произведена оценка минимально допустимого расстояния между частотами собственных колебаний АД и частотами вибровозмущающих сил, при котором не происходит значительного возрастания уровней вибраций. В работе такая оценка произведена на основании известного выражения, определяющего коэффициент резонансного усиления и равного

$$\eta_{\text{рез}} = \left(\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_g / (2\pi)}{f_{\text{рез}i}} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{2\zeta \omega_g / (2\pi)}{f_{\text{рез}i}} \right)^2} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где $f_{\text{рез}i}$ – i -я частота собственных колебаний статора АД, Гц; ζ – коэффициент, определяющий демпфирующие свойства материала статора.

Проведенные исследования свидетельствуют о существенном влиянии формы напряжения питания статора АД как на спектральный состав, так и на значения уровней вибраций на поверхности статора АД.

В третьей главе рассмотрена возможность минимизации влияния несинусоидальности напряжения питания АД на расширение спектра вибровозмущающих сил за счет соответствующего выбора алгоритма формирования ШИМ на выходе АИН. Приведены алгоритмы формирования ШИМ, адаптированные для реализации в системе векторного управления АД: скалярная синусоидальная ШИМ; векторная симметричная ШИМ; ШИМ на основе избирательного исключения гармоник; ШИМ на основе кратномасштабного анализа. Не рассматриваются методы формирования ШИМ с релейно-гистерезисными регуляторами тока.

Для каждого из четырех алгоритмов формирования ШИМ проведен вывод аналитического описания спектрального состава выходного напряжения АИН, что обусловлено необходимостью поиска алгоритма (и соответствующих ему параметров), при котором обеспечиваются наименьшие уровни вибраций статора АД. В случае использования скалярной синусоидальной ШИМ и векторной симметричной ШИМ аналитическое описание формы линейного напряжения построено на основе теории двойных рядов Фурье, согласно которой периодическая функция от двух аргументов может быть записана как

$$f(x, y) = \frac{A_{00}}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_{0n} \cos ny + B_{0n} \sin ny) + \sum_{m=1}^{\infty} (A_{m0} \cos mx + B_{m0} \sin mx) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=-\infty \\ (n \neq 0)}}^{\infty} (A_{mn} \cos(mx + ny) + B_{mn} \sin(mx + ny)), \quad (5)$$

где коэффициенты разложения в двойной ряд Фурье, записанные в комплексной форме

$$\overline{C_{mn}} = A_{mn} + jB_{mn} = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x, y) e^{j(mx+ny)} dx dy. \quad (6)$$

В частности, для скалярной синусоидальной ШИМ описание (5) принимает следующий вид

$$u_{AB}(t) = \sqrt{3}U_d M \cos\left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{8U_d}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{m} J_n\left(m \frac{\pi}{2} M\right) \sin\left((m+n)\frac{\pi}{2}\right) \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right) \cos\left(m\omega_{\text{нec}} t + n\left[\omega t - \frac{\pi}{3}\right] + \frac{\pi}{2}\right), \quad (7)$$

где U_d – половина действующего значения выпрямленного напряжения на входе АИН, В; M – коэффициент модуляции; $J_n(\cdot)$ – функция Бесселя первого рода порядка n . Аналогичное, но более сложное, выражение получено и для случая векторной симметричной ШИМ.

Анализ влияния скалярной синусоидальной и векторной симметричной ШИМ на уровни вибраций АД при работе в номинальном режиме показал ухудшение ВАХ. Поэтому была рассмотрена возможность уменьшения этого влияния за счет использования трех алгоритмов формирования ШИМ. Первый заключается во введении изменяющихся параметров в алгоритм векторной симметричной ШИМ. В качестве таких параметров приняты частота ШИМ и порядок коммутации силовых ключей при формировании заданного вектора напряжения.

Второй алгоритм формирования ШИМ позволяет получать напряжение на выходе АИН заданного гармонического состава за счет соответствующего расчета электрических углов открытия и закрытия силовых ключей. Расчет производится на основании разложения выходного фазного напряжения АИН в ряд Фурье. При двухполярной ШИМ и выполнении условий симметричности фазное напряжение принимает вид

$$u_{A0}(\omega t) = -\frac{4U_d}{\pi} \sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega_1 t)}{n} \left(1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \cos(n\theta_i)\right), \quad (8)$$

где i – количество электрических углов открытия и закрытия θ_i силовых ключей, формирующих напряжение на первой четверти периода. Анализ выражения (8) позволяет производить расчет величин электрических углов θ_i , исключая некоторое число гармоник из спектра напряжения u_{A0} . Например, для формирования напряжения с заданным значением амплитуды первой гармоники и исключением следующих k отличных от нуля гармоник, необходимо вычислить $k+1$ электрических углов, которые находятся из решения системы уравнений

$$\begin{cases} 1 - 2 \cdot \cos(\theta_1) + 2 \cdot \cos(\theta_2) + \dots + 2 \cdot (-1)^{k+1} \cos(\theta_{k+1}) = -M \\ 1 - 2 \cdot \cos(5 \cdot \theta_1) + 2 \cdot \cos(5 \cdot \theta_2) + \dots + 2 \cdot (-1)^{k+1} \cos(5 \cdot \theta_{k+1}) = 0 \\ \dots \\ 1 - 2 \cdot \cos(g \cdot \theta_1) + 2 \cdot \cos(g \cdot \theta_2) + \dots + 2 \cdot (-1)^{k+1} \cos(g \cdot \theta_{k+1}) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где $g = 6k + (-1)^{k+1}$ – номер последней исключаемой гармоники. В диссертации приведена методика решения системы тригонометрических уравнений (9), сводящая задачу к решению системы полиномиальных уравнений на основе теории исключения и позволяющая вычислить вплоть до 13 электрических углов, обеспечивающих исключение 12 гармоник.

Третий алгоритм формирования ШИМ основан на кратномасштабном анализе. Идея алгоритма заключается в двойном преобразовании трехфазной системы опорных синусоидальных напряжений, аналогичной используемой при формировании скалярной синусоидальной ШИМ. Сначала осуществляется разложение системы опорных напряжений по ортогональному базису с использованием специальной вейвлет-функции, порожденной масштабирующей функцией вейвлета Хаара. При этом разложение выполнено таким образом, что оно является неравномерной дискретизацией системы опорных напряжений. Затем по полученному разложению осуществляется восстановление синусоидальных напряжений на выходе АИН с использованием дуальной вейвлет-функции, в результате чего получается вейвлет-модулированная последовательность импульсов, дающая лучшую аппроксимацию синусоидального напряжения, а значит, меньший коэффициент несинусоидальности, по сравнению с алгоритмами, рассмотренными ранее. Такое двойное преобразование математически выражается следующим образом

$$x(t) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} \sum_{\beta=-\infty}^{\infty} \langle \xi_a(2^\alpha t - \beta), x(t) \rangle \xi_s(2^\alpha t - \beta), \quad (10)$$

где $\{\xi_a(2^\alpha t - \beta)\}_{\alpha, \beta \in Z}$ – множество базисных вейвлет-функций анализа, определяемых для одного напряжения системы опорных напряжений с учетом коэффициента модуляции как

$$\xi_{aA_j}(t) = \phi_H(2^{M_j+1}t) + \phi_H(2^{M_j+1}(t-1) + 2^{-(M_j+1)}); \quad (11)$$

$\{\xi_s(2^\alpha t - \beta)\}_{\alpha, \beta \in Z}$ – множество базисных вейвлет-функций синтеза, определяемых для одной фазы выходного напряжения АИН как

$$\xi_{sA_j}(t) = \phi_H(t) - \xi_{aA_j}(t); \quad (12)$$

$\phi_H(t)$ – масштабирующая функция вейвлета Хаара. В результате анализа выражения (10) с учетом (11) и (12) можно получить выражения, определяющие времена открытия и закрытия силовых ключей АИН и приведенные в тексте диссертационной работы. При этом спектр фазного напряжения на выходе АИН, как и в случае алгоритма формирования ШИМ на основе избирательного исключения гармоник, описывается выражением (8).

Для всех рассмотренных алгоритмов формирования ШИМ проведен сравнительный анализ формируемых вибровозмущающих сил, который показал, что при равной частоте коммутации силовых ключей и работе в номинальном режиме меньшие уровни вибраций дает алгоритм формирования ШИМ на основе избирательного исключения гармоник. Алгоритм, основанный на кратномасштабном анализе, позволяет обеспечить работу АД на напряжении выше номинального при сохранении вибраций на приемлемом уровне. При работе на частотах ниже номинальной целесообразно использовать алгоритмы векторной симметричной ШИМ или векторной симметричной ШИМ с переменной частотой. Результаты расчета вибровозмущающих сил при-

введены на рисунке 3. При этом изменение координаты α рассматривается только на четверти длины воздушного зазора в силу симметричности АД.

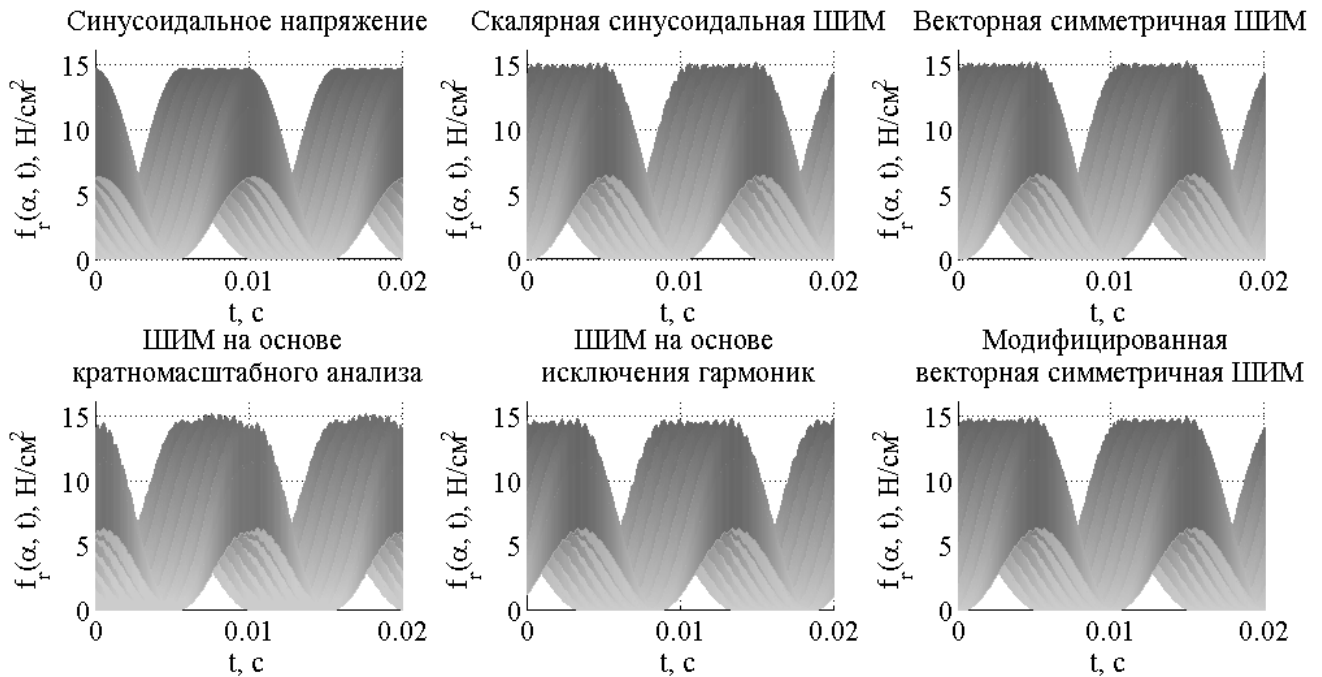


Рисунок 3 – Пространственно-временное распределение вибровозмущающих сил

В четвертой главе проведено исследование ВАХ АД при работе в составе частотно-регулируемого ЭП, выполненного по схеме прямого векторного управления при ориентации по полю с адаптивным наблюдателем потокосцепления ротора и частоты вращения ротора, построенным по схеме, предложенной Кубота и Матсусе. Исследование проведено в условиях ограниченной неопределенности активного сопротивления статора. Результаты математического моделирования в программе Matlab показали, что при адекватных настройках адаптивного наблюдателя состояние расширения спектра вибровозмущающих сил определяется выбором алгоритма формирования ШИМ и частотой первой гармоники напряжения на выходе АИН. Амплитуды гармоник вибровозмущающих сил в большей степени зависят от амплитудного значения тока намагничивания, которое может управляться в схеме прямого векторного управления путем соответствующего задания на потокосцепление ротора. По результатам моделирования предложена схема прямого векторного управления с адаптивным наблюдателем состояния и улучшенными ВАХ. Функциональная схема этой системы представлена на рисунке 4, на котором введены следующие сокращения: БК спектра – блок коррекции спектра; ЗИ – задатчик интенсивности; ФП – формирователь потока; РТ, РПт и РС – регулятор тока, потока и скорости соответственно; БКПС – блок компенсации перекрестных связей; БВА ШИМ – блок выбора алгоритма ШИМ; ПК – преобразователь координат; АС – анализатор спектра; БФ ШИМ – блок формирования ШИМ; АН ШИМ – адаптивная настройка ШИМ.

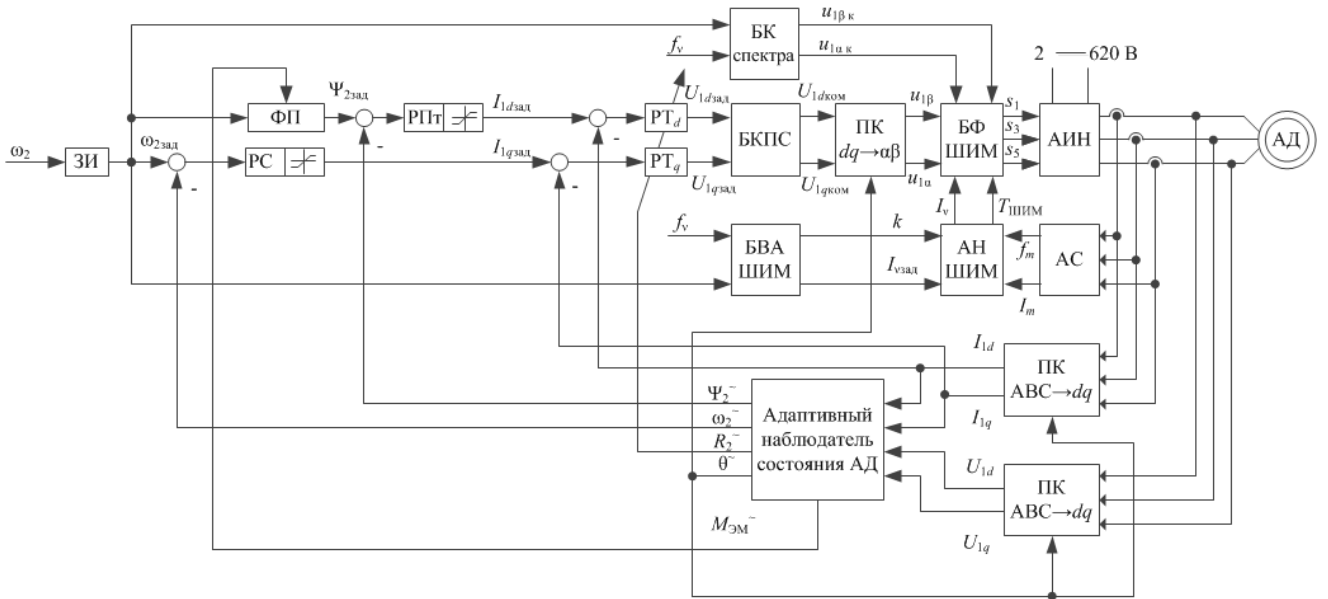


Рисунок 4 – Функциональная схема системы векторного управления АД с улучшенными ВАХ

Настройки контурных регуляторов и адаптивного наблюдателя состояния АД в приведенной схеме аналогичны традиционной схеме прямого векторного управления АД, рассчитанной по первой гармонике напряжения питания статора АД. С целью уменьшения уровней вибрации АД в блоке ФП предлагается осуществлять расчет оптимальной программы изменения потокосцепления ротора, соответствующего минимуму токов намагничивания в установившейся рабочей точке, определяемой значением момента на валу и заданной скоростью. В диссертации показано, что математически такое значение потокосцепления ротора в произвольной рабочей точке определяется выражением

$$\Psi_2 = \sqrt{\frac{2L_{2\sigma}M_{ЭМ}}{3Z_p \cos(\gamma)\sin(\gamma)}} \cos(\gamma), \quad (13)$$

где $\gamma = \pm 45^\circ$ – оптимальный угол между вектором тока намагничивания и потокосцеплением ротора; Z_p – число пар полюсов; $L_{1\sigma}$ и $L_{2\sigma}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора соответственно; $M_{ЭМ}$ – электромагнитный момент АД. Однако при поддержании постоянства оптимального значения угла γ происходит значительное увеличение токов статора, а работа АД может стать неустойчивой. При значении угла γ , меньшем относительно оптимального, но большем относительно номинального, можно добиться улучшения ВАХ АД при приемлемом увеличении токов статора. Расчет вибровозмущающих сил в системе прямого векторного управления с улучшенными ВАХ показал, что уменьшение задания на потокосцепление ротора на 20 % относительно номинального для АД типа 4ДМШ позволяет уменьшить амплитуду первой гармоники вибровозмущающих сил на 43 %.

Для коррекции низкочастотной части спектра, которая необходима в условиях близости удвоенной частоты питания к частоте собственных колебаний АД, в БК спектра осуществляется коррекция частоты и действующего значения напряжения питания статора при условии сохра-

нения работы АД в заданной рабочей точке. Для этого получены выражения, позволяющие оценить допустимые отклонения частоты питающего напряжения

$$f_{1\text{кр}} = \frac{Z_p \omega_2}{2\pi(1 - s_{\text{кр}})}, \quad (14)$$

а также величину, на которую необходимо изменить действующее значение напряжения задания для сохранения работы АД в заданной рабочей точке

$$U_{12} = U_{11} \sqrt{\frac{\left(\frac{\omega_{12} + Z_p \omega_2}{\omega_{12} s_{\text{кр}}} + \frac{\omega_{12} s_{\text{кр}}}{\omega_{12} + Z_p \omega_2} + 2 \frac{R_1}{R_2} s_{\text{кр}} \right) \cdot \omega_{12} \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + \omega_{12}^2 (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2} \right]}{\left(\frac{\omega_{11} + Z_p \omega_2}{\omega_{11} s_{\text{кр}}} + \frac{\omega_{11} s_{\text{кр}}}{\omega_{11} + Z_p \omega_2} + 2 \frac{R_1}{R_2} s_{\text{кр}} \right) \cdot \omega_{11} \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + \omega_{11}^2 (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2} \right]}}, \quad (15)$$

где U_{11} и U_{12} – действующее значение напряжения питания статора до и после коррекции, В; ω_{11} и ω_{12} – частота напряжения питания статора АД до и после коррекции, рад/с; ω_2 – заданная частота вращения ротора, рад/с; $s_{\text{кр}}$ – критическое скольжение.

Для коррекции высокочастотной части спектра вибровозмущающих сил предложена методика выбора алгоритма формирования ШИМ, реализованная в БВА ШИМ и основанная на максимизации расстояния между частотами собственных колебаний статора АД f_v и частотами вибровозмущающих сил f_{rg} , обусловленных несинусоидальностью напряжения питания

$$\max_{T_{\text{ШИМ}}} \prod_{v=1}^n \left(\min_g |f_v - f_{rg}| \right), \quad (16)$$

с последующей коррекцией параметров выбранного алгоритма ШИМ в блоке АН ШИМ на основании действительных спектров токов статора, полученных в АС.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований работы АД при питании от АИН с различными алгоритмами формирования ШИМ, выполненных на электротехническом стенде филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по методике измерений вибраций (РД.ИМЯН.096-2004). Макет показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – Экспериментальная установка исследования макетного образца

Для примера показаны результаты экспериментальных исследований АД типа АИР90L2У1 мощностью 3 кВт при формировании ШИМ на выходе АИН методом избирательного исключения гармоник в случае исключения первых 11 отличных от нуля гармоник и методом векторной симметричной ШИМ с переменной частотой, изменяющейся в диапазоне от 1125 до 1375 Гц на рисунках 6 и 7. Для этих двух алгоритмов число переключений силовых ключей за время формирования одного периода выходного напряжения отличается не более чем на 10 %. На рисунке 8 приведен сравнительный график, содержащий два автоспектра виброускорения в различных режимах: 1 – питание от АИН с ШИМ на основе избирательного исключения гармоник; 2 – от АИН с векторной симметричной ШИМ и переменной частотой.

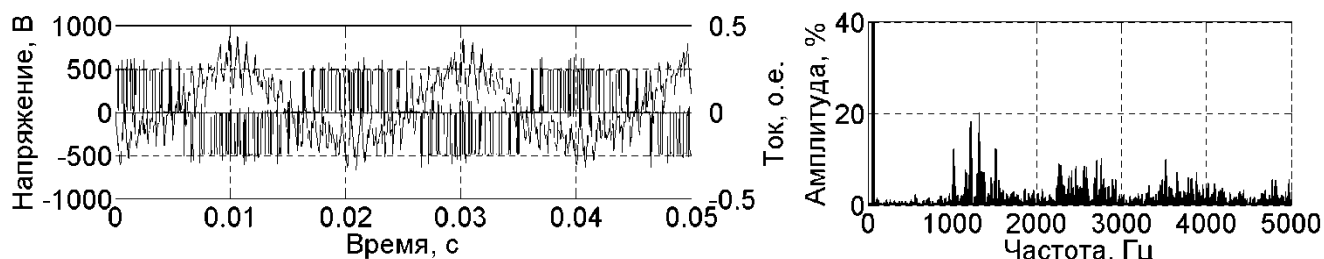


Рисунок 6 – Электрические переменные статора АД при векторной симметричной ШИМ с переменной частотой

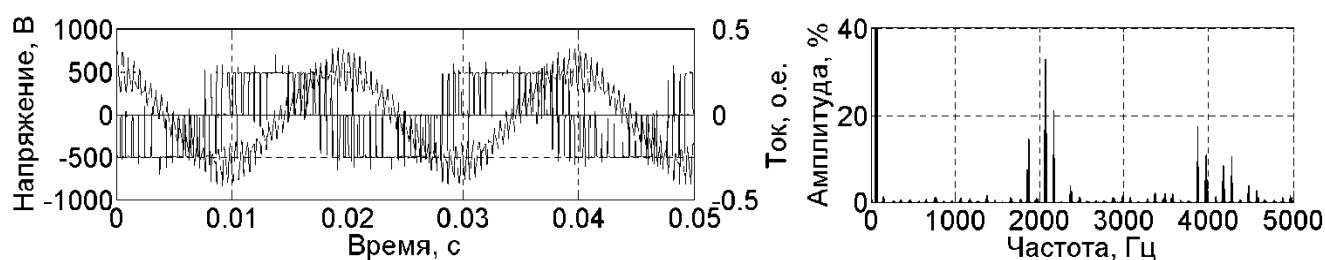


Рисунок 7 – Электрические переменные статора АД при ШИМ на основе избирательного исключения гармоник

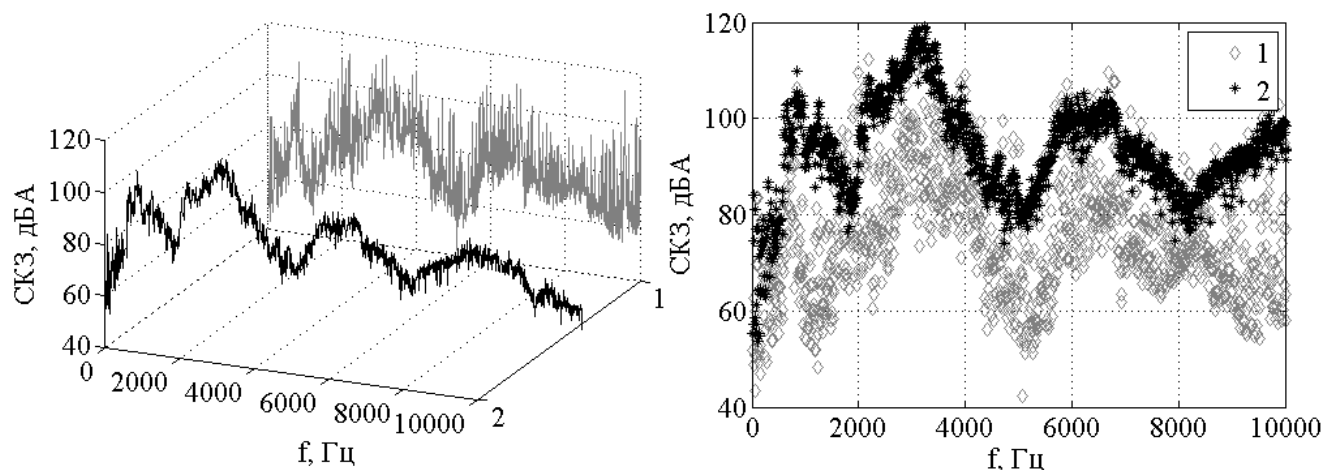


Рисунок 8 – Автоспектры виброускорения при использовании различных алгоритмов формирования ШИМ

В целом результаты экспериментальных исследований подтверждают основные положения выполненных теоретических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты.

1. Разработана математическая модель для расчета радиальной составляющей магнитных вибровозмущающих сил АД, обусловленных высшими гармоническими составляющими напряжения питания, при питании от АИН с различными алгоритмами формирования ШИМ: скалярная синусоидальная ШИМ; симметричная векторная ШИМ; ШИМ на основе исключения гармоник; ШИМ на основе кратномасштабного анализа. Кроме того, дополнительно реализована возможность исследования виброактивности АД при его работе в составе АЭП и управлении посредством изменения частоты и действующего значения напряжения со стороны статора.

2. Произведены исследования процесса формирования магнитных вибровозмущающих сил АД при работе в составе системы прямого векторного управления при ориентации по полю ротора с адаптивным наблюдателем состояния в условиях ограниченной неопределенности активного сопротивления статора. Исследования путем компьютерного моделирования показали, что расширение спектра вибровозмущающих сил зависит от выбора алгоритма формирования ШИМ и сигналов задания частоты и действующего значения напряжения питания статора. По результатам моделирования предложена модификация схемы прямого векторного управления, позволяющая минимизировать амплитуду вибровозмущающих сил за счет оптимизации сигнала задания на потокосцепление ротора; минимизировать амплитуду вибровозмущающей силы на двойной частоте питания за счет совместной коррекции сигнала задания на частоту и действующее значение на выходе АИН, обеспечивающей заданное значение скорости вращения вала; минимизировать резонансное возрастание вибраций, обусловленных несинусоидальностью напряжения питания, вблизи собственных частот колебаний АД за счет выбора соответствующего алгоритма формирования ШИМ и его параметров, обеспечивающих максимизацию удаления высших временных гармоник напряжения питания от частот собственных колебаний.

3. Разработан комплекс программ для ЭВМ и микроконтроллера по расчету задающих импульсов для управления выходным напряжением трехфазного двухуровневого АИН для реализации всех рассматриваемых алгоритмов формирования ШИМ. Разработанные программы позволяют, как использовать для управления АИН классические алгоритмы, так и алгоритм исключения гармонических составляющих при исключении до 12 наперед заданных гармоник линейного напряжения, а также алгоритм на основе кратномасштабного анализа. Результаты экспериментальных исследований работы АД от трехфазного двухуровневого АИН в целом соответствуют результатам теоретических исследований.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК:**

1. Доброскок Н. А. О возможности улучшения гармонического состава напряжения на выходе автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией / Б. В. Бруслиновский, Н. А. Доброскок // Морской вестник. Специальный выпуск № 2(11). – СПб: Изд-во Мор Вест, 2013. – С. 72-77

2. Доброскок Н. А. Учёт влияния параметров питающего напряжения асинхронного двигателя на его вибровозмущающие силы / Б. В. Бруслиновский, Н. А. Доброскок, В. В. Путов // Труды Центрального научно-исследовательского института имени академика А. Н. Крылова. Выпуск 81 (365). – СПб: Издание КГНЦ, 2014. – С. 65-80

3. Доброскок Н. А. Расчёт адаптивного наблюдателя для системы бездатчикового векторного управления с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора / Б. В. Бруслиновский, Н. А. Доброскок, А. В. Морозов // Труды Центрального научно-исследовательского института имени академика А. Н. Крылова. Выпуск 81 (365). – СПб: Издание КГНЦ, 2014. – С. 81-90

Статьи, опубликованные в других журналах:

4. Бруслиновский Б. В. Оптимизация энергопотребления в приводах запорно-регулирующей аппаратуры при их питании от энергоаккумулятора / Б. В. Бруслиновский, Н. А. Доброскок, А. В. Морозов // Neftegaz.RU, выпуск № 10, 2013. – С. 74-78

Материалы докладов научных конференций:

5. Бруслиновский Б. В. Универсальный алгоритм широтно-импульсной модуляции в многоуровневых инверторах напряжения / Б. В. Бруслиновский, Н. А. Доброскок, Д. В. Заботлин // Механика и процессы управления. Том 2. – Материалы XXXXI Всероссийского симпозиума. М: РАН, 2011. – С. 185-192

6. Доброскок Н. А. Исследование влияния параметров ШИМ на виброшумовые характеристики АД / Н. А. Доброскок, М. С. Никитин // Материалы XII молодежной научно-технической конференции «ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ-2014». – СПб: ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2014. – С. 179-191

7. Доброскок Н. А. Моделирование системы управления шестифазным асинхронным двигателем в САПР OrCAD / Н. А. Доброскок, Д. В. Заботлин // Материалы IX молодежной научно-технической конференции «ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ-2011». – СПб: ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2011. – С.188-192

8. Доброскок Н. А. Формирование напряжения АИН с заданным спектральным составом по алгоритмам на основе теории исключения / Н. А. Доброскок, О. В. Курдяева // Материалы XII

молодежной научно-технической конференции «ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ-2014». – СПб: ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2014. – С. 337-348

9. Бруслиновский Б. В. Варианты алгоритмов формирования ШИМ на выходе ПЧ для управления ГЭД / Н. А. Доброскок, Б. В. Бруслиновский // Материалы XI молодежной научно-технической конференции «ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ-2013». – СПб: ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2013. – С. 143-150

10. Бруслиновский Б. В. Обобщенный алгоритм управления многоуровневыми инверторами / Н. А. Доброскок, Б. В. Бруслиновский // Материалы X молодежной научно-технической конференции «ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ-2012». – СПб: ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2012. – С. 185-198

Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

11. Белов К. А., Доброскок Н. А., Евтодий А. А., Крыжановский А. Ю., Курдяева О. В., Лавриновский В. С. Программа расчетов заданных углов переключения силовых ключей преобразователей частоты для исключения требуемых гармонических составляющих в выходном напряжении инвертора. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014611089 от 23.01.2014.

12. Белов К. А., Голодный Н. В., Доброскок Н. А., Новинский И. Н., Мисников Р. Ф., Карманов И. В. Программа расчета задающих импульсов для управления выходным напряжением трехуровневого автономного инвертора напряжения с векторной широтно-импульсной модуляцией. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014615088 от 16.05.2014.

13. Доброскок Н. А., Фазли А. Р., Матус К. И., Белов К. А., Голодный Н. В., Новинский И. Н., Трегуб А. О. Программа управления системой диагностирования преобразователя частоты в составе электропривода подруливающего устройства. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014617361 от 17.07.2014.

14. Токарев Л. Н., Доброскок Н. А., Лавриновский В. С., Новинский И. Н., Белов К. А. Программа расчета переходных процессов в электроэнергетических системах, включающих в себя до трех генераторов, асинхронный двигатель и статический преобразователь. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014617362 от 17.07.2014.

15. Бруслиновский Б. В., Васин И. М., Голодный Н. В., Доброскок Н. А., Заботлин Д. В., Петрова Н. А., Токарев Л. Н. Устройство управления судовой системой электродвижения на основе нечеткого регулятора. Патент на изобретение № 2450299 от 10.05.2012.