

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Ростовский государственный университет путей сообщения»**

УДК 629.4:612.797; 629.4:658.58

ВГК ОКП 33 0000 9

№ госрегистрации 114102740055

Инв. №



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,  
д-р техн. наук, профессор

А.Н. Гуда

«        »        2014г.

М.П.

**ОТЧЕТ**

**О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

**«Разработка для транспортных систем тягового вентильно-индукторного  
привода с пониженным уровнем вибраций и шума»**

по теме:

**«Выбор направления исследований. Теоретические исследования»**

(промежуточный)

Этап "Первый"

Соглашение о предоставлении субсидии от 19 июня 2014 г. № 14.604.21.0040

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям  
развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы»

Приоритетное направление «Транспортные и космические системы»

Научный руководитель,

д-р техн. наук, проф.

А. Д. Петрушин

Ростов-на-Дону 2014

## РЕФЕРАТ

Отчет: 121 с., 68 рис., 5 табл., 93 источника.

### ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАЗЕМНЫЙ ТРАНСПОРТ, ТЯГОВЫЙ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ПРИВОД, УРОВЕНЬ ШУМА, РАДИАЛЬНЫЕ СИЛЫ, ВИБРАЦИЯ, ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ РОТОРА

Объектом исследования является тяговый вентиляно-индукторный электропривод для транспортных систем.

Цель работы – повышение эксплуатационных свойств вентиляно-индукторных тяговых электроприводов путем снижения уровня вибраций, шума и повышения износостойкости подшипниковых узлов и эксплуатационной надежности привода в целом.

#### Методы проведения ПНИ

Поставленные в ПНИ задачи решены с использованием математического и имитационного моделирования, методов теории электрических цепей и теории электромагнитного поля.

#### Полученные результаты ПНИ

В процессе работы проведен анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках ПНИ.

Осуществлен выбор и обоснование направления исследований и способов снижения уровня шума и вибраций в вентиляно-индукторном электроприводе и уровня сил радиального взаимодействия ротора и статора вентиляно-индукторной электрической машины.

Проведена сравнительная оценка вариантов возможных решений исследуемой проблемы с учетом результатов прогнозных исследований.

Разработана комплексная математическая модель вентиляно-индукторной машины, включая элементы электропривода.

Разработан алгоритм расчета параметров и характеристик вентиляно-индукторной машины с учетом возможности исследования допусков на изготовление элементов конструкции и программной документации по компьютерному моделированию.

Проведены исследования влияния бездатчикового управления вентиляно-индукторным электроприводом на его уровень шума и вибраций.

Разработано математическое и имитационное моделирование тягового вентиляно-индукторного электропривода транспортных систем с учетом допусков на изготовление конструктивных элементов вентиляно-индукторной электрической машины, теоретиче-

ские исследования на основе имитационного моделирования и выработка рекомендаций по снижению вибраций и шума.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики объектов разработок по проекту

Экспериментальный образец электрической машины должен быть вентильно-индукторного типа и обеспечивать по отношению к асинхронному короткозамкнутому двигателю меньшее количество материалов в активной части: обмоточной меди - на 15%, изоляционных материалов - на 15%, электротехнической стали на 5%, а также иметь КПД выше на 1-3%, иметь перегрузочную способность выше на 30%.

По результатам выполнения ПНИ должны быть представлены рекомендации в виде технического решения, обеспечивающего снижения уровня сил радиального взаимодействия ротора и статора вентильно-индукторной электрической машины не менее чем в 2 раза в номинальном режиме, а также снижение шума не менее 8-10 Дб.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	9
1 Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках ПНИ .....	14
1.1. Шум от вибрации статора .....	16
1.2. Шум от действующих на ротор радиальных сил .....	19
1.3. Шум от нагрузки и дополнительных источников .....	21
1.4. Аэродинамический шум .....	31
1.5. Электронные источники шума. Снижение уровня шума средствами управления .....	33
1.6. Анализ нормативной документации .....	38
2 Выбор и обоснование направления исследований и способов снижения уровня шума и вибраций в вентильно-индукторном электроприводе и уровня сил радиального взаимодействия ротора и статора вентильно-индукторной электрической машины .....	40
3 Проведение патентных исследований по ГОСТ 15.011-96 .....	50
4 Сравнительная оценка вариантов возможных решений исследуемой проблемы с учетом результатов прогнозных исследований .....	52
5 Разработка комплексной математической модели вентильно-индукторной машины, включая элементы электропривода .....	60
5.1 Математическое описание электрической части вентильно-индукторной машины .....	60
5.2 Математическое описание механической части ВИМ .....	67
5.3 Реализация математической модели ВИМ в среде MATLAB/Simulink .....	70
6 Разработка алгоритма расчета параметров и характеристик вентильно-индукторной машины с учетом возможности исследования допусков на изготовление элементов конструкции и программной документации по компьютерному моделированию .....	74
6.1 Подготовка исходных данных для компьютерного моделирования .....	74
6.2 Расчет параметров и характеристик ВИМ с учетом возможности исследования допусков на изготовление .....	76
6.3 Разработка программы и программной документации по компьютерному моделированию тягового вентильно-индукторного электропривода с учетом допусков на изготовление вентильно-индукторной электрической машины .....	78
7 Исследование влияния бездатчикового управления вентильно-индукторным электроприводом на его уровень шума и вибраций .....	82
7.1 Основания бездатчикового управления. Источники шума бездатчикового ВИЭП .....	82
7.2 Повышение точности определения положения ротора в пусковых режимах ВИЭП .....	83
8 Математическое и имитационное моделирование тягового вентильно-индукторного электропривода транспортных систем с учетом допусков на изготовление конструктивных элементов вентильно-индукторной электрической машины, теоретические исследования на основе имитационного моделирования и выработка рекомендаций по снижению вибраций и шума .....	95

8.1 Результаты имитационного моделирования тягового вентильно-индукторного электропривода.....	95
8.2 Теоретические исследования на основе имитационного моделирования и выработка рекомендаций по снижению вибраций и шума.....	105
8.2.1 Использование конфигураций ВИМ с «коротким полем».....	105
8.2.2 Использование параллельного соединения фазных катушек.....	107
9 Разработка бизнес-проекта по освоению производства электропривода для транспортных систем с пониженным уровнем вибраций и шума.....	111
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>112</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	<b>114</b>

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о ПНИ применены следующие обозначения и сокращения:

ВИД	Вентильно-индукторный двигатель
ВИМ	Вентильно-индукторная электрическая машина
ВИП	Вентильно-индукторный привод
ОЭМП	Одностороннее электромагнитное притяжение
ПНИ	Прикладные научные исследования
ПУ	Подшипниковый узел
ТЭД	Тяговый электрический двигатель

## ВВЕДЕНИЕ

### Оценка современного состояния научно-технической проблемы, на решение которой направленный проект

Одним из основных ориентиров инновационного развития транспортных систем является замена технических средств с истекшим сроком службы на новую технику с высокими технико-экономическими показателями.

Новые транспортные средства должны обладать высокой надежностью, энергоэффективностью и при этом немаловажным фактором является комфорт для пассажиров и персонала. Ведущие мировые ученые отмечают, что технологии, основной тенденцией которых было «больше, быстрее, выше» сегодня сменились новыми технологиями, тенденцией которых стало «лучше, безопаснее, тише».

Одним из основных направлений улучшения эксплуатационных показателей транспортных систем является применение бесколлекторного тягового привода. В настоящее время все большее распространение в нашей стране получает тяговый привод с асинхронными двигателями. Однако поиск более совершенного двигателя для транспортных систем продолжается. Хорошими перспективами обладает ВИД – самый простой по конструкции среди ближайших конкурентов.

Теория ВИД и привода на его основе интенсивно развивается, благодаря этому по основным технико-экономическим показателям ВИД встал в один ряд с лучшими образцами традиционных электрических машин с круговым полем в воздушном зазоре.

Данным направлением занимались многие отраслевые научные школы нашей страны: Южно-Российский государственный политехнический университета (ЮРГПУ), ОАО «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения» (ОАО «ВЭЛНИИ»), Московский энергетический институт (технический университет) (МЭИ), Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС) и др.

В промышленно развитых странах также отмечается повышенный интерес к электроприводам этого типа. Разработкой и внедрением их занимаются ведущие зарубежные электротехнические фирмы, такие как General Electric Co., Oulton (UK), Emerson Electric, TRW, DANA (USA) и многие другие.

Большой вклад в исследование ВИД, в том числе для ЭПС, внесли российские и зарубежные ученые: Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А., Щербаков В.Г., Ильинский Н.Ф., Кузнецов В.А., Бычков М.Г., Киреев А.В., Кононов Г.Н., Вольвич А.Г., Голландцев Ю.А., Шабаев В.А., Никифоров Б.В., Рымша В.В., Кришнан Р., Миллер Т. и др.

ВИД присущи признаки, выгодно отличающие его от других электрических двигателей, используемых для транспортных систем: отсутствие какой-либо обмотки на роторе, наличие на статоре обмотки сосредоточенного типа, для своей эффективной работы ВИД не нуждается в круговом вращающемся магнитном поле.

Однако есть и недостатки. Один из наиболее существенных недостатков – наличие значительных периодических сил, действующих на подшипниковый узел (ПУ) и приводящих к износу подшипников и посадочных мест в подшипниковых щитах. Это снижает ресурс работы тягового двигателя, порождает вибрацию, шум. Такие особенности работы ВИД исследованы недостаточно и в научно-технической литературе встречаются редко.

ВИД, как и любой другой электродвигатель, имеет эксцентриситет воздушного зазора  $e$ , обусловленный причинами технологического и эксплуатационного характера. Так причиной возникновения эксцентриситета служат: объективно существующие допуски на изготовление деталей ВИД, возможные погрешности сборки машины, прогиб вала ротора, износ в процессе эксплуатации ПУ и др.

Вследствие наличия эксцентриситета в ВИД возникают силы различной физической природы. К ним относятся силы одностороннего электромагнитного притяжения (ОЭМП) и механические силы, возникающие при дисбалансе. При расчете результирующей силы необходимо учесть и силу весовой нагрузки ротора.

#### Обоснование актуальности и новизны темы

Актуальность ПНИ определяется необходимостью перехода на новый качественный уровень характеристик транспортных систем, путем использования ТЭД вентильно-индукторного типа, обеспечив им конкурентные преимущества перед асинхронными тяговыми приводами путем снижения уровня вибраций, шума и повышения износостойкости подшипниковых узлов и эксплуатационной надежности привода в целом. Это позволит обеспечить возможность создания транспортных систем с высокой конкурентоспособностью на мировом уровне.

Результаты исследования приобретают особую актуальность при решении проблемы создания надежных и малошумных тяговых ВИП высокоскоростного транспорта. Также в качестве конечного продукта рассматриваются тяговые крановые приводы, приводы лифтов и других транспортных механизмов.

Новизна ПНИ заключается в разработке математической модели, алгоритма расчета и программного обеспечения, необходимых для обоснования предложенного технического решения по снижению вибраций, шума и повышению износостойкости подшипниковых узлов.



В качестве основного средства решения поставленных задач обладающего новизной рассматривается управляющее воздействие со стороны системы управления в сочетании с конструктивными изменениями вентильно-индукторной машины.

#### Исходные данные и научно-технические заделы, используемые для выполнения проекта

Исходными данными к ПНИ являются конструктивные решения электрических машин транспортного исполнения, отражающие современный научно-технический уровень. Коллектив исполнителей имеет научно-технический задел, представленный в виде патентов и публикаций [56, 57, 58, 59, 68, 72, 73, 77, 81, 82], который используется для выполнения проекта.

Основанием для проведения ПНИ в рамках мероприятия 1.2 приоритетного направления «Транспортные и космические системы» федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2017 годы», является Соглашение о предоставлении субсидии от 19 июня 2014 г. № 14.604.21.0040.

#### Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработок, выполняемых по проекту.

Научно-технический уровень разработок, выполняемых по проекту, определяется:

- математической моделью ВИП, учитывающей возникающее силовое взаимодействие статора и ротора в радиальном направлении, разработанной на основе анализа влияния радиального взаимодействия статора и ротора ВИМ на ее надежность и уровень шума и вибрации;

- методикой проектирования малозумных ВИП высокоскоростных транспортных систем, а также транспортных систем промышленного и бытового назначения, позволяющей снизить технологические затраты.

- алгоритмом управления ВИП, направленный на решение задачи снижения уровня силового радиального взаимодействия статора и ротора (не менее чем в два раза в номинальном режиме работы), учитывающим возможный дисбаланс ротора и особенности электроприводов транспортного исполнения.

#### Сведения о выполненных патентных исследованиях и выводы из них

Результаты патентных исследований свидетельствуют о достаточном большом интересе к разработке для транспортных систем тягового ВИП с пониженным уровнем вибраций и шума в Российской Федерации. В процессе поиска и отбора информации был проведен анализ не только отечественных, но и зарубежных источников по избранной тематике. Заметное число патентов и научных публикаций говорит о широком проведении

научных исследований среди зарубежных научных групп Западной Европы, США, Японии, Китайской Народной Республики, Южной Кореи.

Анализ данных, проведенных в процессе патентного поиска, и анализ научных публикаций показывает, что диапазон исследований в рассматриваемой области достаточно широк, что подтверждает интерес к проблеме разработки ВИП с пониженным уровнем вибраций и шума для транспортных систем, как со стороны представителей науки, так и со стороны промышленных предприятий. Это обосновывает актуальность темы исследований по проекту.

Патентные исследования включают в себя поиск, отбор и систематизацию источников научно-технической и патентной документации. Их последующий анализ позволяет выбрать некоторые модели, которые рассматриваются как прототипы разрабатываемой новой техники.

Разнообразие конструктивных решений представленных патентов свидетельствует об активном поиске оптимальных решений в рассматриваемой предметной области. Тем не менее, общий анализ показывает, что, несмотря на большое число исследований в области снижения вибраций и шума вентильно-индукторных двигателей, эффективного решения пока не найдено. Следовательно, решение данной проблемы представляется важным и перспективным направлением.

Связь выполняемых ПНИ с другими научно-исследовательскими работами и разработками осуществляется на основе анализа публикационной активности авторов, работающих по близкой тематике.

#### Цели и задачи отчетного этапа ПНИ и их место в выполнении проекта в целом

Целью отчетного этапа ПНИ является выработка на основе математического моделирования и расчета параметров и характеристик ВИП такого технического решения, удовлетворяющего Техническому заданию, которое на последующих этапах будет изготовлено и испытано.

Задачи отчетного этапа:

- выбор и обоснование направления исследований и способов снижения уровня шума и вибраций в ВИП и уровня сил радиального взаимодействия ротора и статора ВИМ;
- сравнительная оценка вариантов возможных решений исследуемой проблемы с учетом результатов прогнозных исследований;
- разработка комплексной математической модели ВИМ, включая элементы электропривода;

- разработка алгоритма расчета параметров и характеристик ВИМ с учетом возможности исследования допусков на изготовление элементов конструкции и программной документации по компьютерному моделированию;

- исследование влияния бездатчикового управления ВИП на его уровень шума и вибраций;

- математическое и имитационное моделирование тягового ВИП транспортных систем с учетом допусков на изготовление конструктивных элементов ВИМ, теоретические исследования на основе имитационного моделирования и выработка рекомендаций по снижению вибраций и шума.

В целом выполненный этап характеризуется теоретическими исследованиями, которые являются фундаментом для выработки рационального технического решения, удовлетворяющего по своим параметрам Техническому заданию и позволяющего достичь поставленной в ПНИ цели.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Krishnan, R.** Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. / R. Krishnan. – Magna Physics Publishing, 2001. – 416 p.
- 2 **M. Bösing.** Acoustic modeling of electrical drives. Noise and vibration synthesis based on force response superposition. Diss. RWTH Aachen University. 2013. 208 p.
- 3 **Киреев, А.В.** Вентильно-индукторные электроприводы для подвижного состава. / А.В. Киреев. – Ростов н/Д.: АкадемЛит, 2011. – 340 с.
- 4 **Ehsani, M.** Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. / M. Ehsani, G. Yimin, A. Emadi. – CRC Press, 2009. – 557 p.
- 5 **Colby, R.S.** Vibration modes and acoustic noise in a four-phase switched reluctance motor. / R.S. Colby, F.M. Mottier, T.J.E. Miller // IEEE Transactions on Industry Applications. – V. 32. – 1996. – p. 1357–1364.
- 6 **Girgis, R.S.** Method for accurate determination of resonant frequencies and vibration behavior of stators of electrical machines. / R.S. Girgis, S.P. Verma // IEEE Transactions on Electrical Power Apparatus B. – 1981. – V. 128. – p. 1–11.
- 7 **Singal, R.K.** The effect of windings, frame and impregnation upon the resonant frequencies and vibrational behavior of an electrical machine stator. / R.K. Singal, K. Williams, and S.P. Verma // Experimental Mechanics. – V. 30. – 1990. – p. 270–280.
- 8 **Yongxiao, C.** Analytical calculation of natural frequencies of stator of switched reluctance motor. / C. Yongxiao, W. Jianhua, and H. Jun // 8th International Conference on Electrical Machines and Drives. – 1997. – p. 81–85.
- 9 **Fielder, J. O.** Calculation of the Acoustic noise spectrum of SRM using modal superposition. / J.O. Fielder, K.A. Kasper, R.W. De Doncker // IEEE Transactions on industrial electronics. – V. 57. – 2010. – p. 2939-2945.
- 10 **Karthikeyan, R.** Study on switched reluctance generator for rural electrification. / R. Karthikeyan, K. Vijayakumar, R. Arumugam // International journal of computer applications. – V. 6. – 2010. – p. 11-17.
- 11 **Pillay, P.** An investigation into vibration in switched reluctance motors. / P. Pillay, W. Cai // IEEE Transactions on industry applications. – V. 35. – 1999. – p. 589-596.
- 12 **Fielder, J.** Effectiveness of noise reducing measures in switched reluctance drives. / J.O. Fielder, K.A. Kasper, F. Chaparro R.W. De Donker // IEEE Industry applications conference. – 2006. – p. 1163-1170.
- 13 **Miller, T.J.E.** Faults and unbalance forces in the switched reluctance machine. / T.J.E. Miller // IEEE Transactions on industry applications. – V. 31. – 1995. – p. 319-328.

- 14 **Szabo, L.** On fault tolerance increase of switched reluctance machine. / L. Szabo, M. Ruba // IEEE Eurocon transactions. – 2010. – p. 734-739.
- 15 **Torkaman, H.** FEM analysis of angular misalignment fault in SRM magnetostatic characteristics / H. Torkaman, E. Afjei // Progress in electromagnetics research. – V. 104. – 2010. – P. 31-48.
- 16 **Torkaman, H.** Radial force characteristic assessment in a novel two-phase dual layer SRG using FEM / H. Torkaman, E. Afjei // Progress in electromagnetics research. – V. 125. – 2012. – P. 185-202.
- 17 **Subashraj, R.** Vibration analysis of switched reluctance motor with exterior rotor. / R. Subashraj, S. Prabhu, A. Manikandan, N. C. Lenin, V. Chandrasekar, R. Arumugam // International journal of innovative research & development. – V. 3. – 2014. – p. 78-83.
- 18 **Divandari, M.** Radial force and torque ripple optimization for acoustic noise reduction of SRM drives via fuzzy logic control. / M. Divandari, A. Dadpour // 9th IEEE/IAS International conference on Industry applications. – 2010. – p. 1-6.
- 19 **Zhang, H.** Radial force reduction for switched reluctance motor with skewed slot structure based on FEM. / H. Zhang, J. Zhang, R. Gao // Journal of scientific & industrial research. – V. 69. – 2010. – p. 594-599.
- 20 **Li, J.** Dynamic reduction of unbalanced magnetic force and vibration in switched reluctance motor by the parallel paths in windings. / J. Li, Y. Cho // Mathematics and computers in simulation. – V. 81. – 2010. – p. 407-419.
- 21 **Патент 2435284** Российская Федерация, МПК H02K29/06, H02K19/10, H02P6/00. Электродвигатель реактивный с механическим коммутатором [Текст] / Ганеев Э.А. и др. патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Электротехнический завод "ГЭКСАР". – 2010100359/07; заявл. 11.01.2010; опубл. 27.11.2011.
- 22 Повышенный уровень вибраций и шума электродвигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dizvi.ru/news/286-povyshennyj-uroven-vibracii-i-shum-jelektrodvigelja>
- 23 **Лазароиу, Д.Ф.** Шум электрических машин и трансформаторов /Д.Ф. Лазароиу, Н. Бикер. – М.: Энергия, 1973. – 271 с.
- 24 **Шубов, И.Г.** Шум и вибрация электрических машин/ И.Г. Шубов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
- 25 **Бочаров, В.И.** Тяговые электродвигатели электровозов / В.И. Бочаров, В.И. Захаров, Л.Ф. Коломейцев.- Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. – с 672.
- 26 **Кучер, В.Я.** Вибрация и шум электрических машин/ В.Я. Кучер – Спб: СЗТУ, 2004. – 50с.

- 27 **Мандрыкин, С.А.** Ремонт электродвигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electrichelp.ru/prichiny-vibracii-elektrodvigatelya/>
- 28 Технический словарь. Том IV. Газовый подшипник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ai08.org/index.php/term/>
- 29 **Журавлев Ю.Н.** Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
- 30 Магнитные подшипники. Достоинства и недостатки магнитных подшипников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://myfta.ru/magnitnye-podshipniki.html>
- 31 **Деро, А.Р.** Повышенный уровень вибрации и шум электродвигателя. Повышенный уровень поперечных вибраций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nppsaturn.ru/deroAR5.htm>
- 32 **Гемке, Р.Г.** Неисправности электрических машин/ Р.Г. Гемке. – Л.: Энергия, 1975. – 296 с.
- 33 **Шабаев, В.А.** Анализ источников шума вентильно-индукторного двигателя / В.А. Шабаев //Электротехника. – 2005. – №5. – С.62-64.
- 34 **Барков, А.В.** Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации/А.В. Барков, Н.А. Баркова/ Труды Петербургского энергетического института повышения квалификации Минтопэнерго Российской Федерации и Института вибрации США (Vibration Institute, USA). –1999. – №9.
- 35 **Yang, S.J.** Low-Noise Electrical Motors. – Clarendon Press, Oxford. 1981. 101 p.
- 36 **Timar, P.L.** Noise and Vibrations of Electrical Machines, Elsevier, Amsterdam/ New York. 1989. – 339 p.
- 37 **Fiedler, J.** Design of low-noise switched reluctance drives. Diss. RWTH Aachen University. 2016. 183 p.
- 38 **Nasirian, V.** Excitation shifting: a general low-cost solution for eliminating ultra-low-frequency torque ripple in switched reluctance machines / V. Nasirian, A. Davoudi, S. Kaboli, C.S. Edrington // IEEE Transactions on magnetic. – V. 49. – 2013. – p. 5135-5149.
- 39 **Wu, C.Y.** Analysis and reduction of vibration and acoustic noise in the switched reluctance drive. / C.Y. Wu, C. Pollock // IEEE IAS Conference. – 1993. – p. 106–113.
- 40 **Liu, X.** Analysis of vibration reduction level in an 8/6 switched reluctance machine by active vibration cancellation / X. Liu, Z. Pan, Z.Q. Zhu // Journal of Zhajiang University – Science C. – V. 10. – 2010. – p. 808-816.
- 41 **Ojeda, X.** Switched reluctance machine vibration reduction using a vectorial piezoelectric actuator control. / X. Ojeda, H. Hannoun, X. Mininger, M. Hilairet, M. Gabsi, C. Marchand, M. Lecrivain // The European physical journal applied physics. – V. 47. – 2009.

42 **Патент 2482591** Российская Федерация, МПК H02K19/10, H02K29/06, H02P25/08, H02P6/08, H02P6/16. Трехфазный вентильно-индукторный двигатель с минимальными шумами, вибрациями и пульсациями момента, способ и устройство управления [Текст] / Шабаев В.А. и др. патентообладатель Открытое Акционерное Общество "Научно-Исследовательский Проектно-Конструкторский и Технологический Институт Электромашиностроения". – 2011149258/07; заявл. 02.12.2011; опубл. 20.05.2013.

43 **Патент 2482591** Российская Федерация, МПК H02K19/10, H02K29/06, H02P25/08, H02P6/08, H02P6/16. Трехфазный высокоскоростной вентильно-индукторный двигатель с минимальными шумами, вибрациями и пульсациями момента, способ и устройство управления [Текст] / Шабаев В.А. и др. патентообладатель Открытое Акционерное Общество "Научно-Исследовательский Проектно-Конструкторский и Технологический Институт Электромашиностроения". – 2011149255/07; заявл. 02.12.2011; опубл. 20.05.2013.

44 **Pillay, P.** A chopper-controlled SRM drive for reduced acoustic noise and improved ride-through capability using supercapacitors. / P. Pillay, R.M. Samudio, M. Ahmed, R.T. Patel // IEEE Transaction on industry applications. – V. 31. – 1995. – p. 1029-1038.

45 **Патент 2483416** Российская Федерация, МПК H02K19/10, H02K29/06, H02P25/08, H02P6/08, H02P6/16. Шестифазный вентильно-индукторный двигатель с минимальными шумами, вибрациями и пульсациями момента, способ и устройство управления [Текст] / Шабаев В.А. и др. патентообладатель Открытое Акционерное Общество "Научно-Исследовательский Проектно-Конструкторский и Технологический Институт Электромашиностроения". – 2011149253/07; заявл. 02.12.2011; опубл. 27.05.2013.

46 **Патент 2166228** Российская Федерация, МПК H02P6/00, H02P8/00. Способ снижения шума реактивного индукторного двигателя [Текст] / Пахомин С.А. и др. заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное предприятие "Эметрон". – 99100545/09; заявл. 06.01.1999; опубл. 27.04.2001.

47 Устранение вибраций электрических машин/ М.М. Исакович [и др.]. – Л.: «Энергия», 1969. – 216 с.

48 **Падеев, А.С.** Трехфазная асинхронная машина при нарушении равномерности воздушного зазора и симметрии фазных обмоток статора: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01/ А.С. Падеев; Оренбург. –2002. –146 с.

49 **Кельзон, А.С.** Расчет и конструирование роторных машин/ А.С. Кельзон, Ю.Н. Журавлев, Н.В. Январев. – Л.: Машиностроение, 1977. – 288 с.

50 **Husain, I.** Unbalanced Force Calculation in Switched-Reluctance Machines/ I. Husain, A. Radun, J. Nairus. – IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 36, No. 1, January 2000, PP.330-338.

51 **Пястолов, А.А.** О колебании ротора асинхронного двигателя в подшипниках с увеличенными зазорами/ А.А. Пястолов, А.В. Частовский// Вопросы эксплуатации и повышения надежности электрооборудования: Сб. тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1987, Вып.111. – С.8-12.

52 **Киклевич, Н.А.** Влияние неравномерного воздушного зазора на характеристики и эксплуатационную надежность асинхронных электродвигателей/ Н.А. Киклевич//Электричество. – М: Госэнергоиздат, 1949, №12. – С.15-19.

53 **Воскресенский, А.П.** Одностороннее магнитное притяжение в асинхронных электродвигателях/ А.П. Воскресенский// Вестник Электропромышленности. – М: Госэнергоиздат, 1958, №4. – С.15-18.

54 **Иоффе, А.Б.** О силе одностороннего магнитного притяжения в электрических машинах/ А.Б. Иоффе // Вестник Электропромышленности. – М: Госэнергоиздат, 1950, №3. – С.9-13.

55 **ГОСТ ИСО 1940-1–2007.** Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса. – Введ. 2008 – 01 – 25. – М.: Стандартинформ, 2008. – 27 с.

56 **Петрушин, А.Д.** Исследование вентильно-индукторной электрической машины с конструктивной асимметрией / А.Д. Петрушин, М.В. Чавычалов., Е.Е Илясова// Вестник РГУПС. – Ростов н/Д: РГУПС, 2013 – № 1. – С. 45-50.

57 **Патент на изобретение РФ №2450410.** Реактивная коммутируемая электрическая машина с симметрией/Петрушин А.Д., Гребенников Н.В.; зарегистрирован 10.05.12.

58 **Петрушин, А.Д.** Оценка влияния неравномерности воздушного зазора на величину сил одностороннего притяжения ротора к статору вентильно-индукторной электрической машины/ А.Д. Петрушин, Е.Е. Илясова// Вестник ВЭЛНИИ. – Новочеркасск, 2011. – 2(62) . – С.84-93.

59 **Илясова, Е.Е.** Особенности силового взаимодействия статора и ротора вентильно-индукторной электрической машины при их несимметричном расположении/ Е.Е. Илясова//Труды РГУПС. – Ростов н/Д: РГУПС, 2013 – № 2. – С. 33-39.

60 **Divandari, M.** Radial force and torque ripple optimization for acoustic noise reduction of SRM drives via fuzzy logic control / M. Divandary, A. Dadpour // Industry applications (INDUSCON), 2010 9<sup>th</sup> IEEE/IAS International Conference on. – 2010. – p. 1 – 6.



- 61 **Черных, И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
- 62 **Колесников, Э.В.** Моделирование магнитного гистерезиса / Э.В. Колесников, А. Дардасави // Известия вузов. Электромеханика. 1993. №5. С. 23-29.
- 63 **Gyorgy, E.** Rotational Model of Flux Reversal in Square Loop Ferrites. / E. Gyorgy // Journal of Applied Physics. – 1957. –Vol. 28. – №11. p. 1011-115.
- 64 **Сегерлинд, Л.** Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
- 65 **Бочаров, В.И.** Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В.И. Бочаров, Г.В. Василенко, А.Л. Курочка и др.; Под ред. В.И. Бочарова и В.П. Янова. М.: Энергоатомиздат, 1992. 464 с.
- 66 **Acarnley, P.** Hill R., Hooper C. Detection of rotor position in stepping and switched reluctance motors by monitoring of current waveforms. // IEEE Trans. Industrial Electronics. 1985. № 3. P. 215–222.
- 67 **Husain, I.** Indirect rotor-position estimation techniques for switched reluctance motors: a review / I. Husain // Electromotion. – №3. – 1996. – P. 94-102.
- 68 **Чавычалов, М.В.** Методы бездатчикового управления вентильно-индукторными электрическими машинами. / М.В. Чавычалов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – №4. – С. 86-88.
- 69 **Mvungi, N.H.** A new sensorless position detector for SR drives / N.H. Mvungi, M.A. Lahoud, J.M. Stephenson // Proc. 4th Int. Conf. on Power Electronics and Variable Speed Drives. – 1990. – P. 249-252.
- 70 **Mvungi, N.H.** Accurate sensorless rotor position detection in an SR motor / N.H. Mvungi, J.M. Stephenson // Proceedings of European Power Electronics Conference, Firenze. – 1991. – P. 390-393.
- 71 **Mvungi, N.H.** Sensorless Commutation Control of Switched Reluctance Motor. / N.H. Mvungi // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2007. – №25. – P. 325-330.
- 72 **Чавычалов, М.В.** Бездатчиковое управление вентильно-индукторными электрическими машинами. / М.В. Чавычалов // Электромеханические системы, методы моделирования и оптимизации. Сборник научных работ X Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов в городе Кременчуг 28–29 марта 2012 г. – 2012. – С. 368–369.
- 73 **Петрушин, А.Д.** Исследование асимметричных способов возбуждения вентильно-индукторных электрических машин. / А.Д. Петрушин, М.В. Чавычалов, Е.Е. Илясова // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми ав-

томатизованного электропривода. Теория и практика» научно-виробничного журналу. – 2012. – №3. – С. 522-523.

74 **Nasirian, V.** Excitation shifting: a general low-cost solution for eliminating ultra-low-frequency torque ripple in switched reluctance machines / V. Nasirian, A. Davoudi, S. Kaboli, C.S. Edrington // IEEE Transactions on magnetic. – V. 49. – 2013. – p. 5135-5149.

75 Handbook of automotive power electronics and motor drives. – CRC Taylor & Francis, 2006. – 704 p.

76 **Gallegos-Lopez, G.** Sensorless control for switched reluctance motor drives: PhD thesis. University of Glasgow, Glasgow, 1998.

77 **Чавычалов, М.В.** Комплексный алгоритм бездатчикового управления вентильно-индукторным двигателем. / М.В. Чавычалов // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. – 2012. – № 12. <http://technomag.edu.ru/doc/496400.html>

78 **Щербаков, В.Г.** Индукторный тяговый двигатель для электропоезда. Параметры, особенности конструкции. / В.Г. Щербаков, В.М. Павлюков, В.И. Захаров// Известия вузов. Электромеханика. – 2000. – №3. – с. 57-58.

79 **Киреев, А.В.** Математическое моделирование процессов в тяговом вентильно-индукторном электроприводе при работе от контактной сети переменного тока. / А.В. Киреев, С.А. Пахомин // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – №2. – с. 29-35.

80 **Пахомин, С.А.** Развитие теории и практика проектирования энергосберегающих вентильно-индукторных электроприводов: дис.....докт. техн. наук: 05.09.03. / Пахомин Сергей Александрович. – Новочеркасск, 2001. – 386 с.

81 **Гребеников, Н.В.** Влияние изменения угла фаз подвагонного вентильно-индукторного генератора на угловые эксплуатационные характеристики при неизменной конфигурации статора. / Н.В. Гребеников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – №2. – с. 17-21.

82 **Петрушин, А.Д.** Выбор типа электродвигателя безредукторного исполнения для электропоезда. / А.Д. Петрушин, Н.В. Гребеников, А.П. Пиотровский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – №4. – с. 49-53.

83 **ГОСТ 31296.1-2005.** Шум. Описание, измерение и оценка шума на местности. Часть 1. Основные величины и процедуры оценки. – Введ. 2007 – 01 – 01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 19 с.

84 **ГОСТ 17187-81.** Шумомеры. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 1982 – 01 – 07. Издательство стандартов – 25 с.

85 **ГОСТ 8.417-81.** Государственная система обеспечения единства измерений. Общие требования и нормы.

86 **ГОСТ 8.002-86.** Государственный надзор и ведомственный контроль за средствами измерений. Основные положения.

87 **ГОСТ 27408-87.** Шум. Методы статистической обработки результатов определения уровня шума, излучаемого машинами. – Введ. 1988 – 01 – 01. Издательство стандартов – 18 с.

88 **ГОСТ 30457-97.** Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума на основе интенсивности звука. Измерение в дискретных точках. Технический метод. – Введ. 1999 – 01 – 01. – М.: Стандартиформ. – 12 с.

89 **ГОСТ 12.1.023-80.** Шум. Методы установления значений шумовых характеристик стационарных машин. – Введ. 1980 – 01 – 01. Издательство стандартов – 8 с.

90 **ГОСТ 11929-87.** Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. Определение уровня шума. – Введ. 1988 – 01 – 01. Издательство стандартов – 34 с.

91 **ГОСТ Р 53148-2008.** (МЭК 60034-9:2003) Машины электрические вращающиеся. Предельные уровни шума. – Введ. 2010 – 01 – 01. – М.: Стандартиформ, 2010. – 12 с.

92 **ГОСТ 23941-2002.** Методы определения шумовых характеристик. – Введ. 2003 – 01 – 01. – ИПК Издательство стандартов, 2003. – 8 с.

93 **ГОСТ 31328-2006.** Шум. Руководство по снижению шума глушителями. – Введ. 2007 – 04 – 01. – М.: Стандартиформ, 2007. – 38 с.