

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу
Шевкуновой Анастасии Владимировны
«Совершенствование проектирования активной части вентиляно-индукторной машины», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Для написания отзыва на диссертационную работу представлены:

- диссертационная работа объемом 150 с. (основной текст – 135 с., библиографический список – 10 с. Из 103 источников, приложений – 4 с.), состоящая из введения, четырех глав, заключения;
- автореферат (23 с.), в котором кратко изложены: основное содержание диссертации, идеи, решения и выводы, показан вклад автора в проведенное исследование, степень новизны и практическая значимость результатов исследований.

1. *Актуальность темы диссертации*

Вентиляно-индукторная машина (ВИМ) сегодня привлекает внимание многих исследователей и является одним из перспективных электромеханических преобразователей (ЭМП), применение которого обусловлено рядом преимуществ, таких как простота конструкции, надежность, хорошие энергетические и массогабаритные показатели. К тому же, ВИМ в настоящее время составляют основу современного электропривода (ВИП) промышленного производства, определяют технико-экономические возможности широкого применения электрической тяги на железнодорожном и городском транспорте, обеспечивают соответствующие силовые функции и режимы работы электроприводов станочного оборудования и сложных робототехнических систем (РТС), включая робототехнические комплексы (РТК) и другое технологическое оборудование автоматизированных производств. С ростом требований к техническим характеристикам ВИП появляется необходимость в совершенствовании существующих методов проектирования ЭМП, в частности, создании оптимальной геометрии активной части ВИМ, которая определяет основные технические показатели эффективности ее применения, включая и экономические. Для согласования силовых характеристик ВИМ и производственного оборудования обычно используют выходные параметры: электромагнитный момент, частоту вращения вала ЭМП. Указанные параметры определяются конфигурацией активной части ВИМ, которую составляют ярмо и зубцы статора, ярмо и зубцы ротора, обмотки статора. Получение максимального вращающего момента на валу ЭМП в широком диапазоне изменения частоты вращения ротора и создания ВИП при сохранении других технико-экономических показателей возможно, по мнению соискателя,

при одновременном совершенствовании силовой и информационной его частей. Создание ВИП конкурентоспособного на мировом рынке электроприводов и расширения сферы его применения является своевременной и актуальной задачей, имеющей научное и практическое значение.

2. Научная новизна основных положений и выводов

Научная новизна основных положений диссертационной работы заключается в формулировке цели предпринимаемого исследования, в постановке и конкретизации задач, решение которых соискатель видит в совершенствовании методов проектирования преобразовательной части, разработке алгоритмов и программ компьютерного проектирования с оптимизацией геометрических параметров активной части ВИМ. Исходя из цели и задач исследования, соискателем сформулированы понятия «объекта» и «предмета» исследования.

Убедительность научных положений диссертационной работы отмечается в следующем:

1. Разработана и предложена математическая модель ВИМ в виде уравнений, записанных в частных производных, полученных с учетом ряда допущений и условностей.

При решении этой части задачи соискателем были учтены все сложности выполнения этапа исследования, обусловленные тем, что работа ВИМ характеризуется:

- непрерывными переходными процессами, связанными с коммутацией фаз переключающим устройством, «несинусоидальностью» электрических и магнитных величин в зависимости от времени, включая номинальный установившийся режим работы ВИМ;

- наличием явно выраженной «зубчатости» активной части двигателя с довольно малым воздушным зазором между зубцами статора и ротора, что обуславливает локальное насыщение коронок зубцов при их перекрытии и ведет к изменению гармонического состава тока фазы статора и момента на валу ВИМ;

- значительной зависимостью магнитной индукции воздушного потока ВИМ от углового положения ротора при несинусоидальном характере тока обмоток статора.

При разработке математической модели с решением полевых задач были использованы такие пакеты программ, как FEMM и ELCUT. В частности, в основу программы FEMM 4.2 положен полевой метод расчета, основанный на методе конечных элементов. Действующий момент на ротор определялся из расчета магнитного поля ВИМ с помощью внешнего тензора натяжений, где базой метода расчета усилий является объемный интеграл тензора натяжения Максвелла. Применение полученной математической модели позволило определить параметры и характеристики ВИМ, в частности, зависимость тока фазы i от угла поворота ротора Q , т.е. $i(Q)$, используемые в виде входной информацией для алгоритмов оптимизации.

2. Выбранные методы и алгоритмы оптимизации проектирования активной части ВИМ отвечают главным критериям: сходимости при поиске глобального

экстремума целевой функции итерационного алгоритма, минимальному времени достижения конечного результата при заданной точности расчета. При проектировании активной части ВИМ увеличение электромагнитного момента является целью оптимизации зубцовой зоны статора и ротора. Выполненный соискателем анализ известных алгоритмов оптимизации позволил обосновать и применить методы Монте-Карло и Нелдера–Мида (деформируемого многогранника), удовлетворяющие вышеперечисленным критериям. Причем, по мнению соискателя, для корректного решения поставленной оптимизационной задачи целесообразно сочетать детерминированные алгоритмы (например, метод Нелдера – Мида) с методами случайного поиска (например, метод Монте – Карло).

Здесь следует отметить также обоснованность выбранных методов исследования, которые являются необходимым условием достижения поставленной в диссертации цели предпринимаемого исследования, что подтверждает тщательность проработки существующей проблемы соискателем. В диссертации достаточно глубоко проанализированы преимущества и недостатки примененных методов оптимизации, определены границы задаваемых параметров, их количество и ограничения, разработаны и использованы программы по нахождению оптимальных точек. Описание оптимизационных алгоритмов заложено в основу программы «Оптимизация ВИМ» автоматизированного проектирования и оптимизации активной части ВИМ. Особенностью разработанной программы является возможность функционирования в трех режимах: автоматизация проектирования ВИД с учетом требований ТЗ, оптимизация геометрических параметров машины по одному или нескольким критериям, вычисление среднего значения электромагнитного момента, значения пульсаций электромагнитного момента и момента инерции ротора при заданных геометрических параметрах без применения оптимизации (в режиме «однократного расчета»).

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Для оценки обоснованности основных положений, выводов и рекомендаций остановимся на анализе диссертации по содержанию.

Во введении (с. 4...8) дано обоснование необходимости поиска методов оптимального проектирования ВИМ для широкого применения её в качестве электромеханического преобразователя (ЭМП) в составе вентильно-индукторных электроприводов (ВИП) производственных механизмов современного промышленного производства и различных транспортных систем. Для улучшения технико-экономических показателей ВИП, по мнению соискателя, необходимо совершенствовать методы его проектирования, т.е. создавать и развивать направления в проектировании непосредственно геометрии активной части ВИМ с применением современного программного обеспечения и методов оптимизации. Задаче совершенствования проектирования ВИМ из расчета обеспечения максимального вращающего момента в широком диапазоне частот вращения

ротора и высоких технико-экономических показателей ВИП в диссертации соискателем уделено основное внимание.

В первой главе диссертации (с. 9-31) приведено обоснование актуальности задач исследований, показана значимость влияния решаемой проблемы на технико-экономические показатели развития промышленного комплекса Российской Федерации, обусловленная также повышающейся конкурентоспособностью производимой продукции среди экономически развитых стран мира. Показано, что приоритетным направлением в развитии ведущих отраслей промышленности является разработка и внедрение передовых промышленных технологий, где современному управляемому электроприводу (ВИП) на базе ВИМ отведено первостепенное значение. Для решения поставленной задачи в диссертации принято, что развиваемый электромагнитный момент и частота вращения ротора в двигательном режиме определяют выходные параметры ВИМ, позволяют формировать улучшенные технико-экономические характеристики производственного оборудования (технологических машин).

В главе рассмотрены конструктивные особенности ВИМ, принципы работы, достоинства и недостатки, а также области применения ВИМ. Сформулированы цели и задачи исследования. Показано, что с расширением сфер применения ВИМ необходимость в совершенствовании методов проектирования возрастает, в частности, активной части – магнитной системы машины, и обуславливает многообразие подходов решения, связанных с разработкой и применением оптимизационных алгоритмов.

Во второй главе диссертации (с. 32...66) соискателем выполнен анализ существующих методик проектирования ВИМ, базой которых являются три основных подхода: энергетический, полевой и подход на основе расчета переходного процесса. Здесь же показана неэффективность их применения по ряду факторов для рассматриваемого вида электромеханических преобразователей (ЭМП). Несмотря на известные теоретические и практические исследования по созданию ВИМ с наилучшими энергетическими и технико-экономическими показателями, целесообразно, в перспективе, по мнению соискателя, использовать двухэтапный подход при проектировании, когда на предварительном этапе используется одна из известных методик проектирования, а на «завершающем этапе проводится оптимизация по заранее выбранному критерию», в частности, по величине среднего электромагнитного момента. Общей основой для всех упомянутых методик проектирования ЭМП является определение главных (конструктивных) размеров, расчет и проектирование которых базируется в основном на понятии «машинной постоянной» и магнитных материалах составляющих частей машины. В тексте диссертации приведены известные решения (варианты – соотношения для зубцового слоя существующих тяговых ВИД, табл. 2.1., с. 37) и кратко изложены основные положения по расчету: первой критической скорости, выбору величины воздушного зазора, определению обмоточных данных ВИД и т.д. Дан анализ особенностей применения полевого подхода при проектировании ВИМ с использованием пакетов программ ELCUT и ANSYS, FEMM, приведены также рекомендации отечественных и зарубежных ученых по созданию ЭМП (с. 34-37). Анализ

существующих методик проектирования показал, что «на современном этапе развития теории ВИМ» единой методики пока не предложено, что несколько сдерживает создание перспективных ВИД и распространение их на ряд областей техники.

Следует отметить, примерный расчет электромагнитного момента и конструктивных параметров ВИД выполнен соискателем с использованием разработанной программы «Оптимизация ВИМ» в среде Matlab, взаимодействующей с программой FEMM 4.2. В качестве методов оптимизации использовались два условно дополняющих метода: Монте – Карло (метод случайных «вбросов») и Нелдера – Мида (метод деформируемого многогранника, с. 49-66).

Замечание по второй главе. По тексту изложения и применения упомянутых методов в диссертации (с. 48), а также в представленной соискателем программе «Оптимизация ВИМ» для реализации метода Нелдера – Мида (с. 55), **нет пояснений:** почему, например, «константа»-коэффициент усечения (редукции), сжатия приняты равным 0,5 {при «стягивании» точек (т. G и W) в процессе анализа исходного треугольника с вершинами B, G, W (рис. 2.5). Можно ли «константа» - коэффициенты изменять (варьировать) программно в процессе вычислений и в каком целесообразном диапазоне для лучшего результата оптимизации? В этом случае возникает необходимость в оценке приближения к т. B и с каким «допуском» приближения работает программа «Оптимизация ВИМ», как изменяется и зависит (корректируется) «машинное время-время решения» - число итераций от принятого «порогового» времени, работает ли программа в диалоговом режиме с исследователем при поиске глобального экстремума?

В третьей главе диссертации (с. 69...115) выполнено исследование влияния отдельных фрагментов магнитной системы ВИД на среднее значение электромагнитного момента. Решаемая в диссертации задача представлена как **однокритериальная**. Проведенные исследования позволили определить влияние различных геометрических элементов активной части ВИД на среднее значение электромагнитного момента для трех разных двигателей, отличающихся количеством фаз и конфигурацией магнитных систем ВИД с соотношением зубцов статор/ротор: 6/4, 12/8; 6/6. Для более точного определения численного значения электромагнитного момента оптимизация проводилась в два этапа: методом Монте–Карло (для исключения нахождения локального экстремума), а затем с помощью метода Нелдера – Мида (для уточнения полученного значения). Для оптимизации рассматривались различные совокупности элементов магнитной системы ВИД {таблицы: (т. 3.2; т. 3.5; т. 3.8), получены конструктивные «значения оптимизируемых параметров» ВИМ, соответствующие максимуму (или минимуму) целевой функции ЦФ (таблицы: 3.3, 3.6; 3.9). При исходном значении радиуса по пазам $R2s = 63,5$ мм статора ВИД 6/4 получены разности «максимум – минимум» «оптимизированных» значений (при методе Монте-Карло) в диапазоне (58,74 – 56,12 мм), а методом Нелдера – Мида соответственно (58,63 – 56,07 мм), что соответствует среднему значению радиуса по пазам равному 57,43 мм (1 –й метод) и 57,33 мм (2-метод), т.е. расчетные величины средних значений $R2s$ отличаются не более, чем на 0,1 мм. Если сопоставить

исходное значение $R2s$ и «оптимизированное» среднее ($R2s$ по двум методам), то различие составит около 6мм, что изменяет (уменьшает) радиус по пазам на 10%.

По итогам исследований были проведены анализы результатов и выделены особенности, получены закономерности влияния каждого геометрического элемента на значение электромагнитного момента ВИМ (в порядке снижения влияния), например для первого в порядке исследования: $R2s$, $b2s$, $b1s$, $R2r$ и $b1r$, $b2r$. Аналогичные последовательности геометрических элементов были определены и для ВИМ: 2/8; 6/6, что позволило определить как общие, так и частные закономерности результатов выполненных исследований.

Замечания по третьей главе

1. Согласно п.п. 3 и 4 (с. 105) ширина зубцов статора и ротора ($b1s$ и $b1r$) оказывают существенное влияние на численное значение рассчитываемого момента ВИМ. Если сопоставить эти геометрические параметры ВИМ 12/8 (рис. 3.7, с. 97) и ВИМ 6/6 (рис. 3.10, с. 107), то влияние параметров исходной и оптимизированной активной части показано несколько противоречивое.

2. Если принять во внимание, что проектно-конструкторские (или организационно-технические) решения характеризуются обобщающим критерием - как критерий оптимальности (качества) создаваемого ВИД, то принятый критерий оптимальности в диссертации возможно *следует считать частным критерием качества*, и на него можно ориентироваться только с учетом влияния других частных критериев, например: коэффициента «надежности» (по нагреву изоляции обмоток, т.е. превышения температуры обмоток при продолжительном режиме S1 работы ВИД). Указанный частный критерий (по нагреву) желательно было бы применить в представленной диссертационной работе, поскольку изменение параметров радиуса статора по пазам ($R2s$), *например, на 10%*, ширины зубца статора ($b1s$), угла наклона боковой поверхности зубца статора ($b2s$), и других параметров ВИД может привести к изменениям - (*усечению*) вентиляционных каналов и расчетного значения - эквивалентного аэродинамического сопротивления воздухопровода машины, ($\text{Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6$), смене способа охлаждения ЭМП (по ГОСТ 20459-97), что обуславливает необходимость проведения анализа совокупного влияния и другого фактора оптимизации - «тепловентиляционного фактора».

На с. 107 диссертации есть упоминание о производстве расчетов поля температур активной части ВИД с учетом оптимизации геометрии параметров. Отмечено, что изменение геометрических параметров активной части ВИД в результате оптимизации незначительно влияет на тепловое состояние машины.

Если проанализировать пункты 1, 2, 5 (с. 111, 112) рекомендаций текста диссертации по улучшению активной части ВИМ в результате оптимизации, сопровождаемой:

- уменьшением радиуса расточки статора (параметра $R2s$) на 3,5... 10,5%;
- увеличением ширины зубца статора (параметра $b1s$) на 9%;
- увеличением ширины зубца ротора (параметра $b1r$) на 12...23%;
- увеличением наклона зубца статора (параметр $b2s$) на 14... 19,5%,

то *уменьшение* площади воздушного канала *предсказуемо*, что реально приведет к существенному изменению теплового режима работы ВИД.

Безусловно, в этом случае необходимо рассматривать вариант решения задачи уже при «*конфликтующих*» критериях, когда улучшение активной части ВИД может привести к снижению частного критерия «надежности» из-за нагрева изоляции. В диссертации также не оговорены (кроме неизменяемого значения воздушного зазора между зубцом статора и ротора, (с.72) и другие возможно влияющие переменные (факторы) на оптимальный выбор активной части ВИД, как, например, магнитная проницаемость и удельные потери применяемой тонколистовой (холоднокатаной) электротехнической стали (ГОСТ 21427.2 -83) и др., как указанные параметры повлияют на результат проектирования. Известно, что наличие конфликтующих критериев определяет физическую сущность задач оптимизации и, естественно, может *значительно усложнить* поиск наилучшего решения геометрии фрагментов ВИД.

В четвертой главе диссертации (с.116...133) выполнена постановка задачи экспериментальных исследований, дан анализ принятых допущений, имеющих место сегодня при проектировании ВИМ, и их влияние на конечные результаты. Экспериментальные исследования проводились на разработанной испытательной установке и по конкретной методике испытаний. Результаты экспериментальных исследований приведены в виде графических зависимостей для неоптимизированного и «оптимизированного» ВИД 6/6. (рис. 4.11 и рис. 4.12) и таблиц (4.2 и 4.3, с.127). Анализ результатов проведенных испытаний показал хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных, подтверждающие правомерность использования программы автоматизированного проектирования с применением оптимизационных алгоритмов проектирования ВИМ. На завершающем этапе главы соискателем выполнен примерный расчет экономической эффективности использования принятых технических решений по проектированию активной части ВИМ.

Замечания по четвертой главе

1. Естественно, при приведенной трактовке (в диссертации) экономического обоснования к применению ВИД с оптимальной магнитной системой (подраздел 4.5, с.130-133), но без учета электрических потерь и теплового фактора, вентиляционного расчета, принятое время работы двигателя (в день 16 ч.) с улучшенными параметрами может оказаться *завышенным* и *негативно* повлиять на срок службы технологического оборудования с приводами на базе ВИД в количестве 35 единиц, а также на ожидаемую (расчетную) годовую экономию 205275 руб.

2. По тексту диссертации не понятно, почему для испытания выбран ВИД конфигурации 6/6, который (при расположении зубцов статора и ротора в согласованном положении) имеет нулевые значения тангенциальной силы и отсутствие электромагнитного пускового момента.

Замечания по оформлению диссертации

При оформлении пояснительной записки имеют место нарушения ГОСТ Р 7.0.11-2011, в части:

- пункт 5.3.2. Основной текст разделен на главы и подразделы (а не параграфы), не выдержаны интервалы между заголовками и текстом по всей диссертации;
- пункт 5.3.3. Приведено сокращенное обозначение (рис. х) по всей диссертации. На с. 54 диссертации (рис. 2.8) – текст по вертикальной оси следует повернуть на 180 град.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа Шевкуновой Анастасии Владимировны «Совершенствование проектирования активной части вентильно-индукторной машины» отвечает критериям действующего «Положения о присуждении ученых степеней» (П. 9-14), является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей теоретическое и практическое значение с целью улучшения технических и эксплуатационных показателей электромеханических преобразователей – вентильно-индукторных машин.

Диссертационная работы выполнена соискателем самостоятельно и обладает внутренним единством, соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты и пунктам 1, 2, 3, 5 областей исследования.

Шевкунова Анастасия Владимировна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты.

Официальный оппонент:

Кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), профессор кафедры «Робототехника и мехатроника»



Николай Федорович Карнаухов

Почтовый адрес: 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», тел. 8-918-53-90-361, E-mail: nika811@bk.ru

Подпись Карнаухова Н.Ф.
удостоверяю:

Ученой секретарь Ученого совета  Владимир Николаевич Анисимов

«26» марта 2018 г.