

На правах рукописи



Богданов Александр Александрович

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ
АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2007

Работа выполнена на кафедре электропривода и электрооборудования
Электротехнического института Томского политехнического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Букреев В.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бейнарович В.А.

кандидат технических наук, доцент
Терехин В.Б.

Ведущая организация: ФГНУ Научно-исследовательский
институт автоматики и электромеханики,
г. Томск

Защита состоится «25» мая 2007 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета К 212.269.03 в ауд. 217 8-го учебного корпуса Томского политехнического университета по адресу: 634050, г.Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034 г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «24» апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Дементьев Ю.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Вентиляционные установки являются одним из самых распространенных типов промышленных механизмов. В системах жизнеобеспечения автономных объектов они играют важнейшую роль. В общем случае к электроприводу вентиляционных установок предъявляются достаточно мягкие требования по глубине регулирования, точности, быстродействию. Однако в случае электропривода вентиляционной установки автономного объекта на первое место выдвигаются повышенные требования по уровню вибрации, производительности, обеспечению требуемых показателей в условиях низкого качества питающего напряжения.

Применение в качестве приводного двигателя бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ) позволяет повысить надежность, улучшить энергетические показатели вентиляционной установки.

Вопросами исследования и моделирования электропривода с бесконтактным двигателем постоянного тока занимались Овчинников И.Е., Kenjo T., Miller T.J.E., Nagamori S. и др. Вибрационные и шумовые процессы в вентиляционных установках рассмотрены в работах Соломаховой Т.С., Караджи В.Г., Bolognani S. и др.

Анализ показал, что наиболее эффективным путем снижения уровня вибрации электрооборудования является их подавление в источнике их возникновения. При рассмотрении источников вибрации вентиляционной установки можно выделить: вибрации механического, электромагнитного и аэродинамического происхождения. Вибрации аэродинамического происхождения чаще всего минимизируются на этапе конструирования двигателя и вентилятора. Вибрации механического происхождения также в основном определяются конструкцией установки и пульсациями электромагнитного момента. Наиболее эффективной мерой снижения вибраций электромагнитного происхождения является их минимизация средствами системы управления электропривода. При этом наилучшего эффекта можно достичь при совместном применении конструктивных способов и методов управления, направленных на минимизацию электромагнитной вибрации и пульсации электромагнитного момента двигателя.

Все вышеизложенное и определяет актуальность вопросов, рассматриваемых в диссертации.

Цель работы и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в оптимизации регулятора широтно-импульсной системы управления электропривода, для снижения уровня вибрационных характеристик вентиляционной установки автономного объекта в условиях работы с источником питания ограниченной мощности.

Для достижения цели поставлены следующие основные задачи:

- выполнение анализа особенностей работы электроприводов вентиляционных установок автономных объектов и требований к ним;

- разработка математической и имитационной модели электропривода, позволяющей произвести оценку эффективности предложенных алгоритмов оптимизации;
- синтез структуры и алгоритма работы локально-оптимального регулятора, обеспечивающего минимизацию ошибки по вектору состояния электропривода;
- разработка структуры и алгоритма работы широтно-импульсного модулятора (ШИМ), позволяющего уменьшить уровень электромагнитной вибрации в области частот ШИМ;
- проведение исследования с целью доказательства эффективности разработанных алгоритмов управления на экспериментальной установке и имитационной модели.

Методы исследований

Для решения поставленных задач в работе использованы методы современной теории управления, пространства состояний, теория матричной алгебры и дифференциальных уравнений, численных методов математического моделирования. Имитационное моделирование выполнено в программной среде MATLAB 7.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель системы «коммутатор – бесконтактный двигатель постоянного тока» в пространстве состояний, позволяющая учесть нестационарность структуры системы и дискретность управляющего воздействия.
2. Синтезированы структура и алгоритм работы локально-оптимального регулятора, обеспечивающие уменьшение пульсаций электромагнитного момента путем минимизации ошибки регулирования по выходному вектору системы «коммутатор – бесконтактный двигатель постоянного тока» на интервале ШИМ.
3. Предложена структура широтно-импульсного модулятора с распределенной спектральной характеристикой, позволяющая уменьшить уровень электромагнитной вибрации электропривода в рабочей области частот ШИМ.

Практическая ценность

1. Разработана имитационная модель «система управления – коммутатор – бесконтактный двигатель постоянного тока» в среде MATLAB/Simulink, учитывающая нестационарность параметров электропривода вентиляционной установки на интервалах дискретности ШИМ и позволяющая производить расчет динамических и статических характеристик электропривода на этапе разработки.
2. Предложена методика синтеза локально-оптимального регулятора, учитывающая требования к вибрационным характеристикам вентиляционной установки и изменение напряжения питания электропривода. Приме-

нение такого регулятора, в сочетании с формированием вектора задания фазных токов, позволяет снизить пульсации фазных токов и момента, обусловленных периодической коммутацией обмоток БДПТ.

3. Разработана программно-аппаратная реализация широтно-импульсного модулятора с генерацией длительности периода следования импульсов по равномерному закону распределения в заданном диапазоне.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов подтверждается математическим обоснованием разработанных моделей, сопоставимостью результатов экспериментальных и теоретических исследований.

Реализация результатов работы

Результаты проведенных исследований используются при разработке электроприводов специального назначения в процессе выполнения научно-исследовательской работы в ОАО «НПЦ «Полус», а также в учебном процессе Томского политехнического университета при подготовке студентов по специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» и магистрантов по магистерской программе «Электроприводы и системы управления электроприводов».

Подтверждением реализации результатов диссертационной работы является наличие двух актов о внедрении.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель системы «коммутатор – бесконтактный двигатель постоянного тока».
2. Алгоритм синтеза локально-оптимального регулятора, обеспечивающий минимизацию ошибки регулирования по вектору состояния системы «коммутатор – бесконтактный двигатель постоянного тока» на интервале ШИМ.
3. Структура и алгоритм работы широтно-импульсного модулятора с распределенной спектральной характеристикой, позволяющие уменьшить уровень электромагнитной вибрации в области частот ШИМ.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы обсуждались на научных семинарах кафедры Электропривода и электрооборудования Томского политехнического университета, научно-техническом семинаре ОАО «НПЦ «Полус», на научно-технических конференциях «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (г. Томск, 2003–2004 гг.), всероссийских научно-технических конференциях «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (г. Бийск, 2002–2003 гг.), международной научно-технической конференции «Новые технологии управления движением технических объектов» (г. Новочеркасск, 2002 г.), междуна-

родной научно-технической конференции «Электротехника, электротехнические системы и комплексы» (г. Томск, 2003 г.), всероссийском студенческом научно-техническом семинаре "Энергетика: экология, надежность, безопасность" (Томск, 2003 г.), международных научно-технических конференциях «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2003–2004 гг.), всероссийских научно-технических конференциях «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2003 г.), научно-технических конференциях «Электронные и электромеханические системы и устройства» (г. Томск, 2004, 2006 гг.), международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (г. Барнаул, 2005 г.), всероссийской конференции – конкурса инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению «Энергетика и Энергосбережение» (г. Томск, 2006 г).

Публикации

Результаты выполненных исследований отражены в 22 печатных работах, в т.ч. в 16 тезисах докладов, 2 статьях в научно-технических журналах, депонированной рукописи, патенте РФ на полезную модель и авторском свидетельстве о регистрации программного продукта для ЭВМ и положительном решении о выдаче патента на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы – 160 страниц, в т.ч. рисунков – 77, таблиц – 6, библиография содержит 93 наименования, приложение – 1.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимой диссертационной работы, сформулированы цель работы, основные задачи, научная новизна и практическая ценность исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу режимов работы вентиляционной установки автономного объекта, требованиям к электроприводам вентиляционных установок и анализу способов снижения уровня вибраций в электроприводах с бесконтактными двигателями постоянного тока.

В общем случае вибрацию корпуса вентиляционной установки можно разделить на вибрацию механического, аэродинамического и электромагнитного происхождения. Вибрация аэродинамического происхождения может быть эффективно снижена лишь за счет применения конструктивных мер либо снижения производительности. К вибрации механического происхождения можно отнести вибрации, возбуждаемые подшипниками качения, несоосностью соединений, дисбалансом ротора и рабочего механизма. Интенсивность этих вибраций зависит, в том числе и от уровня пульсации электромагнитного момента и скорости двигателя. Электромагнитная вибрация обусловлена периодическими изменениями электромагнитных сил в зазоре, дис-

кредностью коммутации, ШИМ управляющего воздействия, неравномерностью магнитной системы двигателя

Вибрация механического происхождения должна быть максимально снижена конструктивными мерами, кроме этого необходимо уменьшить пульсации момента приводного двигателя средствами управления. По данным различных исследований доля электромагнитной вибрации в общем уровне может составлять до 30% (в зависимости от диапазона частот).

Одной из особенностей работы электрооборудования автономного объекта может являться ограниченность мощности источника питания. Нередко мощность источников питания автономных объектов ограничена и соизмерима с мощностью потребителей. Вследствие этого, с одной стороны, происходит влияние режимов работы электрооборудования на характер изменений и значения выходных (энергетических) координат источника питания, с другой стороны, происходит ухудшение качества функционирования электроприводов, получающих энергию от данного источника питания. Если от общего источника питания получают энергию ряд потребителей, то вследствие указанных факторов может возникнуть взаимосвязь между процессами в различных системах через общий источник питания.

Применение в ответственных электроприводах бесконтактных двигателей постоянного тока является одним из радикальных путей повышения надежности, расширения функциональных возможностей и улучшения общих характеристик установки. Это определяется такими преимуществами БДПТ, как высокая надежность, высокий коэффициент полезного действия, высокое соотношение мощность/масса. Наибольшее распространение получила конструкция БДПТ на базе трехфазного синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. Одним из путей улучшения характеристик ответственных электроприводов является применение БДПТ с многофазным вариантом обмотки.

Особенности силовой схемы БДПТ, а именно включение последовательно с секциями обмотки полупроводниковых ключей, вносят определенную специфику в электромагнитные процессы. Поскольку пути тока в коммутационном и внекоммутационном участках периода коммутации различны, то двигатель можно представить как систему с переменной структурой, описываемую в разные интервалы времени разными системами дифференциальных уравнений. Наиболее точное, математическое описание БДПТ можно получить, решая дифференциальные уравнения, описывающие состояние цепей двигателя на отдельных участках периода коммутации в зависимости от угла поворота ротора.

В общем случае повышенный уровень электромагнитной вибрации БДПТ связан с ШИМ-регулированием и дискретным переключением фаз двигателя коммутатором. Возможной мерой снижения уровня вибрации на частоте ШИМ является использование частот модуляции выше нормируемого уровня либо частотная модуляция по случайному закону. Снижение уровня вибраций механического и электромагнитного происхождения в области

частоты коммутации возможно путем формирования токов определенной формы.

Вторая глава посвящена разработке математической модели объекта управления: бесконтактного двигателя постоянного тока, коммутатора, вентилятора, а также математическому описанию электромагнитных вибраций корпуса двигателя.

Выбор системы моделирования в пользу среды MATLAB/Simulink сделан вследствие возможности представления электромеханической системы в форме пространства состояний, использования матричных вычислений, визуального представления имитационной модели. При некоторых допущениях и, учитывая особенности БДПТ, модель системы «коммутатор - БДПТ» с широтно-импульсной модуляцией питающего напряжения представлена в виде дискретной нестационарной системы:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A(k) \cdot x(k) + B(k) \cdot u(k) \\ y(k) &= C(k) \cdot x(k) \end{aligned} \quad (1)$$

где $A(k)$, $B(k)$, $C(k)$ – матрицы параметров соответствующей размерности; $x(k)$ – 4-мерный вектор состояния; $y(k)$ – 4-мерный выходной вектор системы (рассматривается частный случай, когда измеряется вектор состояния и $C(k)$ – единичная матрица); $u(k)$ – 2-мерный вектор внешних воздействий; параметр k определяет момент времени $t = t_0 + k \cdot T$ (T – период дискретизации модели),

$$y(k) = x(k) = \begin{bmatrix} i_{ab}(k) \\ i_{bc}(k) \\ i_{ca}(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix}, \quad u(k) = \begin{bmatrix} M_C(k) \\ U_{\text{пит}}(k) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$i_{ab}(k)$, $i_{bc}(k)$, $i_{ca}(k)$ – контурные токи; $\omega(k)$ – частота вращения ротора; $M_C(k)$ – момент нагрузки; $U_{\text{пит}}(k)$ – напряжение питания. Схема замещения БДПТ и коммутатора в общем виде приведена на рис. 1.

В соответствии со 120-градусной коммутацией фаз двигателя в зависимости от угла поворота имеется 6 возможных состояний ключей инвертора, которые определяют внекоммутационные интервалы работы системы. Внекоммутационный интервал является основным рабочим интервалом, в те-

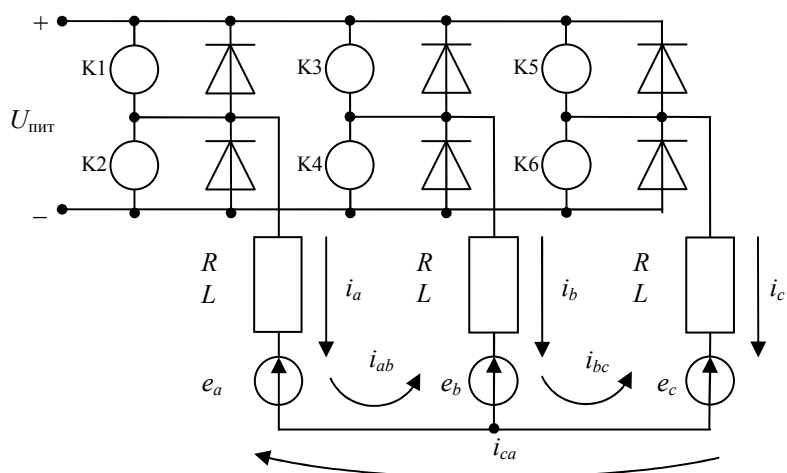


Рис. 1. Схема замещения коммутатора и БДПТ

чение которого ток протекает только по открытым транзисторным ключам. В этом режиме две фазы двигателя оказываются последовательно подключены к источнику питания, а третья фаза отключена. Внекоммутационному интервалу

валу предшествует коммутационный интервал, в котором токи протекают не только по фазам, подключенным к источнику питания транзисторными ключами, но и по фазе, отключаемой от него.

На основе уравнений для контуров формирующихся при коммутации ключей К1 – К6 (рис. 1) в зависимости от положения ротора, выражений для ЭДС взаимоиндукции и уравнения движения электропривода были составлены матрицы параметров $A_{(n)}(k)$ и $B_{(n)}(k)$, где n – индекс интервала функционирования системы. Для моделирования БДПТ с ШИМ питающего напряжения в матрицы $B_{(n)}(k)$ введен параметр l , определяющий состояние ШИМ:

$$l = \begin{cases} 1 & \text{при } t_j \leq t(k) < t_j + \tau(k) \\ 0 & \text{при } t_j + \tau(k) \leq t(k) < t_j + T_{\text{ШИМ}} \end{cases} \quad (3)$$

т.е. модулятор в течение каждого периода $T_{\text{ШИМ}}$ открывает силовые ключи на интервал времени $[t_j, t_j + \tau(k)]$ и закрывает их на интервал $[t_j + \tau(k), t_j + T_{\text{ШИМ}}]$, где t_j – точка разбиения всего временного интервала на периоды ШИМ; $\tau(k)$ – продолжительность включения ключа. При этом выполняется условие

$$T_{\text{ШИМ}} = \beta \cdot T, \quad (4)$$

где β – целое вещественное число.

При необходимости учета несинусоидальности обратных ЭДС и нелинейности магнитной системы двигателя возможно описать форму ЭДС и зависимости момента от токов в виде произвольных периодических функций, которые могут быть заданы таблично. Математическая модель (1) реализована в виде имитационной модели в среде MATLAB/Simulink (рис. 2). Модель состоит из следующих подсистем: **Matrixes** – подсистема формирования матриц параметров; **Discrete State-Space Core** – подсистема расчета модели в пространстве состояний; **Measurement** – подсистема измерений; **Position Sensor** – датчик положения. Разработанная модель может быть используется для анализа работы электропривода на больших и малых временных интервалах, анализа пульсаций токов и момента и построения модели электромагнитных вибраций двигателя. Адекватность разработанной имитационной модели электропривода подтверждается путем сравнения динамических и статических характеристик электропривода полученных экспериментальным и расчетным путем (рис. 3).

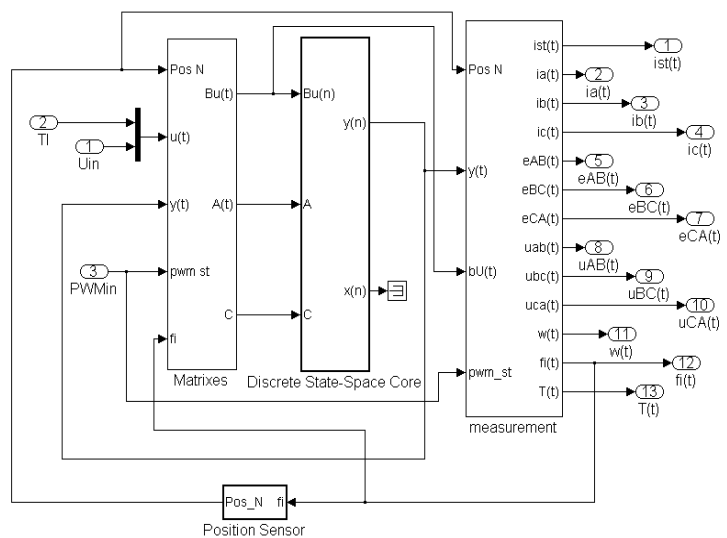


Рис. 2. Имитационная модель системы «коммутатор-БДПТ» в среде Simulink

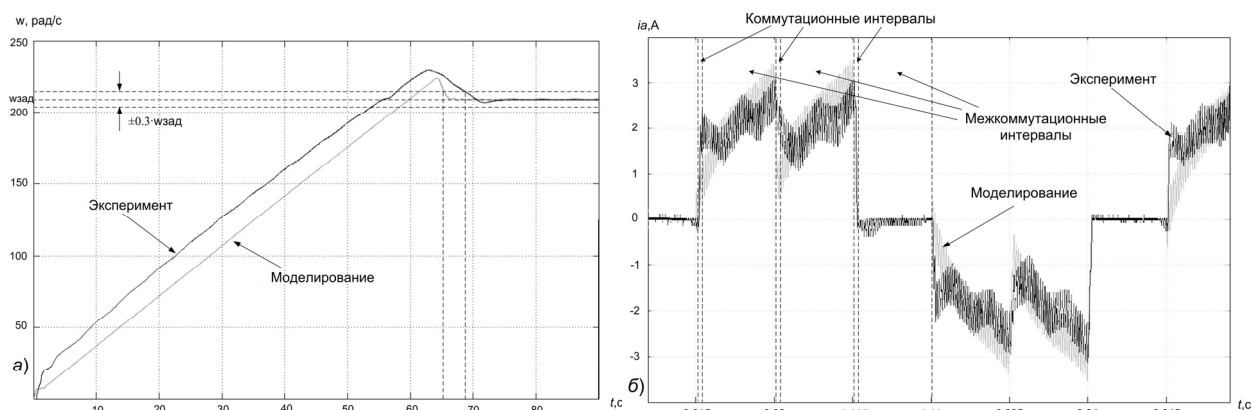


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и смоделированных характеристик электропривода: *а* – переходные процессы скорости; *б* – осциллограмма фазного тока

Сравнительная оценка адекватности модели и экспериментальной установки показала, что при пуске максимальное расхождение результатов моделирования и эксперимента (время переходного процесса и перерегулирование) составляет не более 5%. Сравнение осциллограмм тока потребления и фазного тока показало расхождение результатов (среднее и амплитудное значение тока) не более 15%.

Разработанная математическая модель была применена в ОАО «НПЦ «Полус» при разработке системы управления низкоскоростного электропривода крышки светозащитного устройства ВЭП-10 и при разработке электропривода насоса ВЭПр-5,5. Применение данной модели позволило значительно сократить сроки отработки алгоритма управления и сроки разработки приборов.

Для расчета мгновенных значений параметров вибрации статора двигателя (виброперемещение, виброскорость, виброускорение) используется методика, основанная на рассмотрении ярма и сборки «статор — корпус» в виде тонкого кольца, на которое действуют периодически изменяющиеся во времени и симметрично-распределенные по окружности силы. Механическая модель магнитопровода с учетом допущений приведена к одностепенной колебательной системе, для которой дифференциальное уравнение движения массы имеет вид

$$m \cdot d^2s/dt^2 + r \cdot ds/dt + s(t)/\lambda = F_{\text{возб}}(t), \quad (5)$$

где m – масса кольца; r – коэффициент внутреннего трения; λ – податливость в радиальном направлении; $F_{\text{возб}}(t)$ – возбуждающая сила; слагаемые в выражении (5): $m \cdot d^2s/dt^2$ – сила инерции; $r \cdot ds/dt$ – сила трения; s/λ – сила упругости. В качестве возбуждающих сил выбираются проекции радиальных сил действующих на статор двигателя на оси X и Y .

Полученная математическая модель вибрации БДПТ, вызванной электромагнитными силами, используется для целей сравнительного анализа влияния различных способов управления на уровень вибрации корпуса двигателя.

Третья глава посвящена синтезу регулятора и разработке алгоритмов системы управления электропривода.

Исходя из требований по минимизации уровня вибраций и пульсации момента при обеспечении заданной производительности вентиляционной установки критерий оптимальности формулируется в виде

$$G = \int_0^t z^T(t) W z(t) dt, \quad (6)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} |\omega^*(t) - \omega(t)| \\ a_{VCP} \\ M_{\Pi} \end{bmatrix},$$

где первый элемента вектора $z(t)$ (отклонение частоты вращения $\omega(t)$ от заданной $\omega^*(t)$) определяет учет требований по производительности вентиляционной установки, значение a_{VCP} отражает значение общего уровня виброускорения; M_{Π} – значение общего уровня пульсации момента; W – диагональная весовая матрица, элементы которой определяются из требований к производительности, вибрации, пульсации момента

$$w_{11} = 1/(\Delta\omega_{LIM})^2, w_{22} = 1/(a_{VLIM})^2, w_{33} = 1/(M_{LIM})^2, \quad (7)$$

где $\Delta\omega_{LIM}$ – допустимое отклонение частоты вращения от заданной (определяет отклонение от заданной производительности); a_{VLIM} – допустимое значение виброускорения; M_{LIM} – допустимое значение пульсации электромагнитного момента.

Записанный критерий предназначен для оценки оптимальности работы вентиляционной установки, в то время как синтез регулятора целесообразно производить исходя из локального критерия, включающего непосредственно регулируемые переменные состояния.

С целью снижения уровня электромагнитной вибрации и пульсаций момента предложено синтезировать регулятор, обеспечивающий формирование фазных токов. интервале ШИМ. Локальный критерий качества такого регулятора может быть записан

$$G_0 = \int_t^{t+T_{\text{ШИМ}}} z_0^T(t) W_0 z_0(t) dt = \min, \quad (8)$$

где W_0 – весовая матрица (в частном случае $W_0 = I$); z_0 – вектор рассогласования регулируемых переменных состояния

$$z_0(t) = y^*(t) - y(t). \quad (9)$$

Для синтеза регулятора длительность функционирования системы «коммутатор - БДПТ» разбивается на интервалы дискретности ШИМ, внутри каждого из которых поведение объекта управления описывается дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_{(n)}(t, l=1) \cdot x(t) + B_{(n)}(t, l=1) \cdot u(t) \quad \text{при} \quad t \in [t_j, t_j + \tau_j], \\ \dot{x}(t) &= A_{(n)}(t, l=0) \cdot x(t) + B_{(n)}(t, l=0) \cdot u(t) \quad \text{при} \quad t \in [t_j + \tau_j, t_j + T_{\text{ШИМ}}], \\ t &= k \cdot T = j \cdot T_{\text{ШИМ}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Управление системой «коммутатор-БДПТ» осуществляется за счет выбора последовательности значений $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_j$, (интервал формирования

управляющего воздействия – длительность импульса ШИМ, определяющая длительность открытого состояния соответствующего ключа коммутатора).

Задача управления формулируется как определение последовательности значений $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_j, \dots$, при которой на каждом интервале времени $T_{\text{ШИМ}}$ обеспечивается минимум критерия (8). Из этих условий получено выражение для значения длительности формирования управляющего воздействия:

$$\tau_j = \begin{cases} 0 & \text{при } k_{\text{ШИМ}} \cdot p(x(j)) < 0 \\ k_{\text{ШИМ}} \cdot p(x(j)) & \text{при } 0 < k_{\text{ШИМ}} \cdot p(x(j)) < T_{\text{ШИМ}}, \\ T_{\text{ШИМ}} & \text{при } T_{\text{ШИМ}} < k_{\text{ШИМ}} \cdot p(x(j)) \end{cases} \quad (11)$$

где:

$$p(x) = (y^* - q_{(n)0}(x)) / q_{(n)1}(x), \quad q_{(n)0}(x) = c^T (F_{(n)0}x + h_{(n)0}), \quad q_{(n)1}(x) = c^T (F_{(n)1}x + h_{(n)1}), \quad (12)$$

c^T – вектор-строка, отражающий включение в состав $y(t)$ измеряемых или желаемых компонентов вектора состояния; $F_{(n)0}, F_{(n)1}, h_{(n)0}, h_{(n)1}$ – матрицы коэффициентов линеаризованных выражений для дискретной (на интервале ШИМ) модели объекта управления, вычисляются на основе матриц уравнений (10); $k_{\text{ШИМ}}$ – коэффициент коррекции усиления ШИМ (при отсутствии дополнительной коррекции $k_{\text{ШИМ}} = 1$).

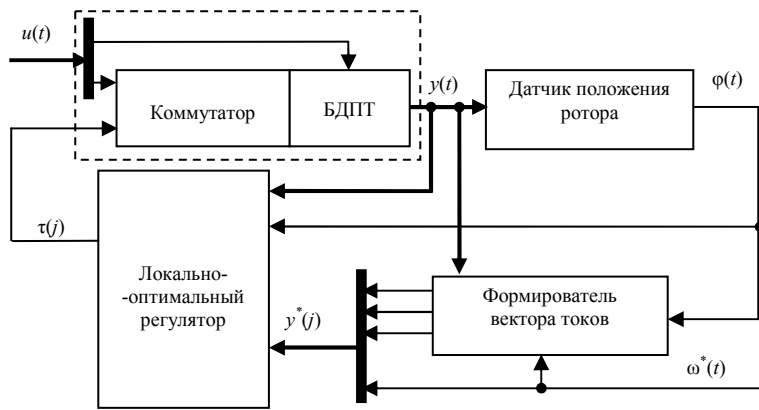


Рис. 4. Функциональная схема электропривода с локально-оптимальным регулятором и формирователем вектора задания

Вариант функциональной схемы электропривода с регулятором предлагаемого вида представлен на рис. 4. Формирователь вектора токов генерирует вектор задания на контурные токи, исходя из желаемой формы электромагнитного момента. Рассмотренный синтез локально-оптимального регулятора произведен из предположения постоянства вектора входных воздействий $u(t)$.

В общем случае при изменении компонент вектора $u(t)$ локально-оптимальный регулятор может не обеспечить минимум ошибки вектора состояния на интервале ШИМ. Исходя из необходимости уменьшения влияния изменений напряжения питания на пульсации фазных токов электропривода, производится адаптация регулятора к такого рода возмущениям. Компенсация возмущений осуществляется за счет коррекции коэффициента усиления ШИМ $k_{\text{ШИМ}}$.

$$k_{\text{ШИМ}}(t) = g(d^T \cdot u(t)), \quad (13)$$

где $g(d^T \cdot u(t))$ – корректирующая функция; d – вектор-столбец, элементы которого при условии измеряемости напряжения питания имеют вид

$$d = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Структура системы управления электропривода с коррекцией управляющего воздействия представлена на рис. 5. Для обеспечения инвариантности выходного сигнала ШИМ-усилителя относительно значения питающего напряжения $U_{\text{пит}}(t)$ корректирующая функция выбирается из условия:

$$g(U_{\text{пит}}(t)) = U_{\text{пит}}(t) / U_{\text{питном}}. \quad (14)$$

Для снижения уровня вибраций на частоте основной гармоники ШИМ-модулятора предлагается вариант ШИМ с распределенной спектральной характеристикой. Функциональная схема ШИМ-модулятора, реализующая алгоритм формирования значений $T_{\text{ШИМ}}$ по псевдослучайному закону приведена на рис.6 (положительное решение о выдаче патента на изобретение по заявке №2006109995. Приоритет от 28.03.2006г.),

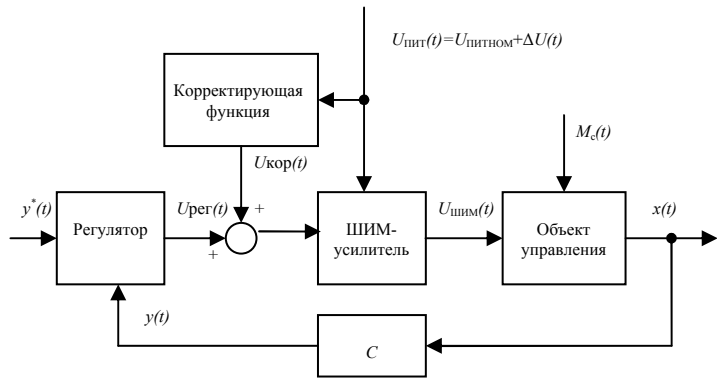


Рис. 5. Включение корректирующей функции в структуру системы управления

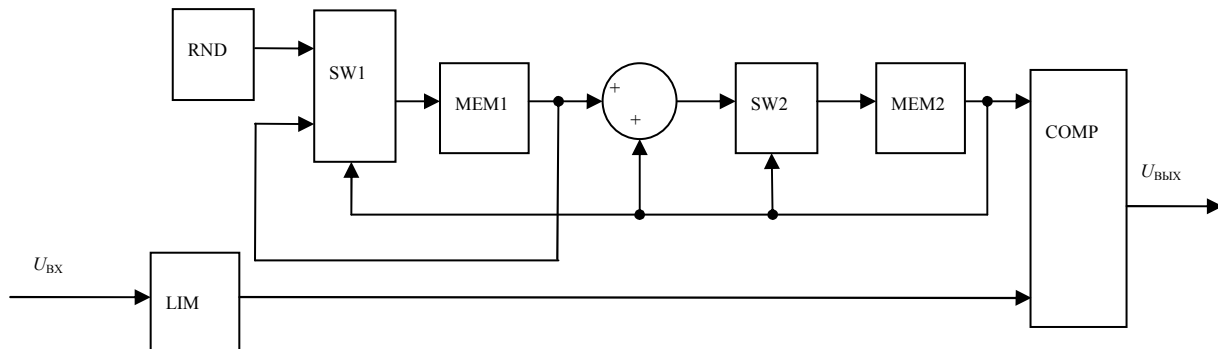


Рис. 6. Функциональная схема ШИМ с распределенной спектральной характеристикой

где RND – генератор псевдослучайных чисел; SW1, SW2 –блоки переключения; MEM1, MEM2 – регистры памяти; COMP – компаратор. Временная диаграмма работы модулятора приведена на рис. 7.

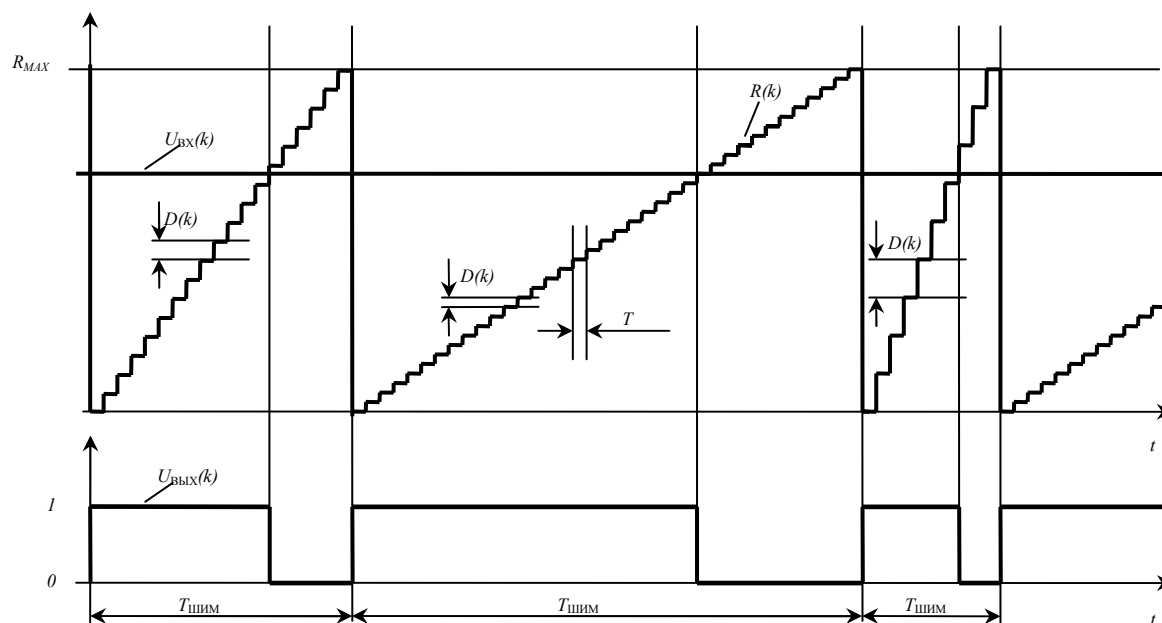


Рис.7. Временная диаграмма работы модулятора

Генератор псевдослучайных чисел формирует значение приращения $D(k)$ в заданном диапазоне (D_{MIN} ; D_{MAX}), определяемым желаемыми пределами изменения периода ШИМ. На выходе MEM2 формируется пилообразный сигнал $R(k)$, темп его нарастания на каждом периоде определяется величиной $D(k)$, амплитуда ограничена на постоянном уровне R_{MAX} . На компараторе пилообразный сигнал $R(k)$ сравнивается с входным сигналом модулятора $U_{ВХ}(k)$ и формируется ШИМ-последовательность $U_{ВЫХ}(k)$ с переменным периодом следования импульсов $T_{ШИМ}$.

В четвертой главе приведено описание экспериментальной установки, приведены результаты экспериментов и моделирования, даны рекомендации по практической реализации предложенного регулятора.

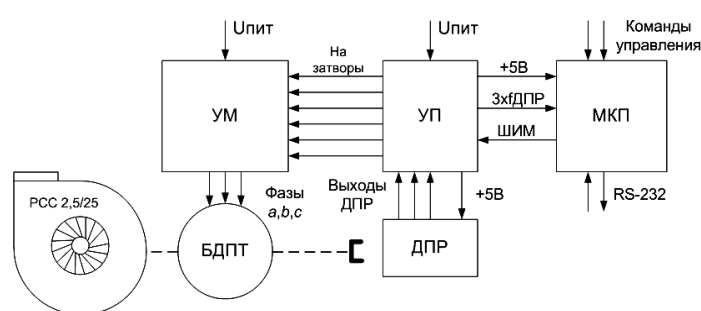


Рис. 8. Функциональная схема экспериментальной установки.

Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рис. 8, где УП – устройство преобразования сигналов управления; УМ – усилитель мостовой; МКП – плата микроконтроллера; ДПР – датчик положения ротора. Номинальные значения основных параметров электропривода приведены в табл. 1.

Таблица 1

Название параметра	Значение
Потребляемая мощность, Вт (при $U_{ПИТ}=220В$)	550
Производительность, м ³ /с (м ³ /ч)	0,07 (250)
Полное давление, кг/м ² (Па)	250 (2450)
Частота вращения, рад/с (об/мин)	314 (3000)

Внешний вид экспериментальной установки приведен на рис. 9.

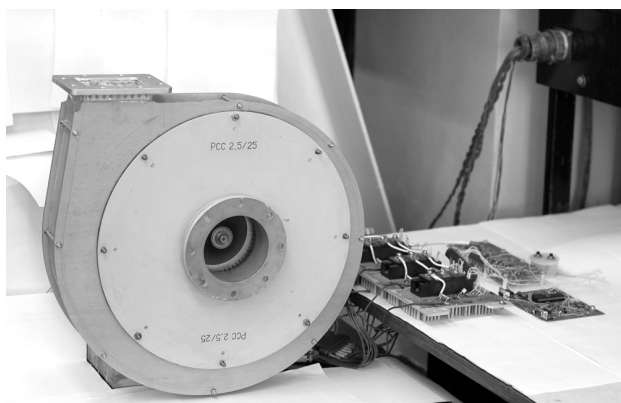


Рис. 9. Внешний вид экспериментальной установки

Исследования эффективности применения локально-оптимального регулятора с формированием токов и адаптацией к изменению напряжения питания для улучшения вибрационных характеристик электропривода были проведены на имитационной модели вентиляционной установки. На рис.10 приведено сравнение спектрограммы виброускорений A_v (в дБ относительно 1мкм/с^2) для случая использования синтезированного

локально-оптимального регулятора с формированием вектора фазных токов и спектрограммы для случая использования ПИД-регулятора. Пиковые значения виброускорений на гармониках коммутационной частоты отличаются незначительно, однако фоновый уровень виброускорения при использовании локально-оптимального регулятора ниже на 10-12дБ (в 3,1–4 раза). Снижение общего уровня виброускорения в рассматриваемой полосе частот составляет около 8дБ (в 2,5 раза).

A_v , дБ

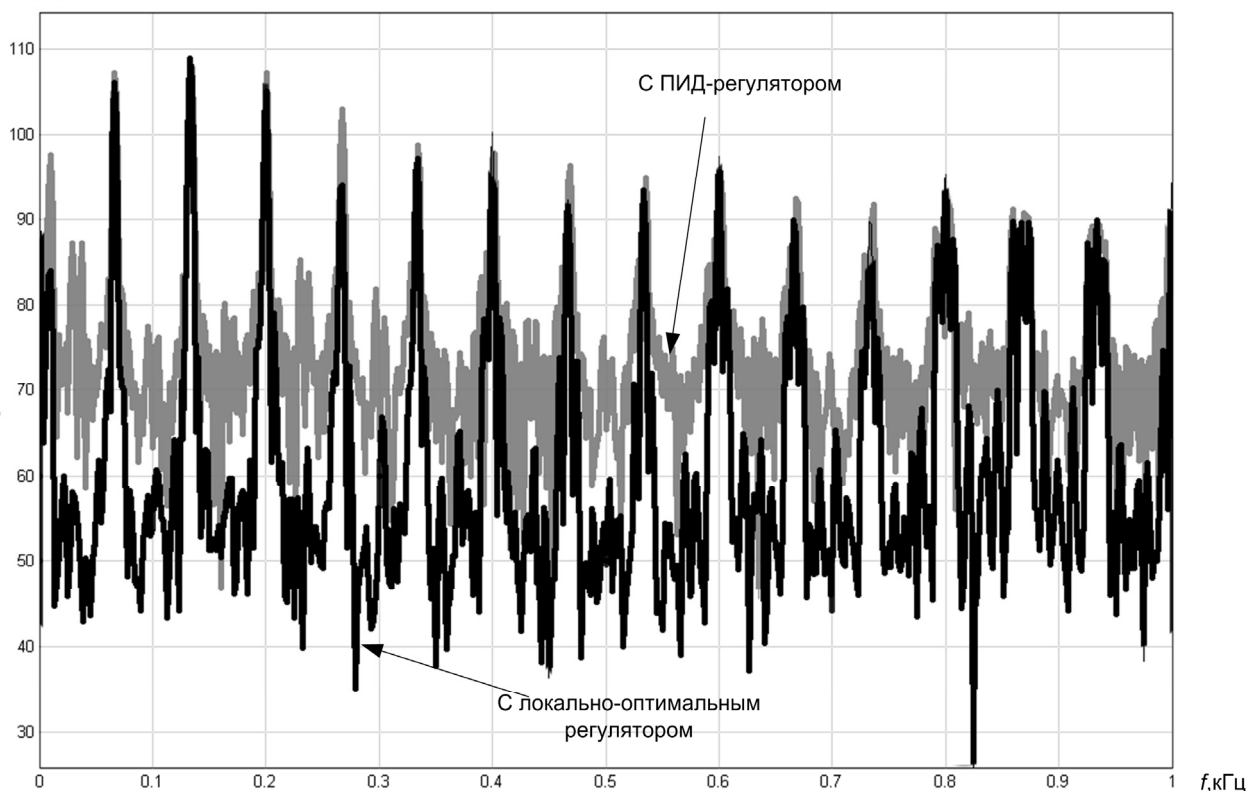


Рис. 10. Сравнение спектра виброускорения при использовании локально-оптимального регулятора с формированием фазных токов и при использовании ПИД-регулирования тока потребления и скорости электропривода

На рис. 11 приведено сравнение спектрограммы уровней переменной составляющей электромагнитного момента M_{Π} (в дБ относительно 1мкН·м) для случая использования синтезированного локально-оптимального регулятора с формированием вектора фазных токов и спектрограммы для случая использования ПИД-регулятора. Видно снижение уровня пульсаций момента на 1–4 гармониках коммутационной частоты на 10–18дБ (в 3,1–8 раз). Сравнительная численная оценка функционирования системы приводится в табл. 2, где a_{vs} и M_{Π} – средний уровень виброускорения и пульсаций момента в диапазоне частот 0–1кГц; G – значение глобального функционала качества (6); G_0 – значение локального функционала качества (8).

Таблица 2

Тип управления	a_{vs} , дБ	M_{Π} , дБ	G	G_0
ПИД-регулирование	75	83	1251	6,23
Локально-оптимальное управление	63	74	945	1,76

Применение локально-оптимального регулятора позволяет уменьшить средний уровень виброускорений на 12 дБ (в 4 раза) и пульсаций момента – на 9 дБ (в 2,8 раза).

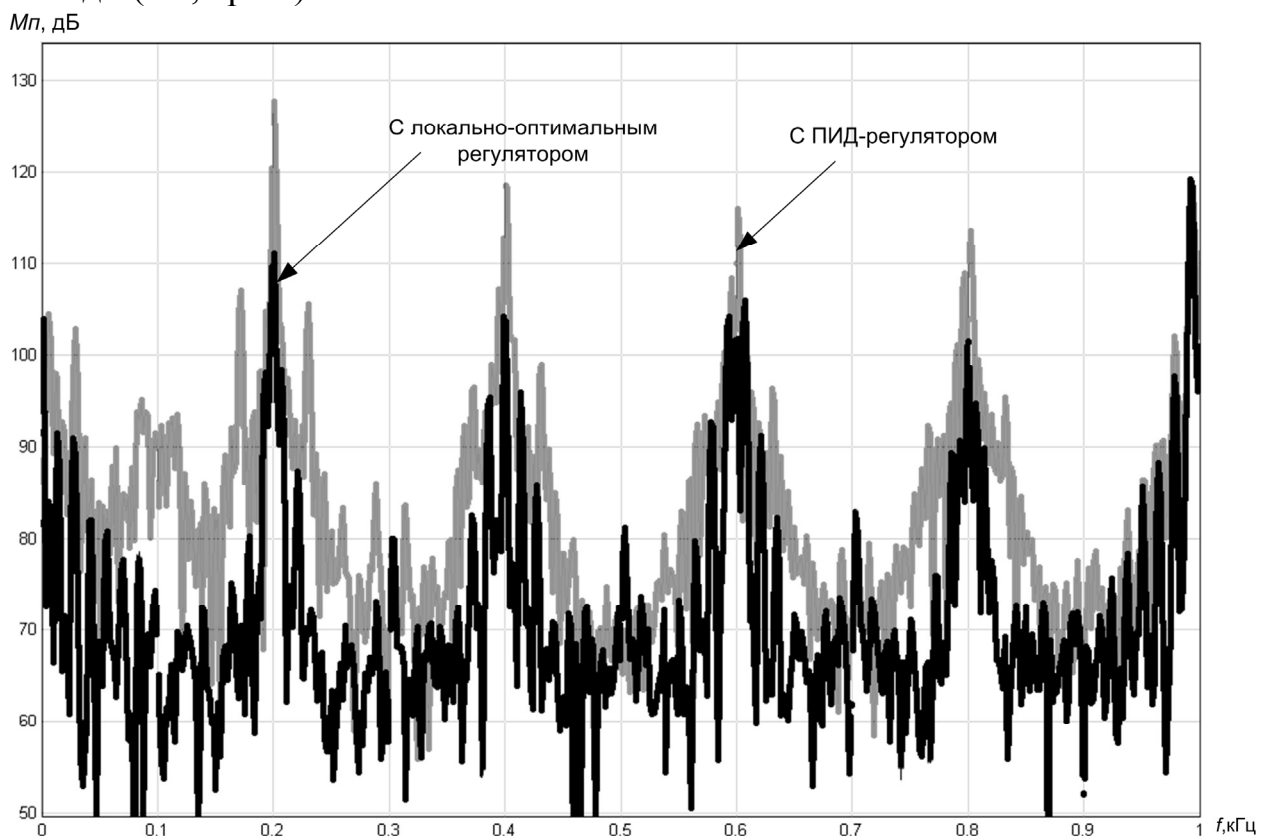


Рис. 11. Сравнение спектра пульсаций момента при использовании локально-оптимального регулятора с формированием фазных токов и при использовании ПИД-регулирования тока потребления и скорости электропривода

Для определения эффективности работы регулятора при наличии возмущающего воздействия со стороны источника питания (имитация влияния параллельно работающих потребителей на источник питания) было проведе-

но моделирование режима с переменной составляющей напряжения $U_{\text{пит}}=260\pm30\text{В}$, частота переменной составляющей $f_{\text{пит}}=400\text{Гц}$. Наличие пульсации фазного тока на внекоммутационном интервале вызывает пульсации электромагнитного момента. Применение адаптации регулятора к изменению напряжения питания существенно снижает амплитуду пульсаций момента. Сравнительная численная оценка функционирования системы при наличии пульсаций напряжения питания приводится в табл. 3.

Таблица 3

Тип управления	a_{VS} , дБ	M_{Π} , дБ	G	G_0
Без адаптации	66	78	1004	3,18
С адаптацией к возмущению	64	75	972	1,84

Исследования показали, что при использовании адаптации регулятора к возмущению со стороны источника питания снижение среднего уровня пульсаций момента, вызванных пульсациями напряжения, составляет 3дБ (в 1,4 раза).

Исследования ШИМ с распределенной спектральной характеристикой были проведены на экспериментальной установке и имитационной модели. Результаты экспериментов показали отсутствие отличий основных параметров работы (производительность, потребляемая мощность) электропривода с предложенным ШИМ от параметров электропривода с ШИМ с фиксированной частотой. Уровни виброускорений корпуса электровентилатора в направлении X , приведены на рис. 12. Точка измерения виброускорения расположена в области подшипникового узла.

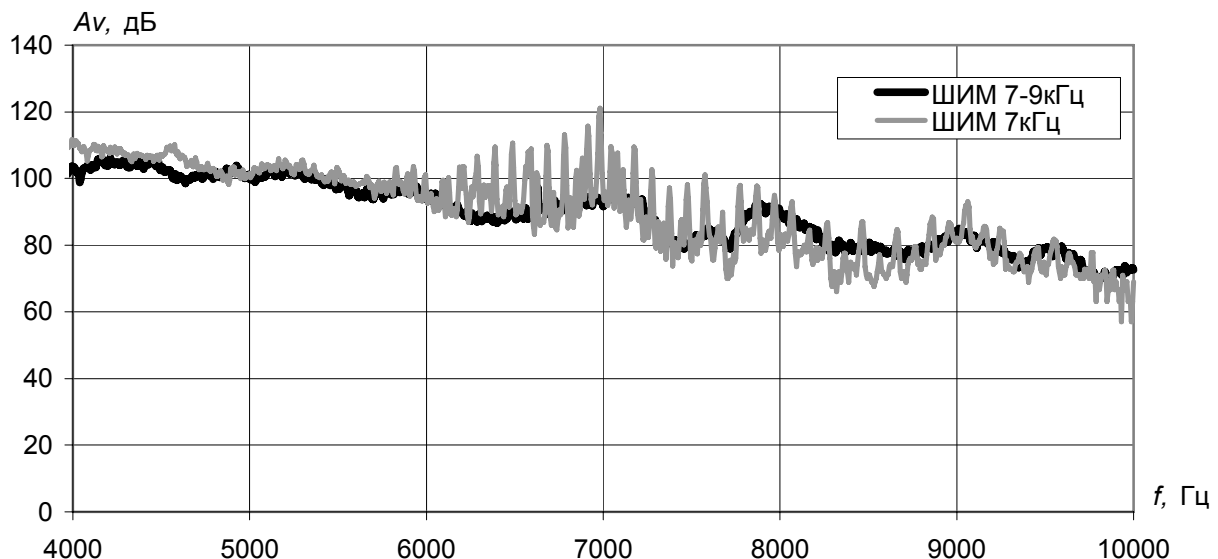


Рис. 12. Сравнение спектра виброускорений при использовании ШИМ с распределенным спектром и при использовании ШИМ с частотой 7 кГц

Применение ШИМ с распределенным частотным спектром (в диапазоне 7–9кГц) при прочих равных условиях уменьшает пиковые значения амплитуды виброускорений на 10–20дБ (в 3,1–10 раз) диапазоне частот от 6 до 7,5кГц и на 4–9дБ (в 1,58–2,8 раза) в диапазоне 7,5–9кГц. Программно-

аппаратная реализация разработанного ШИМ используется в макетном образце разрабатываемого в ОАО «НПЦ «Полюс» электропривода насоса ВЭПр-5,5.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель системы «коммутатор – БДПТ», учитывающая нестационарность структуры и дискретность реального объекта. Модель пригодна для анализа статических и динамических режимов работы электроприводов с БДПТ. Кроме того, полученная модель может быть использована как для синтеза классических регуляторов, так и для синтеза локально-оптимальных (на интервале коммутации или на интервале ШИМ) систем управления БДПТ.
2. Разработана математическая модель вибрации БДПТ, вызванной электромагнитными силами. Модель может быть использована для целей сравнительного анализа влияния различных способов управления на уровень вибрации корпуса двигателя.
3. Синтезирован локально-оптимальный регулятор, обеспечивающий минимизацию ошибки регулирования по вектору состояния объекта управления на интервале ШИМ. Применение данного регулятора в сочетании с формированием вектора задания для фазных (контурных) токов двигателя позволяет снизить пульсации фазных токов и момента обусловленные коммутацией. Компенсация возмущающего воздействия со стороны источника питания за счет коррекции усиления ШИМ позволяет снизить уровень пульсации фазных токов и момента, обусловленных периодическими помехами со стороны источника питания. Исследования разработанного регулятора на имитационной модели показало снижение пиковых значений пульсаций момента на 1–4 гармониках коммутационной частоты на 10–18дБ, среднего уровня виброускорений – на 12 дБ, среднего уровня пульсаций момента – на 9 дБ.
4. Предложены структура и алгоритм работы широтно-импульсного модулятора с распределенной спектральной характеристикой позволяющие снизить общий уровень электромагнитной вибрации в области частот ШИМ. Исследования разработанного ШИМ, проведенные на экспериментальной установке и на имитационной модели, показали уменьшение пиковых значений амплитуды виброускорений в области частоты ШИМ на 10–20дБ.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. Букреев В.Г., Богданов А.А. Математическое моделирование бесконтактного двигателя постоянного тока с распределенными обмотками // Сборник материалов 3-й всероссийской научно-технической конференция "Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях", Бийск, 2002. –С. 16-18.
2. Богданов А.А., Чарухин А. Г. Имитационная модель многофазного бесконтактного двигателя постоянного тока с широтно-импульсной

- модуляцией управляющего воздействия. // Сборник материалов IX-й международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии", Т.1. Томск, 2003. –С. 273-274.
3. Букреев В.Г., Богданов А.А. Система управления бесконтактным двигателем постоянного тока. Патент на полезную модель №45213. Роспатент. Москва. Приоритет от 23.11.2004.
 4. Букреев В.Г. Леонов С.В. Богданов А.А. Чарухин А.Г. Некоторые вопросы моделирования бесконтактных двигателей постоянного тока с распределенными обмотками // Деп. в ВИНТИ 02.06.03, № 1075-B2003. –2003. -С. 1-26.
 5. Букреев В.Г., Шинякова Г.П., Богданов А.А. Цифровая система управления многофазным бесконтактным двигателем постоянного тока // Сборник материалов 4-й Всероссийской научно-технической конференции "Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях". Бийск, 2003. –С. 20-23.
 6. Богданов А.А., Букреев В.Г., Шинякова Г.П. Программа управления коммутатором трехфазного бесконтактного двигателя постоянного тока. Авторское свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2003612651. Роспатент. Москва. 04.12.2003 г.
 7. Богданов А.А, Шинякова Г.П. Цифровая система управления электропривода // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», ФГУП НПП «Полус», Томск, 2004. –С.8-9.
 8. Богданов А.А. Дискретная математическая модель бесконтактного двигателя постоянного тока // Сборник трудов международной научно-технической конференции "Измерение, контроль, автоматизация", Барнаул: АлтГТУ, 2005. –С.59–63.
 9. Букреев В.Г., Богданов А.А., Соснин С.К., Чашин А.К. Локальная оптимизация дискретных электромеханических систем // Известия Томского политехнического университета. – 2005. –№5, –С.133–136.
 10. Богданов А.А., Шинякова Г.П., Букреев В.Г. Положительное решение о выдаче патента на изобретение «Цифровой широтно-импульсный модулятор с распределенной спектральной характеристикой» (заявка №2006109995. Приоритет от 28.03.2006г.)
 11. Богданов А.А. Применение дискретно-фазового способа управления в низкоскоростном электроприводе с бесконтактным двигателем постоянного тока // Сборник тезисов докладов XVII научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», ФГУП «НПП «Полус». Томск, 2006. –С.195-197.
 12. Богданов А.А. Синтез оптимального регулятора электропривода с бесконтактным двигателем постоянного тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2006. –№3. –С. 61-63.

13. Богданов А.А. Оптимальная система управления электропривода вентиляционной установки // Материалы всероссийского конкурса-конференции инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению «Энергетика и энергосбережение». Томск: ТПУ, 2006. –С. 56-60.

Личный вклад автора

Пять работ написано автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежит: математическое описание двигателя [1] (80%), разработка программного обеспечения [2, 5–7] (75%), разработка структуры системы управления [3,7] (75%), анализ особенностей применения многофазных бесконтактных двигателей постоянного тока [4] (40%), алгоритм работы и структура ШИМ [10] (80%), имитационное моделирование [9] (25%).

Подписано к печати 23.04.2007. Формат 60х84/16. Бумага «Классика».

Печать RISO. Усл.печ.л. 1,16. Уч.-изд.л. 1,05.

Заказ 298. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

