На правах рукописи

ТОЛСТЫХ ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КАЛИБРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2010

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированного электропривода» Московского энергетического института (Технического Университета).

Научный руководитель:	кандидат технических наук, с.н.с. Балковой Александр Петрович;
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Красовский Александр Борисович; кандидат технических наук, Попов Михаил Александрович.
Ведущая организация:	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО).

Защита диссертации состоится 16 апреля 2010 г. в 14 час. 00 мин. в аудитории М-611 на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: г. Москва, Красноказарменная ул., д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского энергетического института (Технического Университета).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим отправлять по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д.14, Ученый Совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан « » _____ 20____г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.02
к.т.н., доцент Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Объект исследований диссертационной работы - прецизионный прямой электропривод с вентильным двигателем. Прецизионный прямой электропривод с вентильным двигателем (ВД) можно классифицировать как высокоточный электропривод с безредукторной (прямой) связью между приводным устройством (вентильным двигателем) и рабочим органом. В диссертации исследуется опытный образец поворотного стола с прямым приводом, разработанный на кафедре Автоматизированного электропривода МЭИ (ТУ). Вентильный двигатель, использованный в этом электроприводе, реализован на базе синхронной машины с постоянными магнитами (СМПМ).

Производители современных прецизионных поворотных столов – зарубежные компании LUST (Германия), ETEL (Швейцария), Danaher Motion (США), NSK (Япония). В связи с этим актуальной становится разработка отечественного образца комплектного прецизионного электропривода поворотного стола по своим характеристикам сравнимого с аналогичными электроприводами иностранных производителей. Перечисленные производители, в основном, одинаково решают проблему разработки комплектного прецизионного привода. Типичные решения - оптимизация конструкции поворотного стола, оптимизация конструкции синхронной машины, использование высокоточных датчиков обратной связи. Такие решения дают результат, но приводят к серьезному удорожанию комплектного электропривода.

Альтернативой может быть использование алгоритмов управления, учитывающих нелинейности элементов и внутренние возмущения электропривода, оказывающие существенное влияние на качество его движения. Таким образом, коррекция нелинейных свойств электропривода и улучшение его характеристик происходит не с помощью дорогостоящих компонентов, а за счет специальных алгоритмов управления. Это направление было выбрано при разработке комплектного прецизионного электропривода поворотного стола и его системы управления и определило цель диссертационной работы.

Цель диссертационной работы - разработка и реализация системы управления для конкурентоспособного комплектного электропривода поворотного

стола. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:

- создана уточненная математическая модель СМПМ. Выполнен анализ компонент ее вращающего момента. Выявлены основные источники нелинейностей и внутренних возмущений электропривода с ВД на базе СМПМ;
- разработаны алгоритмы управления ВД в различных диапазонах скоростей;
- выбрана и синтезирована цифровая система управления электроприводом с ВД;
- реализованы программные методы компенсации неидеальности выходной характеристики силового преобразователя электрической энергии электропривода (инвертора напряжения);
- реализованы программные методы компенсации внутренних возмущающих воздействий электропривода с ВД;
- решена проблема повышения точности датчика положения поворотного стола.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались:

- теория электропривода;
- теория цифровых систем управления;
- теория автоматического управления;
- методы компьютерного моделирования (MatLab, Mathcad);
- методы интерактивной отладки микропроцессорных систем управления с использованием среды разработки Code Composer Studio.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждена экспериментальными исследованиями моделей электропривода с разработанной системой управления, использованием предложенной структуры и методик управления в опытном образце комплектного прецизионного электропривода поворотного стола.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- получен простой метод линеаризации характеристики широтно-импульсного (ШИМ) инвертора напряжения;
- получен простой метод линеаризации характеристик вентильного двигателя;
- разработан метод калибровки датчика положения.

Основной практический результат диссертации состоит в разработке конкурентоспособного по цене прототипа комплектного прецизионного электропривода поворотного стола, по качеству движения и позиционирования сравнимого с комплектными приводами некоторых иностранных производителей.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на заседании кафедры «Автоматизированного электропривода» Московского Энергетического Института (Технического Университета), а также неоднократно докладывались на конференциях IWK ТУ Ильменау (Германия).

Публикации. По теме диссертации опубликовано пять печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Количество страниц - 118, иллюстраций - 73, число наименований использованной литературы - 38 на 3 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено описание объекта исследований – комплектного электропривода поворотного стола, основные области применения такого электропривода и требования, которые предъявляются к прецизионным поворотным столам с прямым приводом. Обоснована актуальность разработки системы управления электроприводом с возможностью компенсации его нелинейностей и внутренних возмущений. Поставлены цели и задачи исследования.

В первой главе приведено краткое описание компонентов прецизионного прямого электропривода. Составляющие электропривода – блок управления (рис. 1а) и прототип поворотного стола. Основные части прототипа поворотного стола TMS34 (рис. 1б) - приводная СМПМ (рис. 1в) в корпусе и сенсорный узел. В состав сенсорного узла входят два электромагнитных датчика типа редуктосин с различными коэффициентами редукции (или числом пар полюсов) $n1$=119 и $n2$=120. При использовании сигналов обоих редуктосинов получается абсолютная измерительная система или абсолютный редуктосин. Второй датчик сенсорного узла – высокоточный оптический аналоговый энкодер. Паспортная точность этого датчика ±2.5 угловые секунды. Основное назначение энкодера – поверка точности

абсолютного редуктосина, а также использование его в качестве корректировочного или калибровочного устройства.

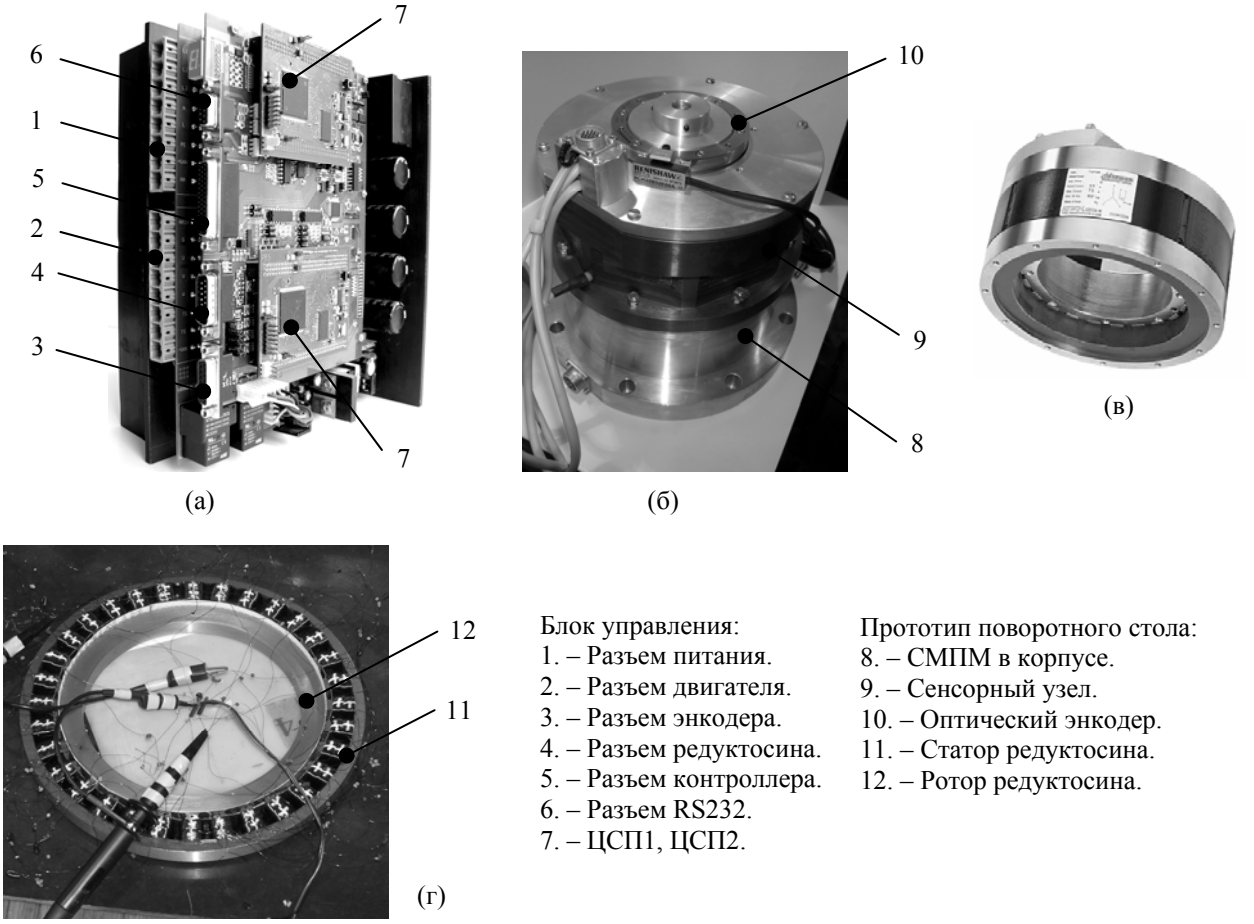


Рис. 1. Внешний вид блока управления (а) и прототипа поворотного стола TMS34 (б) на базе СМПМ TMR34 (в). Один из редуктосинов сенсорного узла (г).

Существенная часть главы посвящена описанию математической модели СМПМ: приведены как математическое описание идеализированной СМПМ, так и модель СМПМ с учетом высших гармоник потокосцепления возбуждения.

Высшие гармоники потокосцепления возбуждения трехфазной СМПМ являются следствием несинусоидального распределения МДС ротора и наличия гармоник магнитной проницаемости статора и ротора. Учет гармоник в электрических уравнениях и в расчете момента производится на основе эквивалентности электрической энергии высших гармоник ЭДС и механической энергии высших гармоник электромагнитного момента. Уравнения электрического равновесия реальной ненасыщенной синхронной машины в относительной форме и подвижных *dq*-координатах с учетом высших гармоник возбуждения имеет вид:

$$\boldsymbol{u}_{dq} = \boldsymbol{l}_{dq}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau}\boldsymbol{i}_{dq} + \boldsymbol{i}_{dq}r + j\omega\boldsymbol{l}_{dq}\boldsymbol{i}_{dq} + j\omega\psi_{M1} + \omega\boldsymbol{\phi}(\theta)\,, \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{u}_{dq}$ – вектор напряжения по осям d и q, $\boldsymbol{i}_{dq}$ – вектор тока по осям d и q, $\boldsymbol{l}_{dq}$ – матрица индуктивностей по осям d и q, $\boldsymbol{\psi}_{M1dq}$ - вектор первой гармоники потокосцепления возбуждения, ω – электрическая скорость, $\boldsymbol{\phi}(\theta)$ - функция формы, отражающая наличие высших гармоник в потокосцеплении возбуждения.

Электромагнитный момент СМПМ имеет главную компоненту – момент идеализированной машины μ_1 – результат взаимодействия первых гармоник токов и потокосцеплений возбуждения, который можно представить как векторное произведение:

$$\mu_1 = \mu_{ME1} = \frac{1}{\psi_{M1}}(\boldsymbol{\psi}_{M1dq} \times \boldsymbol{i}_{dq})\,. \qquad (2)$$

Вторая компонента электромагнитного момента – момент гармоник $\mu_{MEh}(\boldsymbol{i}_{dq}, \theta)$ – результат взаимодействия первых гармоник токов и высших гармоник потока возбуждения:

$$\mu_{MEh}(\boldsymbol{i}_{dq},\theta) = \frac{1}{\psi_{M1}}\frac{\boldsymbol{u}_{iMhdq}}{\omega}\boldsymbol{i}_{dq} = \frac{1}{\psi_{M1}}\boldsymbol{\phi}(\theta)\boldsymbol{i}_{dq}\,. \qquad (3)$$

Зубцовый момент машины $\mu_{cog}(\theta)$, возникающий за счет изменения энергии постоянных магнитов, не отражается в электрических уравнениях, а учитывается только в уравнении механического равновесия.

Пульсирующий магнитоэлектрический момент гармоник $\mu_{MEh}(\boldsymbol{i}_{dq}, \theta)$ и зубцовый момент $\mu_{cog}(\theta)$ – основные компоненты момента внутренних возмущений машины μ_d. В момент внутренних возмущений машины также входят момент сухого трения μ_C, гистерезисный момент потерь μ_h и момент возмущенией управления $\mu_{d.cont}$, обусловленный нелинейностями инвертора, погрешностями датчиков тока, шумами датчика положения и т.д.:

$$\mu_d = \mu_{MEh} + \mu_{cog} + \mu_C + \mu_h + \mu_{d.cont}\,. \qquad (4)$$

С учетом (2) - (4) уравнения механического равновесия реальной СМПМ:

$$\mu = \mu_1 + \mu_d = i_q + \frac{1}{\psi_{M1}}(i_q\phi_q(\theta) + i_d\phi_d(\theta)) - \mu_{cog.m}\sin(n\theta) + \mu_C(\omega) + \mu_h(\theta,\omega) + \mu_{d.cont}\,, \qquad (5)$$

$$j_{me}\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}\tau} = \mu + \mu_L\,, \qquad (6)$$

где $\mu_L=\mu_{Lc}+\mu_{Lv}$–относительный момент нагрузки с постоянной μ_{Lc} и переменной μ_{Lv} составляющими, j_{me} – момент инерции.

Электрические и механические уравнения идеализированной СМПМ не включают компоненту высших гармоник в потокосцеплении возбуждения и момент внутренних возмущений μ_d:

$$\begin{cases} \boldsymbol{l}_{dq}\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau}\boldsymbol{i}_{dq}+\boldsymbol{i}_{dq}r=-j\omega\boldsymbol{l}_{dq}\boldsymbol{i}_{dq}-j\omega\psi_{M1}+\boldsymbol{u}_{dq}, \\ \mu_1=\mu_{ME1}=i_q, \\ j_{me}\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}\tau}=\mu_1+\mu_L. \end{cases} \tag{7}$$

Уравнения (1– 7) можно представить также с помощью структурной схемы (рис. 2).

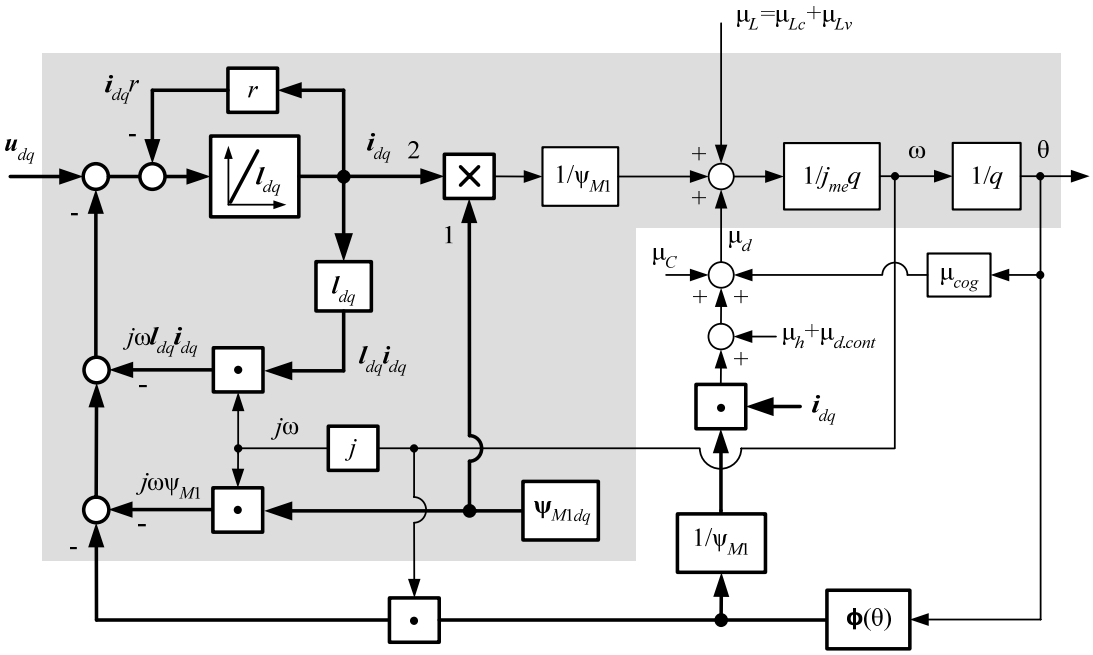


Рис. 2. Структурная схема реальной неявнополюсной СМПМ в подвижных координатах. Серым фоном выделена структура идеализированной СМПМ.

Из (5) видно, что компоненты момента возмущений зависят от токов $\boldsymbol{i}_{dq}$, положения θ и скорости ω. За счет добавления компенсирующих компонентов в токи $\boldsymbol{i}_{dq}$ (или так называемой калибровки) можно путем изменения μ_1 частично компенсировать момент внутренних возмущений μ_d. Так, например, при нейтральной коммутации (i_d =0) и точном знании возмущений, можно ввести их в измененное относительно тока i_q идеализированной машины калиброванное значение тока i_{qC}:

$$i_{qC}=\frac{i_q-\mu_d}{1+\phi_q(\theta)/\psi_{M1}}=\frac{i_q-\mu_d}{\phi_{pul}(\theta)}, \tag{8}$$

где $\phi_{pul}(\theta) = 1 + \dfrac{\phi_q(\theta)}{\psi_{M1}}$ – функция пульсаций.

Тогда момент реальной машины станет равным моменту идеализированной машины с компенсированными возмущениями:

$$\mu = i_{qC}\phi_{pul}(\theta) = \frac{i_q - \mu_d}{\phi_{pul}(\theta)}\phi_{pul}(\theta) + \mu_d = i_q = \mu_1 . \qquad (9)$$

Уравнение (9) лежит в основе концепции калиброванного управления СМПМ и электропривода на ее основе.

В заключение главы 1 приводится определение и описание структуры вентильного двигателя на базе синхронной машины. Вентильный двигатель (рис. 3) состоит из синхронной машины, датчиков тока и положения, инвертора напряжения с обратной связью по току, задатчика тока (ЗТ) и координатных преобразователей: обратного (*dq/abc*) и прямого (*abc/dq*) при управлении в подвижных *dq* координатах. Фазы синхронной машины питаются от инвертора напряжения с векторной ШИМ, обратной связью по току и ПИ-регулятором тока (далее все эти узлы названы инвертором тока ИТ). Вектор задания тока $\boldsymbol{I}_{dq}$* формируется в ЗТ в функции задания момента T_1* и оценки скорости $\hat{\Omega}$ вентильного двигателя. Измерение положения ротора синхронной машины осуществляется датчиком положения, который преобразует механическую координату θ_{me} (угловое положение) в сигнал $\theta = p\theta_{me}$, который далее преобразуется в цифровой код (или оценку электрической координаты $\hat{\theta}$) с помощью наблюдателя (Н) или фильтра (Ф).

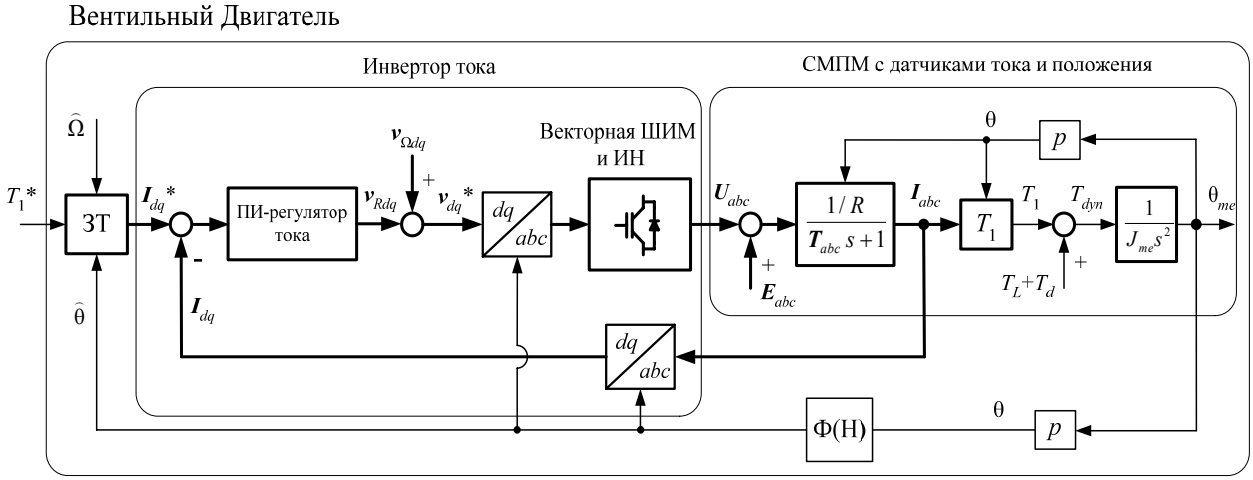


Рис. 3. Структурная схема вентильного двигателя с токовым управлением в *dq* координатах.

В главе 2 анализируется управление ВД с учетом ограничений электропривода. Рассмотрена структура токового управления ВД (рис. 4), где СМПМ описана уравнениями (7).

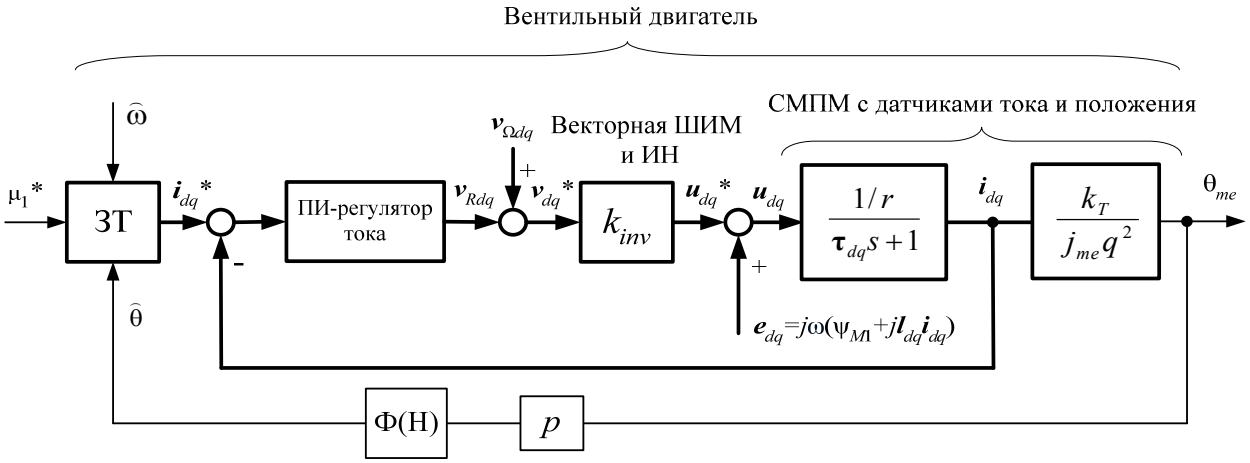


Рис. 4. Структура токового управления ВД в относительной форме.

Схема управления ВД должна формировать заданный момент μ_1* с учетом ограничений машины и инвертора по току и напряжению. Амплитуда i_m вектора тока ВД определяется заданием момента машины μ_1*. Ограничение амплитуды i_m вектора тока обусловлено или ограничением тепловых потерь или ограничением по насыщению. Оба ограничения сводятся к ограничению амплитуды вектора тока некоторым значением $i_{m.\lim}$:

$$i_m = \sqrt{i_d^{\,2} + i_q^{\,2}} \le i_{m.\lim}. \qquad (10)$$

Коротко ограничение (10) называется ограничением по току (ОТ). В длительном режиме, это ограничение обычно задается амплитудой продолжительного тока $i_{m.\lim}=i_{mc}=1$. Ограничение по напряжению формулируется как ограничение амплитуды вектора выходного напряжения инвертора:

$$u_m = \sqrt{u_d^{\,2} + u_q^{\,2}} \le u_{m.\lim}. \qquad (11)$$

При синусоидальной модуляции ограничение $u_{m.\lim}$ равно амплитуде первой гармоники напряжения на фазе машины $u_{m1.\max}$.

Ограничения по току и напряжению могут действовать как раздельно, так и совместно. Обычно зоны действия ограничений включают три диапазона скоростей:

- диапазон низких скоростей, где действует только ограничение по току (ОТ);
- диапазон средних скоростей, где действуют ограничения по току и по напряжению (ОТН);
- диапазон высоких скоростей, где действует только ограничение по напряжению (ОН).

В главе 2 рассматриваются алгоритмы управления ВД в первых двух диапазонах. Управление ВД реализуется в подвижных координатах за счет управления заданиями токов i_d*, i_q*:

$$\begin{cases} i_d * = i_m * \cos\psi_i *; \\ i_q * = i_m * \sin\psi_i *, \end{cases} \tag{12}$$

где ψ_i* - заданный угол коммутации вектора тока.

В диапазоне низких скоростей управление реализуется по критерию «максимума момента на ампер» (ММА), который предполагает управление с заданием момента при минимально возможном токе без учета ограничения напряжения питания. В неявнополюсном ВД критерий ММА определяется исходя из равенства нулю частной производной:

$$\frac{\partial}{\partial\psi_i}\mu_1 = 0\,. \tag{13}$$

На основании системы уравнений (7), уравнений (12) и (13) можно показать, что в идеализированной неявнополюсной машине ($l_d = l_q$) критерий ММА обеспечивается при ψ_i*= $\pi/2$. Алгоритм управления токами неявнополюсного ВД по критерию ММА в зоне ОТ в dq-координатах представляется как:

$$\begin{cases} i_d * = 0, \\ i_q * = \mathrm{sgn}(\mu_1 *) i_m *. \end{cases} \tag{14}$$

При росте скорости двигателя происходит насыщение инвертора, что приводит к ограничению зоны механических характеристик ММА (рис 5). Для определения граничных характеристик необходимо рассмотреть электрические уравнения синхронной машины (7) в установившемся режиме. При действии двух ограничений – по току и по напряжению – определение граничных характеристик вентильного двигателя сводится к решению системы уравнений (7) при ограничениях (10) и (11). Решение можно получить в общем виде для

установившихся скорости ω и момента μ_1 как функций установившихся токов i_d, i_q и амплитуды напряжения питания $u_{m1.max}$:

$$\omega = \pm\sqrt{\frac{u_{m1.\max}{}^2 - r^2 i_m{}^2}{\psi^2} + (r i_q \frac{k_{T\Sigma}}{\psi^2})^2} - r i_q \frac{k_{T\Sigma}}{\psi^2} = \pm\omega_i - r i_q \frac{k_{T\Sigma}}{\psi^2} \qquad (15)$$

где $\psi = \sqrt{l_q^2 i_q^2 + (\psi_{M1} + l_d i_d)^2}$ – амплитуда вектора потокосцепления в зазоре машины; $k_{T\Sigma} = 1 + (l_d - l_q) i_d / \psi_{M1} = k_T = 1$ – относительная постоянная момента неявнополюсного ($l_d = l_q$) ВД; ω_i – скорость холостого хода.

Вид граничных характеристик ВД зависит от параметров машины, инвертора тока и законов токового управления. Алгоритм токового управления, или взаимосвязь токов i_d, i_q, i_m с учетом ограничений по току и напряжению, может реализоваться двумя способами. Первый состоит в уменьшении по модулю тока i_q при увеличении по модулю тока i_d с сохранением амплитуды i_m вектора тока. Это алгоритм поворота вектора тока в направлении роста угла коммутации:

$$\begin{cases} i_{qFW} = \text{var}, \\ i_{dFW} = -\sqrt{i_{mFW}{}^2 - i_{qFW}{}^2}, \\ i_{mFW} = \text{const}. \end{cases} \qquad (16)$$

Такой режим называется режимом ослабления поля (Flux Weakening – FW, или ОП), т.к. растущий по модулю ток i_{dFW} уменьшает амплитуду потока возбуждения $\psi_d = \psi_{M1} + l_d i_{dFW}$, что приводит к изменению направления вектора ЭДС и уменьшению его амплитуды. Второй способ заключается в уменьшении амплитуды вектора тока по мере роста скорости при сохранении критерия ММА. Для идеализированного неявнополюсного ВД это алгоритм имеет вид:

$$\begin{cases} i_{mML} = \text{var}, \\ i_{dML} = 0, \\ i_{qML} = \text{sgn}(\mu_1) i_{mML}. \end{cases} \qquad (17)$$

Алгоритм уменьшения амплитуды вектора тока в функции скорости при сохранении критерия ММА можно назвать режимом минимума потерь (Minimal Loss – ML, или МП).

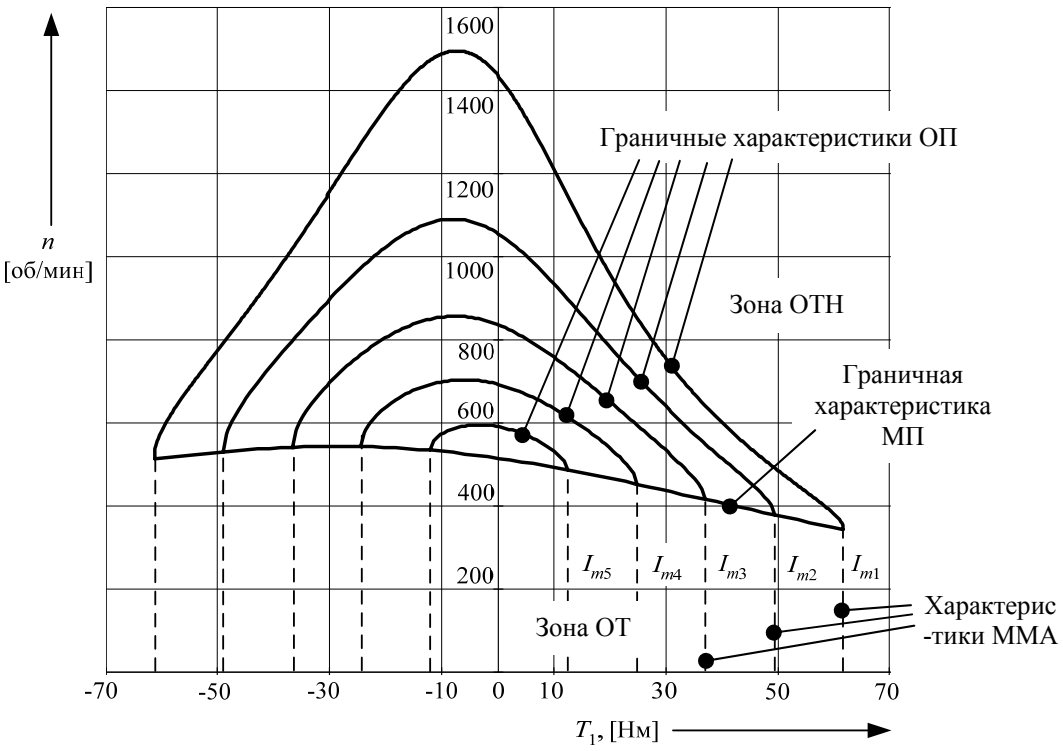


Рис. 5. Механические характеристики ВД при токовом управлении по алгоритмам ММА, МП и ОП в абсолютных величинах. Характеристики двигателя при управлении с ослаблением поля посчитаны для различных амплитуд вектора тока.

В главе 3 рассмотрено управление прецизионным электроприводом с ВД. Ставится задача выбора структуры и синтеза цифровой системы управления электроприводом, обоснована необходимость использования разомкнуто-замкнутых систем управления. На рис. 6 изображена структура разомкнуто-замкнутой системы управления с каскадным включением регуляторов тока, скорости и положения. Здесь генерация траектории движения производится в блоке ГТ (генератор траектории). Структура содержит три контура регулирования. Регулятор тока вместе с инвертором напряжения, синхронной машиной с датчиками тока и положения ротора и задатчиком тока (ЗТ) включены в состав вентильного двигателя. Задатчик тока реализует законы токового управления вентильным двигателем (нейтральная коммутация по критерию ММА, МП или ОП). Задание момента вентильного двигателя – это выход регулятора скорости. Для реализации замкнутого контура скорости используется наблюдатель скорости. Регулятор положения получает задание на перемещение от генератора траектории, который может входить собственно в состав программного обеспечения цифрового электропривода или быть реализован на программном уровне системы с ЧПУ. В главе представлены методы синтеза регуляторов цифрового электропривода. Для

настройки параметров регуляторов используются стандартные методы последовательной коррекции, которые хорошо изучены и предлагаются для синтеза аналоговых систем регулирования. Однако, при синтезе цифровой системы таким способом, учтена дискретность управляющих и выходных сигналов всех контуров регулирования.

На базе синтеза цифрового контура тока в главе 3 реализована автонастройка цифрового регулятора тока ВД (рис. 6), позволяющая получить оптимальный вид переходного процесса в контуре тока при заданных: времени переходного процесса, перерегулировании и статической ошибке регулирования (табл. 1).

Таблица 1. Параметры переходного процесса с использованием расчетных коэффициентов регулятора тока для различных коэффициентов демпфирования ξ_C и параметры, полученных в результате автонастройки.

	1. ξ_C=1.	2.ξ_C=√3/2.	3.ξ_C=1/√2.	**4. Автонастройка**
Время п.п., мс.	0.7	0.4	0.25	**0.32**
Перерегулирование, %.	-	-	h_3 >5%	**1% < h_4 < 5%**
Статическая ошибка, %.	>1%	>1%	1%	**1%**
Полоса пропускания, *Гц*.	500	900	2200	**2100**

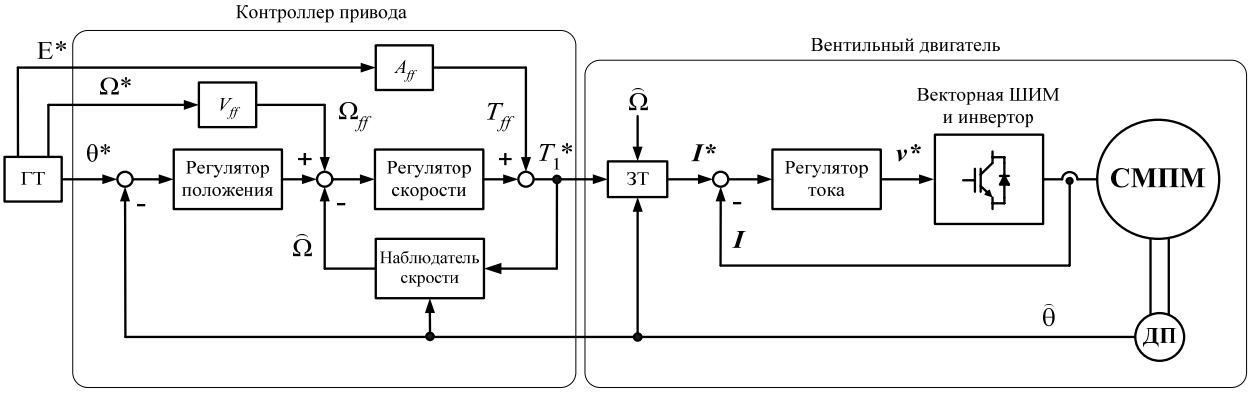


Рис. 6. Структура разомкнуто-замкнутой системы управления прецизионным прямым электроприводом с каскадным регулированием.

В главе 4 предложен метод усовершенствования выбранной в главе 3 структуры управления. Недостатком рассмотренной структуры управления электроприводом (рис. 6) является представление объекта управления (вентильного двигателя) как линейной идеализированной системы без учета нелинейностей и внутренних возмущений.

Одно из существенно нелинейных звеньев вентильного двигателя – инвертор напряжения, в силу своей нелинейной выходной характеристики (рис. 7).

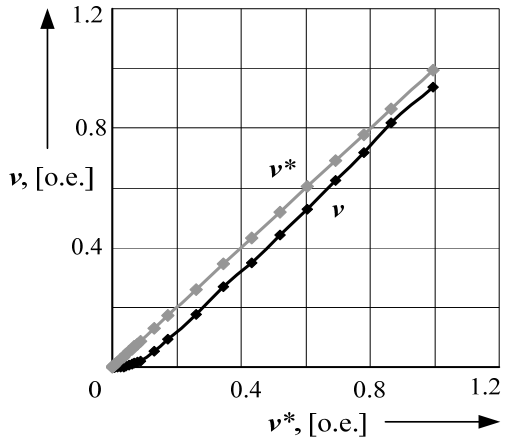
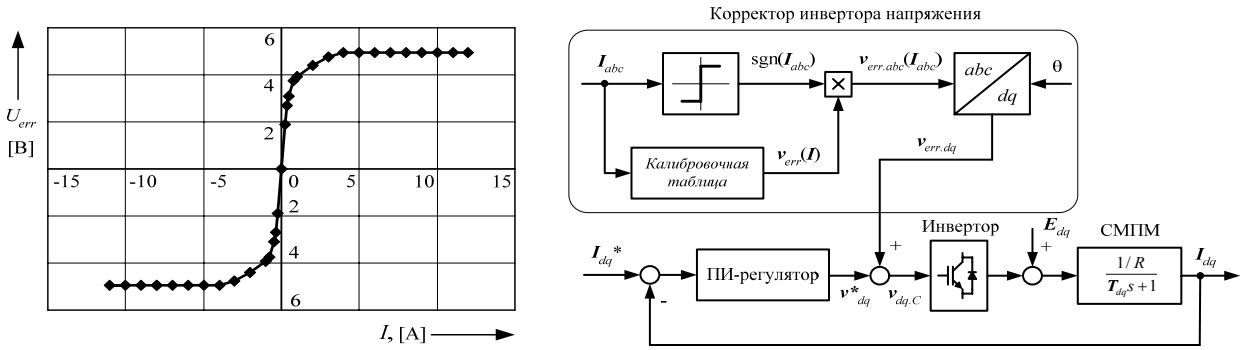


Рис. 7. Выходная характеристика инвертора напряжения (б) блока управления рис. 1(а).

Ошибка выходного напряжения при этом прямо влияет на качество воспроизведения токов вентильного двигателя. Для линеаризации выходной характеристики инвертора напряжения в главе 4 предлагается использовать ***корректор инвертора напряжения*** (***КИ***), содержащий калибровочную таблицу с заранее идентифицированной ошибкой напряжения (рис. 8а). Таким образом, реализуется калиброванное управление током ВД.

На рис. 8(б) представлена структура калиброванного управления током ВД. Калибровочная таблица содержит нормализованные значения ошибки напряжения для каждой из фаз *abc* инвертора (только I-й квадрант – рис. 8а). Нормализованная ошибка сохранена в таблице как функция мгновенного значения тока в фазе $\boldsymbol{v}_{err}$ ($\boldsymbol{I}$). После определения знака тока, функция $\boldsymbol{v}_{err.abc}(\boldsymbol{I}_{abc})$ преобразуется в соответствии с правилами координатных преобразований в сигнал коррекции в подвижных координатах $\boldsymbol{v}_{err.dq}$, который далее добавляется к выходу регулятора $\boldsymbol{v}_{dq}$* для реализации калиброванного управления.



(а) (б)

Рис. 8. Ошибка инвертора напряжения в функции реального тока синхронной машины – калибровочная таблица инвертора напряжения (а), структура калиброванного управления током ВД (б).

Работоспособность метода калиброванного управления током проверялась при работе двигателя в синхронном режиме [3] на постоянной скорости 100 [об/мин]. Рис. 9(а) показывает оценку гармоник тока I_q ВД при управлении токами без использования калибровки инвертора. Отчетливо видны искажения порядка, кратного шести, вносимые ошибкой инвертора в подвижных dq координатах [4]. Аналогичное разложение в ряд Фурье по номерам гармоник приводится для тока I_q с использованием калиброванного управления (рис. 9б).

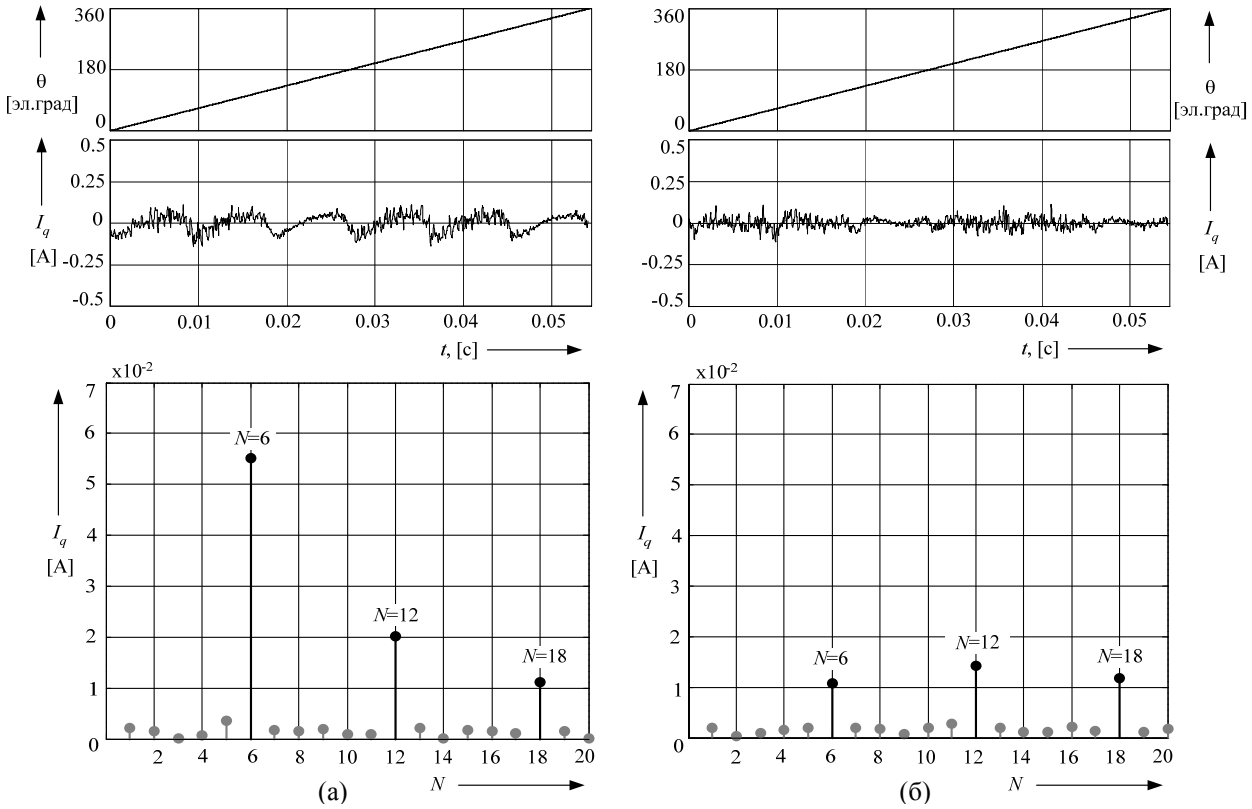


Рис. 9. Ток I_q при работе ВД в синхронном режиме и его разложение в ряд Фурье без калибровки инвертора (а) и с калибровкой (б) («мертвое время» - 2мкс.).

Кроме нелинейности инвертора, существенную роль в возмущениях играют внутренние возмущения электропривода с вентильным двигателем – это компоненты вращающего момента, которые включают зубцовый момент, момент высших гармоник, а также погрешности датчика положения.

Для компенсации момента возмущений в главе 4 предлагается к рассмотрению реализация ***корректора*** момента возмущений (***K***), который использует калибровочную таблицу с заранее идентифицированными возмущениями для снижения пульсаций вращающего момента – рис. 10.

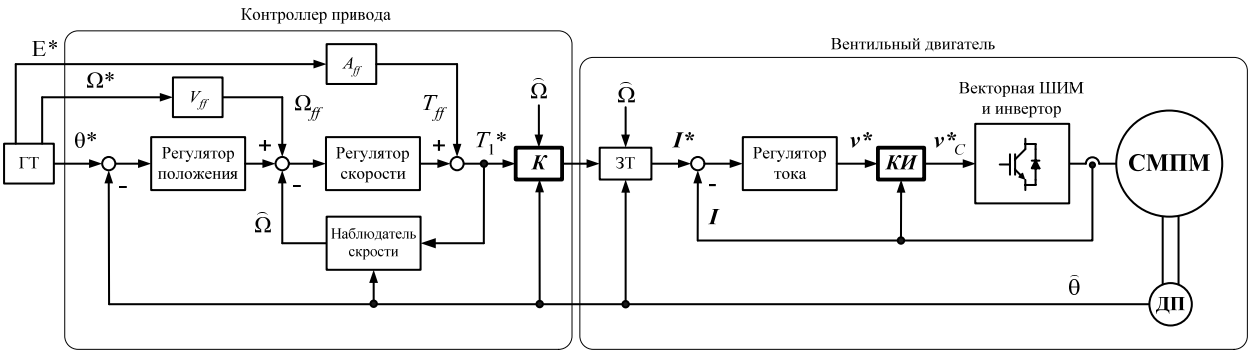


Рис. 10. Структура калиброванного электропривода с вентильным двигателем (в абсолютных величинах): ***К***– корректор момента возмущений, ***КИ*** – корректор инвертора напряжения.

На рис. 11 в качестве примера показана коррекция момента возмущений при работе электропривода в режиме стабилизации скорости на уровне 4 [об/мин] без момента нагрузки. О снижении уровня возмущений свидетельствует уменьшение пульсаций выходного сигнала регулятора скорости (задание момента), который косвенным образом характеризует реальный момент вентильного двигателя. Результаты показывают, что в системе калиброванного электропривода с корректором момента возмущений на низких скоростях работы электропривода практически полностью удается компенсировать пульсации вращающего момента.

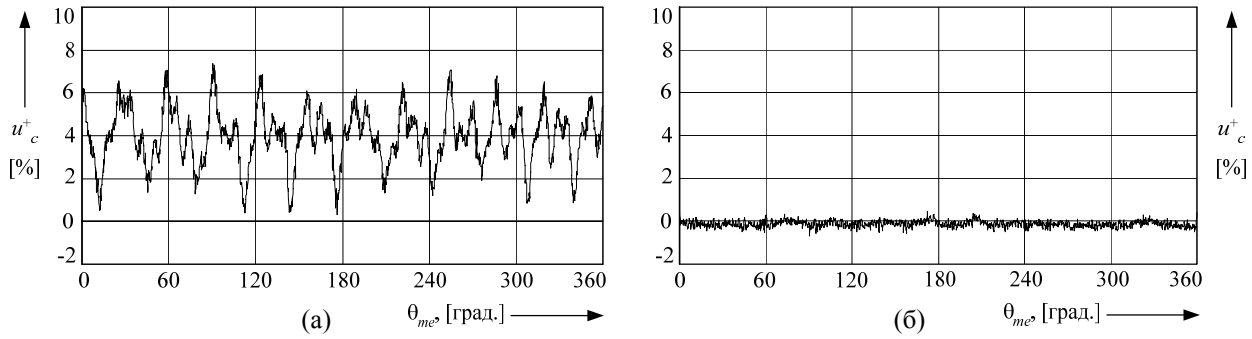


Рис. 11. Результаты коррекции момента возмущений. Пульсации выходного сигнала регулятора скорости в процентах от продолжительного момента без корректора момента возмущений (а) и в калиброванном электроприводе с корректором (б).

Существенную погрешность вносит и ошибка датчика положения. Метод повышения точности редуктосина – калибровка. Под калибровкой подразумевается коррекция показаний одного из редуктосинов (с редукцией - 120) с помощью калибровочного устройства, в данном случае с помощью оптического энкодера с высокой паспортной точностью. Для этих целей в структуру калиброванного электропривода вводится дополнительный ***корректор датчика положения*** редуктосина (***КДП***) – рис. 12. Корректор состоит из калибровочной таблицы,

которая содержит зафиксированные внутри одного оборота поворотного стола показания калибровочного устройства в функции показаний редуктосина.

В качестве результатов калибровки редуктосина ниже приводятся зависимости путевого отклонения внутри одного оборота поворотного стола при движении на постоянной скорости 1 [об/мин] в показаниях некалиброванного e_R (рис. 13а) и калиброванного редуктосина e_{RC} (рис. 13б) в функции оценки углового положения калибровочного энкодера $\hat{\theta}_E$.

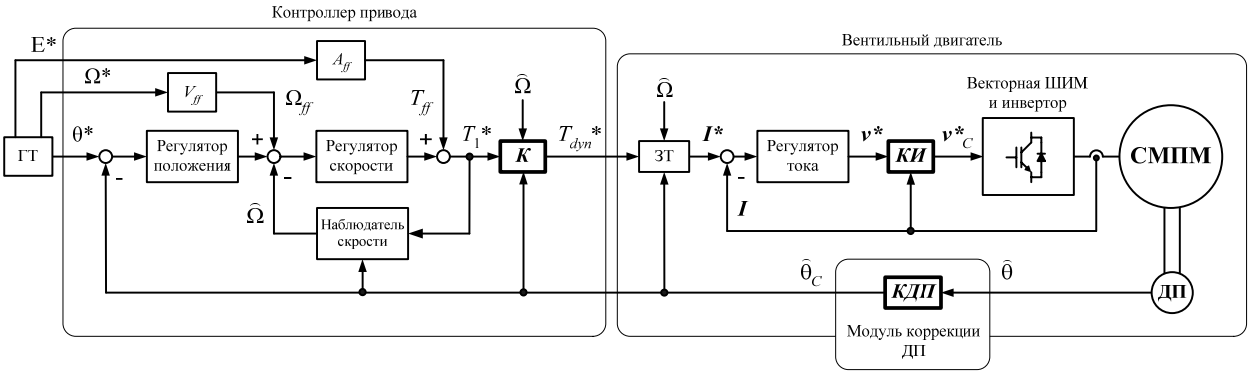


Рис. 12. Структура калиброванного управления прецизионным прямым электроприводом.

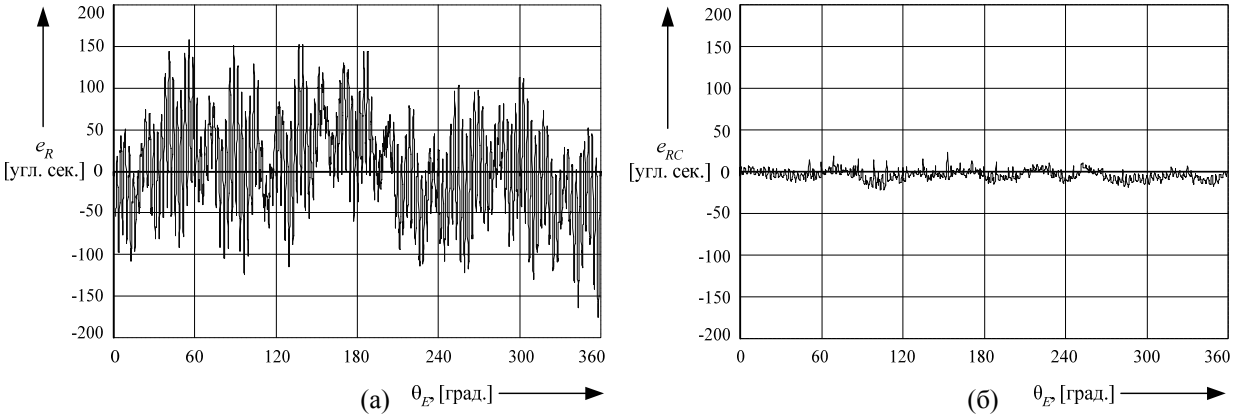


Рис. 13. Путевое отклонение с некалиброванным (а) и калиброванным редуктосином на скорости 1[об/мин] (б).

Использование выше перечисленных нелинейных корректоров в системе с каскадным регулированием – это реализация концепции и структуры калиброванного управления прецизионным прямым электроприводом с вентильным двигателем (рис. 12). Результаты оценки точности и повторяемости исследуемого электропривода поворотного стола TMS34 (рис. 1б), а также результаты сравнения основных характеристик стола TMS34 с разработанным калиброванным управлением с параметрами поворотных столов некоторых иностранных производителей приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение основных характеристик стола TMS34 с калиброванным управлением с параметрами поворотных столов некоторых иностранных производителей.

Наименование параметра	**TMS34**	ETEL RTBM0140-070	Lust MTC1-145-3
	Величина		
Пиковый момент, [НМ]	**60**	90	34
Продолжительный момент, [Нм]	**20**	16	14
Максимальная скорость, [об/мин]	**700**	500	500
Стабильность скорости, [об/мин]	**±0.06 на 4 [об/мин]** **±0.5 на 30 [об/мин]**	-	±0.02 на 4 [об/мин] ±0.15 на 30 [об/мин]
Точность, [угл.сек]	**6**	6*	80**
Повторяемость, [угл.сек]	**4**	2	3
Момент инерции, [кгм^2]	**0.027**	0.003	0.0173
Масса.[кг]	**21**	13	9

В заключении предложены результаты и выводы по проделанной работе.

В приложении приведена расшифровка основных обозначений, индексов и сокращений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие результаты:

1. Проведено подробное математическое описание исследуемой в работе СМПМ. Приведено описание реальной синхронной машины с учетом высших гармоник потокосцепления возбуждения.
2. На основе математического описания классифицированы основные компоненты момента возмущений СМПМ.
3. Предложены алгоритмы управления ВД с учетом ограничений по току и напряжению в различных диапазонах скоростей.
4. Выбрана и синтезирована структура цифрового управления прямым прецизионным электроприводом с ВД. Предложена методика автонастройки коэффициентов контура тока.
5. Для компенсации нелинейностей и возмущающих воздействий электропривода разработана и реализована концепция калиброванного управления электроприводом с ВД. В частности, предложен простой способ

* Данные поворотного стола с калиброванным аналоговым инкрементным энкодером – 5000 [период./об.].
** Данные поворотного стола с абсолютным энкодером – 512 инкрементов грубого отсчета на оборот.

улучшения качества токов питания ВД – использование корректора инвертора с калибровочной таблицей инвертора напряжения. Для компенсации внутренних возмущающих воздействий синтезирована структура калиброванного электропривода с корректором момента возмущений.

6. Существенно улучшены характеристики движения электропривода за счет разработанной методики калибровки датчика положения поворотного стола.
7. За счет разработанной системы калиброванного управления получен комплектный прецизионный электропривод с конкурентоспособной ценой и высоким качеством движения и позиционирования.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

[1] **Толстых О. А. Калиброванное токовое управление вентильным двигателем. Вестник МЭИ №1 2010. с. 46-54. Издательский дом МЭИ.**

[2] Balkovoy A., Slivinskaia G., Tolstykh O. Improving of resolver performance. Proccedings of the 50th International Scientific Colloquium (IWK). TU Ilmenau (Germany), 2005.
Балковой А., Сливинская Г., Толстых О. Повышение точности резольвера. Труды 50-го международного научного коллоквиума ТУ Ильменау (Германия), 2005.

[3] Балковой А.П., Толстых О. А. Особенности шагового и вентильного режимов управления синхронной машиной. Электропривод и системы управления//Труды МЭИ. Вып. 682.-М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

[4] Толстых О. А. Автоматическая настройка цифрового ПИ-регулятора тока вентильного двигателя. Электропривод и системы управления//Труды МЭИ. Вып. 684.-М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

[5] Balkovoy A., Cacenkin V., Slivinskaia G., Tolstykh O. Direct drive with high motion performance. Proccedings of the 54th International Scientific Colloquium (IWK). TU Ilmenau (Germany), 2009.
Балковой А., Цаценкин В., Сливинская Г., Толстых О. Прямой привод с высоким качеством движения. Труды 54-го международного научного коллоквиума ТУ Ильменау (Германия), 2009.