

На правах рукописи

Кузнецов Михаил Сергеевич

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СЕРИИ ЭЧР ПРИ
ОГРАНИЧЕННОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена на кафедре «Управляющие и вычислительные системы» Вологодского государственного технического университета.

- Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Грузов Владимир Леонидович
- Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Швецов Анатолий Николаевич
– кандидат технических наук, доцент
Усольцев Александр Анатольевич
- Ведущая организация – научно-производственное предприятие
«Новтех», г. Вологда

Защита состоится « 24 » мая 2007г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главное здание, ауд. 151.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ, Отдел аспирантуры и докторантуры.

Автореферат разослан « 20 » апреля 2007г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.229.20, к.т.н., доц.



/ А.Д. Курмашев /

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современный уровень развития силовой электроники и микропроцессорных средств управления обеспечил широкое внедрение и распространение частотно-регулируемых асинхронных электроприводов. Высокие показатели качества регулирования могут быть обеспечены только при контроле состояния всех электромагнитных и механических переменных электропривода, что достигается при полном информационном обеспечении. Однако зачастую некоторые переменные недоступны измерению по техническим проблемам или экономическим причинам. Это определило направление исследований, разработку и внедрение класса малодатчиковых (бездатчиковых) систем векторного управления, где недоступная для непосредственного измерения информация восстанавливается в различных наблюдающих устройствах (наблюдателях) в реальном масштабе времени.

Изменение координат электропривода (элементов вектора состояния) во времени может быть вычислено, если задана математическая модель асинхронного двигателя и известны входные управляющие воздействия и начальные условия. Так как не все элементы вектора состояния доступны непосредственному измерению, то фазовый вектор должен быть полностью вычислен на основании результатов измерений выхода системы. Ввиду ошибок измерений это вычисление приводит не к точному, а лишь к приближенному значению - к так называемой оценке фазового вектора. Если относительно ошибки измерения известны некоторые подробности, например, ее математическое ожидание и дисперсия, то методами теории вероятностей можно получить лучшее, или оптимальное, значение оценки. В этом случае ошибки измерения устройства, а также неизвестные входные воздействия (возмущения) рассматриваются как случайные процессы и говорят о задаче стохастической фильтрации.

Энергетический канал большинства частотно-регулируемых электроприводов выполняется по классической схеме: неуправляемый выпрямитель – автономный инвертор напряжения – асинхронный двигатель. Качество выходного напряжения, энергетическая эффективность и другие характеристики инверторов во многом определяются используемыми алгоритмами управления силовыми ключами. Одним из важных критериев качества выходного напряжения является его спектральный состав. Задачу выбора рационального алгоритма управления автономным инвертором можно решить на основе компромисса между множеством противоречивых показателей.

В 1996г. научно-производственным предприятием «Новтех» совместно с кафедрой электропривода Вологодского государственного технического университета была выполнена разработка, а с 1997г. начато серийное

производство асинхронных электроприводов со скалярным управлением моментом. В результате накопленного опыта стало возможным и целесообразным поставить и решить задачу модернизации выпускаемых электроприводов за счет перехода к системам векторного управления при косвенном формировании сигнала обратной связи по скорости и максимальном использовании уже отработанных технических решений.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование малодатчиковой системы векторного управления асинхронным электроприводом со стохастическим наблюдателем состояния. Для достижения этой цели в работе решаются следующие основные задачи:

– выполнен сравнительный анализ математических моделей вентильно-электромеханических систем в различных координатных пространствах и выбрана система координат для синтеза алгоритма управления асинхронным электроприводом на основе минимальной алгоритмической и структурной сложности;

– на основе сравнительного анализа режимов работы автономных инверторов синтезированы математическая модель и алгоритм симплексной пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции для управления силовыми ключами автономного инвертора напряжения в координатах, согласованных с координатами модели асинхронного двигателя;

– для линеаризованных систем в непрерывном и дискретном времени решена задача наблюдения вектора состояния и получен алгоритм рекуррентного оценивания дискретной по времени системы. На основе метода наименьших квадратов и процедуры минимизации среднеквадратичной ошибки решена задача фильтрации для линейных систем в дискретном времени;

– разработана структурная схема электропривода и программа для системы управления на базе цифрового сигнального процессора TMS320LF2407A, а также разработаны средства для ее отладки и тестирования;

– проведено экспериментальное исследование опытного образца малодатчиковой системы векторного управления асинхронным электроприводом со стохастическим наблюдателем состояния.

Методы исследования. Решение поставленных задач и теоретические исследования выполняются на основе математических моделей вентильно-электромеханических систем с применением аппарата векторной алгебры, матричного анализа, теории автоматического управления, разделов теории вероятностей и математической статистики, аппарата комплексных чисел, преобразования Фурье.

Научная новизна работы состоит в следующем:

– предложены структура и алгоритм управления электроприводом с использованием стохастического наблюдателя с последующей программной реализацией на 16-битном DSP-процессоре;

- разработка математических моделей асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором выполнена в системе относительных единиц. Получена система дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши в относительных единицах для реализации цифровой системы управления;
- разработан алгоритм синусоидальной симплексной пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции для управления автономным инвертором напряжения, а также предложена методика для спектрального анализа симплексных алгоритмов;
- предложена цифровая структура ПИ-регулятора с повышенной точностью интегральной составляющей для 16-разрядных микропроцессоров семейства TMS320x24 Texas Instruments.

Практическая значимость заключается в создании векторной малодатчиковой системы управления асинхронным электроприводом со стохастическим наблюдателем состояния, аппаратно унифицированной с серийно выпускаемыми электроприводами с модульным управлением моментом. Отличие заключается в степени сложности программного обеспечения. Разработанная программа для используемого микропроцессора позволяет использовать преобразователи частоты для управления большинством общепромышленных механизмов с диапазоном регулирования до 50 при высокой динамической точности.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, теоретических положений и технических решений подтверждается математическим моделированием и экспериментальными исследованиями опытной установки на двигателе 4A100L4Y3 мощностью 4,0 кВт.

На защиту выносятся:

- принципы выбора координат для синтеза математической модели вентильно-электромеханической системы электропривода;
- структурная схема электропривода и описание ее работы;
- методика синтеза модернизированного алгоритма симплексной пространственно-векторной модуляции для управления автономным инвертором напряжения;
- решение задачи оценки элементов вектора состояния на основе рекуррентного алгоритма наблюдения и фильтрации для линейных систем с дискретным временем с учетом случайных возмущений и ошибок измерений;
- программная реализация алгоритма управления на базе цифрового сигнального процессора;
- описание экспериментальной установки и отладочного комплекса.

Апробация результатов работы. По результатам выполненных исследований опубликовано 14 работ. Теоретические положения и основные результаты работы докладывались и обсуждались: на Всероссийских научных конференциях студентов и аспирантов «Молодые исследователи – региону» в 2002, 2003, 2004, 2005 и 2006 годах (г.Вологда); на IX Международной открытой научной конференции «Современные проблемы

информатизации в технике и технологиях» в ноябре 2003 – январе 2004 гг. (г.Воронеж); на Всероссийской конференции преподавателей и аспирантов в 2004 году (г.Вологда); на семинаре в СПб ГУ ИТМО в марте 2007г. (г.Санкт-Петербург).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа общим объемом в 190 стр. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Основная часть работы выполнена на 125 страницах машинописного текста. Работа содержит 26 рисунков и 5 таблиц. Список использованных источников содержит 107 наименований на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы решаемые в диссертации научно-технические проблемы и задачи, отмечены научная новизна и практическая ценность работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ известных решений частотного управления асинхронными электроприводами, а также выполнен сравнительный анализ математических моделей вентильно-электромеханических систем в различных координатных пространствах.

Для короткозамкнутой асинхронной машины рассмотрены математические модели в системе относительных единиц в неподвижной (α, β) и вращающейся (d, q) системах координат. Базовые величины выбираются с учетом номинального режима работы двигателя. Для синтеза математических моделей асинхронной машины в неподвижных и вращающихся координатах в качестве исходных принимаются следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} \bar{U}_s = R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt}; \\ \bar{U}_r = R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} - j \cdot \Omega \cdot \bar{\Psi}_r, \end{cases} \quad \begin{cases} \bar{U}_s = R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j \cdot \Omega_k \cdot \bar{\Psi}_s; \\ \bar{U}_r = R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j \cdot (\Omega_k - \Omega) \cdot \bar{\Psi}_r, \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{\Psi}_s = L_s \cdot \bar{I}_s + L_\mu \cdot \bar{I}_r$ – вектор потокосцепления статора;

$\bar{\Psi}_r = L_r \cdot \bar{I}_r + L_\mu \cdot \bar{I}_s$ – вектор потокосцепления ротора.

Далее после перехода к относительным единицам и проведения математических преобразований получены системы дифференциальных уравнений и структурные схемы математических моделей в неподвижной системе координат (рис. 1) и во вращающейся системе координат.

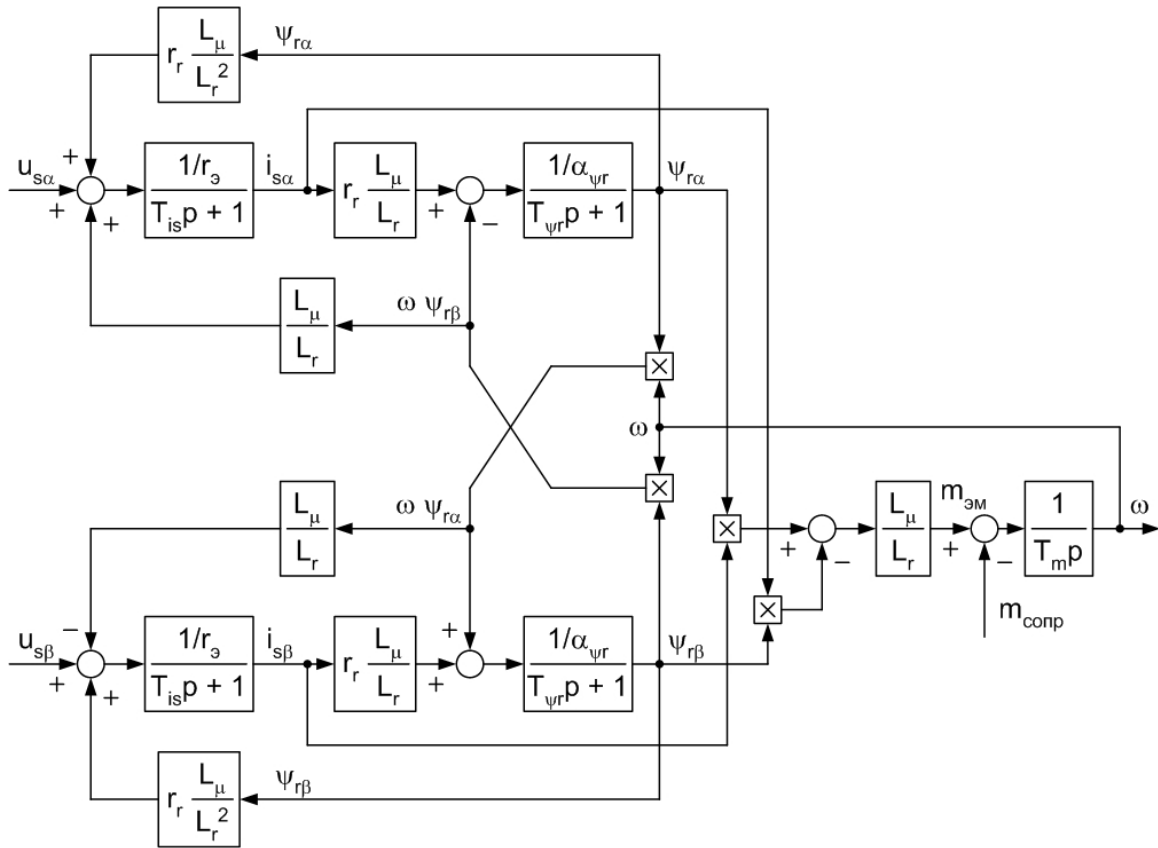


Рис. 1. Структурная схема модели асинхронного двигателя для неподвижной системы координат в относительных единицах

Для программной реализации системы управления получена система уравнений, приведенная к нормальной форме Коши (относительные значения индуктивностей обозначены без штрихов):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{\omega_b}{\sigma \cdot L_s} \cdot u_{s\alpha} - \frac{i_{s\alpha}}{T_{is}} + \frac{L_\mu}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \frac{\psi_{r\alpha}}{T_{\psi r}} + \frac{\omega_b \cdot L_\mu}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \omega \cdot \psi_{r\beta}; \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{\omega_b}{\sigma \cdot L_s} \cdot u_{s\beta} - \frac{i_{s\beta}}{T_{is}} - \frac{\omega_b \cdot L_\mu}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \omega \cdot \psi_{r\alpha} + \frac{L_\mu}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \frac{\psi_{r\beta}}{T_{\psi r}}; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_\mu}{T_{\psi r}} \cdot i_{s\alpha} - \frac{\psi_{r\alpha}}{T_{\psi r}} - \omega_b \cdot \omega \cdot \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_\mu}{T_{\psi r}} \cdot i_{s\beta} + \omega_b \cdot \omega \cdot \psi_{r\alpha} - \frac{\psi_{r\beta}}{T_{\psi r}}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_m} \cdot \left(\frac{L_\mu}{L_r} \cdot (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) - m_{\text{сопр}} \right). \end{array} \right. \quad (3)$$

где $T_{is} = \frac{\sigma \cdot L_s}{r_\varepsilon \cdot \omega_b}$, $T_{\psi r} = \frac{L_r}{r_r \cdot \omega_b}$, $r_\varepsilon = r_s + r_r \cdot \frac{L_\mu^2}{L_r^2}$, $T_m = \frac{J \cdot \omega_b}{M_b \cdot z_p^2}$.

Полученная система дифференциальных уравнений использована при синтезе дискретной математической модели, необходимой для вычисления предварительной экстраполированной оценки вектора состояния при выполнении рекуррентной процедуры наблюдения (фильтрации) Калмана.

Вторая глава посвящена методике синтеза симплексных алгоритмов модуляции для автономных инверторов напряжения.

Основная идея симплексных алгоритмов управления автономным инвертором напряжения (АИН) (рис.2) заключается в том, что для реализации среднего напряжения (эквивалентного вектора) на нагрузке можно использовать три мгновенных пространственных вектора напряжений, наиболее близких к требуемому среднему напряжению. Например, для реализации вектора u_3 необходимо использовать вектора $V1, V2, V0$ или $V7$ (рис. 3). Таким образом, область реализуемых напряжений разбивается на шесть симплексов (секторов).

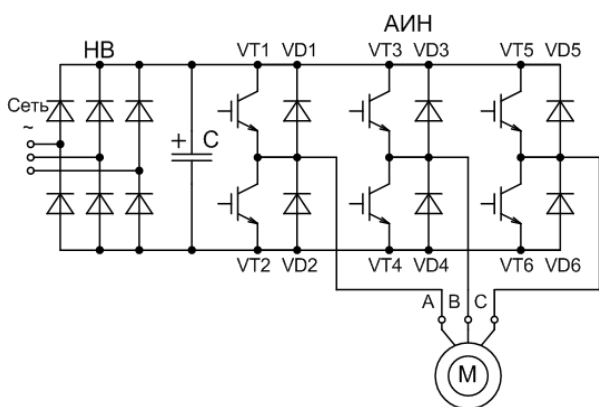


Рис. 2. Автономный инвертор напряжения

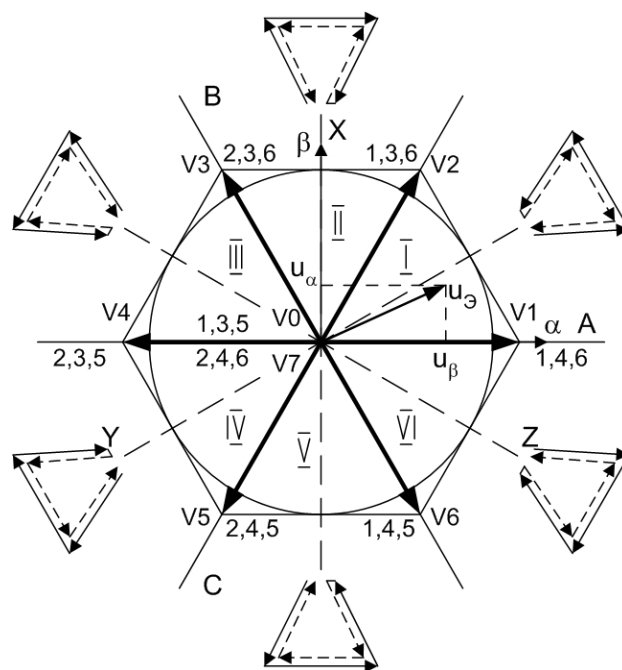


Рис. 3. Диаграмма пространственных векторов напряжений АИН

Синтез алгоритма модуляции включает в себя определение как длительности реализации того или иного состояния АИН, т.е. комбинации работы ключей во всех трех фазах, так и очередности коммутации ключей фаз на периоде модуляции, т.е. последовательности переходов между состояниями АИН. Эти процедуры являются независимыми, поэтому задача синтеза алгоритма модуляции может быть разделена на две подзадачи: синтез закона модуляции и синтез закона переключений. Законы модуляции и переключений полностью определяют алгоритм модуляции.

Геометрическое положение требуемого эквивалентного вектора и располагаемое напряжение в звене постоянного тока однозначно определяют сектор модуляции и длительности реализации опережающего вектора $t1$, отстающего вектора $t2$ и нуль-вектора $t0$. Подбирая определенные функции

для вычисления t_1 , t_2 , t_0 можно добиться любой траектории движения эквивалентного вектора напряжения внутри каждого сектора (рис. 3).

Синтез закона переключений основан на двух элементарных последовательностях, характеризующихся переключениями только одной пары ключей какой-либо фазы при переходах между состояниями АИН. Например, для первого сектора, образованного векторами V_1 , V_2 , V_0 и V_7 последовательности примут вид: $V_7 - V_1 - V_2$ и $V_0 - V_2 - V_1$.

Для каждого сектора выделим такие последовательности, которые начинается и заканчивается вектором V_7 и проходит через вектор V_0 :

- для сектора I: $V_7 - V_1 - V_2 - V_0 - V_2 - V_1 - V_7$;
- для сектора II: $V_7 - V_3 - V_2 - V_0 - V_2 - V_3 - V_7$;
- для сектора III: $V_7 - V_3 - V_4 - V_0 - V_4 - V_3 - V_7$;
- для сектора IV: $V_7 - V_5 - V_4 - V_0 - V_4 - V_5 - V_7$;
- для сектора V: $V_7 - V_5 - V_6 - V_0 - V_6 - V_5 - V_7$;
- для сектора VI: $V_7 - V_1 - V_6 - V_0 - V_6 - V_1 - V_7$.

Распределение длительностей реализации пространственных векторов t_1 , t_2 и t_0 на интервале модуляции для секторов I, III и V происходит следующим образом: $t_0/4 - t_1/2 - t_2/2 - t_0/4 - t_0/4 - t_2/2 - t_1/2 - t_0/4$; для секторов II, IV и VI: $t_0/4 - t_2/2 - t_1/2 - t_0/4 - t_0/4 - t_1/2 - t_2/2 - t_0/4$ (рис. 4).

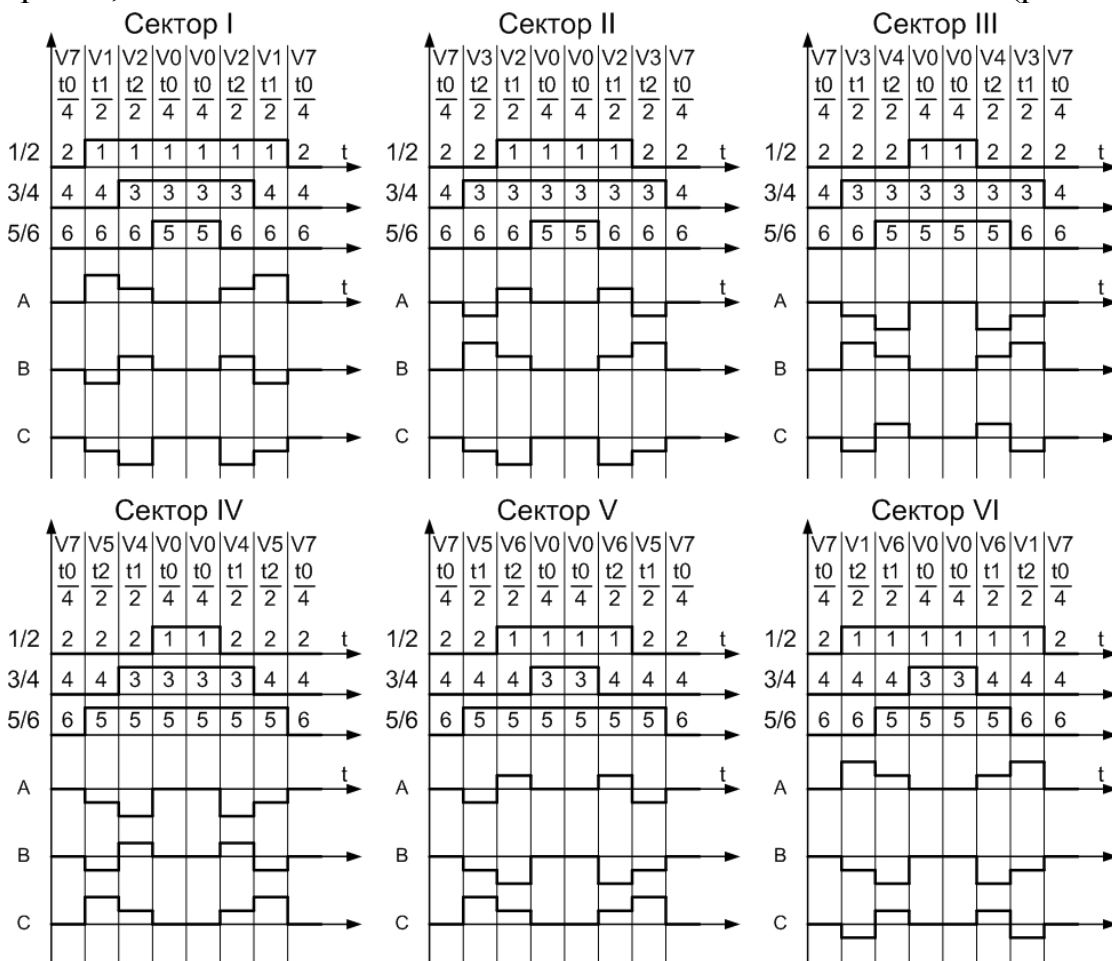


Рис. 4. Временные диаграммы переключений и фазных напряжений

В течение периода модуляции происходит симметричное подключение фаз двигателя к положительной и отрицательной шине АИН, что приводит к улучшению энергетического обмена между двигателем и емкостью в звене постоянного тока. Симплексные пространственно-векторные широтно-импульсные алгоритмы модуляции свободно реализуются на цифровых сигнальных процессорах, в периферию которых входит таймер/счетчик с тремя выходами сравнения и шестью каналами широтно-импульсной модуляции с возможностью реализации пауз «мертвого времени» между переключениями пары ключей каждой фазы.

Дополнительно для симплексных алгоритмов модуляции разработана методика спектрального анализа кривой фазного напряжения с помощью элементарных ступенчатых функций. Полученные результаты полностью совпадают с фазными напряжениями, представленными на рис. 4.

В третьей главе поставлена и решена задача наблюдения. При решении практических задач очень часто возникает ситуация, когда необходимые для управления координаты вектора состояния объекта не измеряются или измеряются с существенными случайными ошибками, а движение объекта управления подвержено случайным воздействиям. Поэтому в технических задачах регулирования теории оптимального управления возникает необходимость в процедурах оценивания и фильтрации. Если возмущениями и ошибками измерений можно пренебречь, то говорят о задаче наблюдения. В противном случае возникает задача фильтрации.

Задача наблюдения состоит в необходимости оценки элементов вектора состояния некоторой системы, недоступных для измерения, на основе наблюдений ее выхода. Возмущения на входе системы в задаче наблюдения не учитываются. Ошибки наблюдения выхода при этом, правда, рассматриваются, но не конкретизируются. Задача наблюдения является предшественником и частным случаем задачи фильтрации. Изложение ведется в пространстве состояний. Изучены случаи как непрерывного, так и дискретного времени.

Вводится ряд понятий для непрерывных по времени систем, например: наблюдаемость на интервале, полная наблюдаемость. Получены выражения для матрицы наблюдаемости первого типа и матрицы наблюдаемости второго рода. Кратко рассмотрен метод наименьших квадратов. Получен рекуррентный алгоритм наблюдения для дискретной по времени однородной системы. Для случая дискретного времени задачи наблюдения и фильтрации оказываются математически более простыми. Главным результатом главы является структура законов наблюдения в различных формах, дающих решение задачи наблюдения. Полученные в главе результаты имеют большое теоретическое значение и будут полезны при решении задачи фильтрации.

Четвертая глава начинается с рассмотрения метода минимизации среднеквадратичной ошибки, на основе которого решена задача оценки фазового вектора линейной системы на основании наблюдения ее выхода с учетом входных воздействия, случайных возмущений и ошибок измерений. Задача наблюдения, сформулированная в стохастических терминах, называется задачей фильтрации.

Для стохастической системы с дискретным временем:

$$x(k+1) = A(k) \cdot x(k) + B(k) \cdot u(k) + v(k), \quad E\{x(k_0)\} = \xi,$$

и последовательностью наблюдений $y(k_0), \dots, y(k)$ согласно:

$$y(k) = C(k) \cdot x(k) + \omega(k),$$

получен рекуррентный алгоритм вычисления оценки $\hat{x}(k)$.

Предполагается, что задан начальный вектор или его математическое ожидание $E\{x(k_0)\} = \xi$. Последовательность входных воздействий $u(k_0), u(k_0+1), \dots, u(k)$ известна точно. Априорная информация удовлетворяет предположениям: $E\{v(k)\} \equiv 0$, $E\{\omega(k)\} \equiv 0$, $E\{v(k) \cdot v^T(i)\} = Q(k)$, $E\{\omega(k) \cdot \omega^T(i)\} = R(k)$, $E\{x(k_0) \cdot v^T(k)\} \equiv 0$, $E\{x(k_0) \cdot \omega^T(k)\} \equiv 0$, $E\{v(k_0) \cdot \omega^T(k)\} \equiv 0$. Алгоритм линейного несмещенного оценивания с минимальной среднеквадратичной ошибкой вектора $x(k)$ состоит в следующем:

– наблюдающее устройство (фильтр) (рис. 5):

$$x^*(k+1) = A(k) \cdot \hat{x}(k) + B(k) \cdot u(k), \quad x^*(k_0) = \xi;$$

$$\hat{x}(k) = x^*(k) + K(k) \cdot \{y(k) - C(k) \cdot x^*(k)\};$$

– матрица ковариации ошибки измерений и матрица усиления:

$$P^*(k+1) = A(k) \cdot \tilde{P}(k) \cdot A^T(k) + Q(k);$$

$$K(k) = P^*(k) \cdot C^T(k) \cdot \{C(k) \cdot P^*(k) \cdot C^T(k) + R(k)\}^{-1};$$

$$\tilde{P}(k) = P^*(k) - K(k) \cdot C(k) \cdot P^*(k).$$

Наблюдение начинается в начальный момент времени k_0 после проведения первого измерения $y(k_0)$.

Задача фильтрации представляет собой обобщение задачи наблюдения, рассмотренной в третьей главе. При фильтрации учитываются как случайные возмущения, так и ошибки наблюдения, причем фильтр имеет ту же структуру, что и соответствующее следящее устройство. Разница между ними состоит в том, что коэффициент усиления фильтра является оптимальным относительно заданных стохастических свойств возмущений и ошибок измерений. В тоже время коэффициент усиления следящего устройства может быть выбран и из иных соображений.

Рекуррентные законы наблюдения и фильтрации в виде разностных уравнений могут быть непосредственно реализованы с помощью вычислительной техники в реальном масштабе времени.

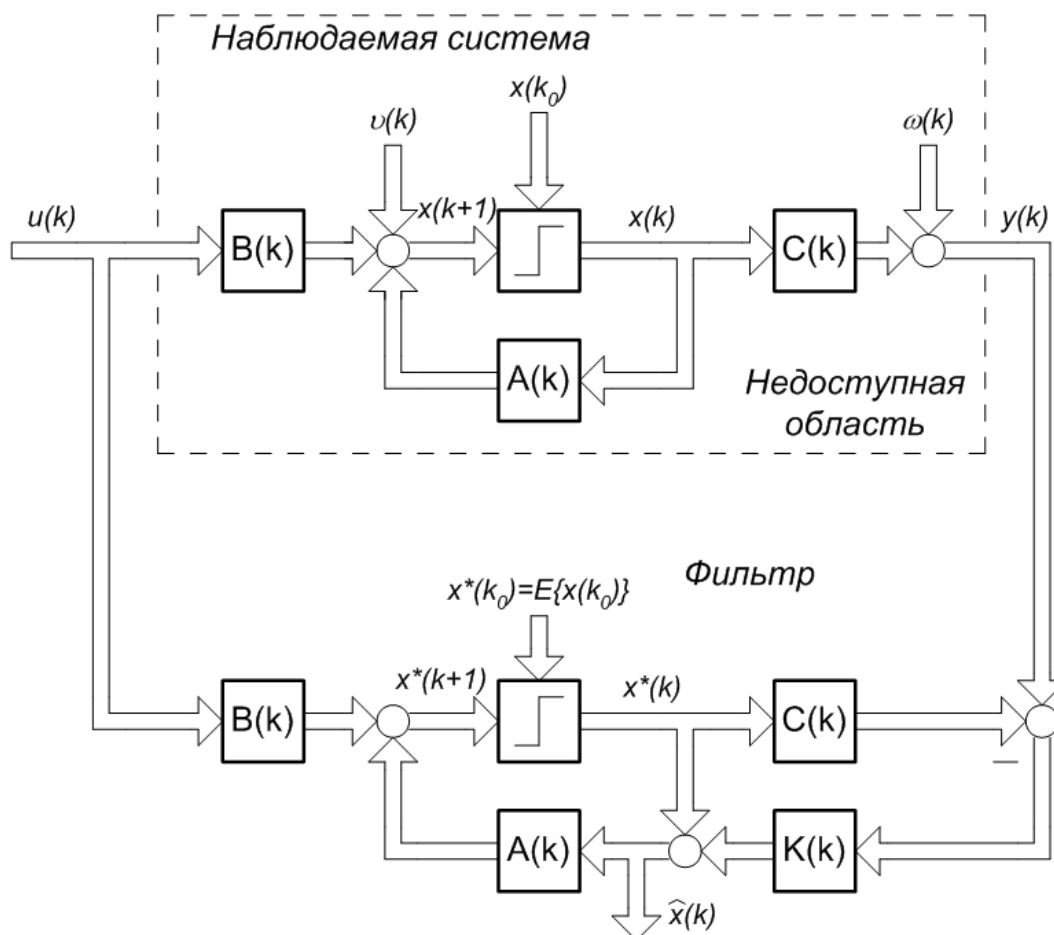


Рис. 5. Наблюдаемая система с измеряемым входным воздействием и наблюдатель (фильтр) Калмана

Пятая глава посвящена программной реализации системы векторного управления асинхронным двигателем на базе 16-ти разрядного цифрового сигнального процессора TMS320LF2407A серии «Motor Control» фирмы Texas Instruments, входящего в состав стартового набора eZdsp™ TMS320LF2407A. Приводится описание экспериментальной установки системы векторного управления и отладочного комплекса. Представлены результаты экспериментальных исследований.

В начале главы предложен вариант реализации структурной схемы электропривода (рис. 6). Наиболее важной частью системы векторного управления является наблюдатель (фильтра Калмана), который позволяет восстанавливать недоступные для измерения координаты электропривода. Наблюдатель позволяет получить оценку проекций вектора тока статора и вектора потокосцепления ротора в неподвижной системе координат $\alpha\beta$, а также оценку скорости вращения ротора двигателя. Реализуемые проекции вектора напряжения в блоке широтно-импульсной модуляции (ШИМ), являются управляющими воздействиями для наблюдателя. Дополнительно наблюдатель получает информацию о токе статора, полученную в результате преобразования измеренных фазных токов в проекции эквивалентного вектора тока в системе координат $\alpha\beta$.

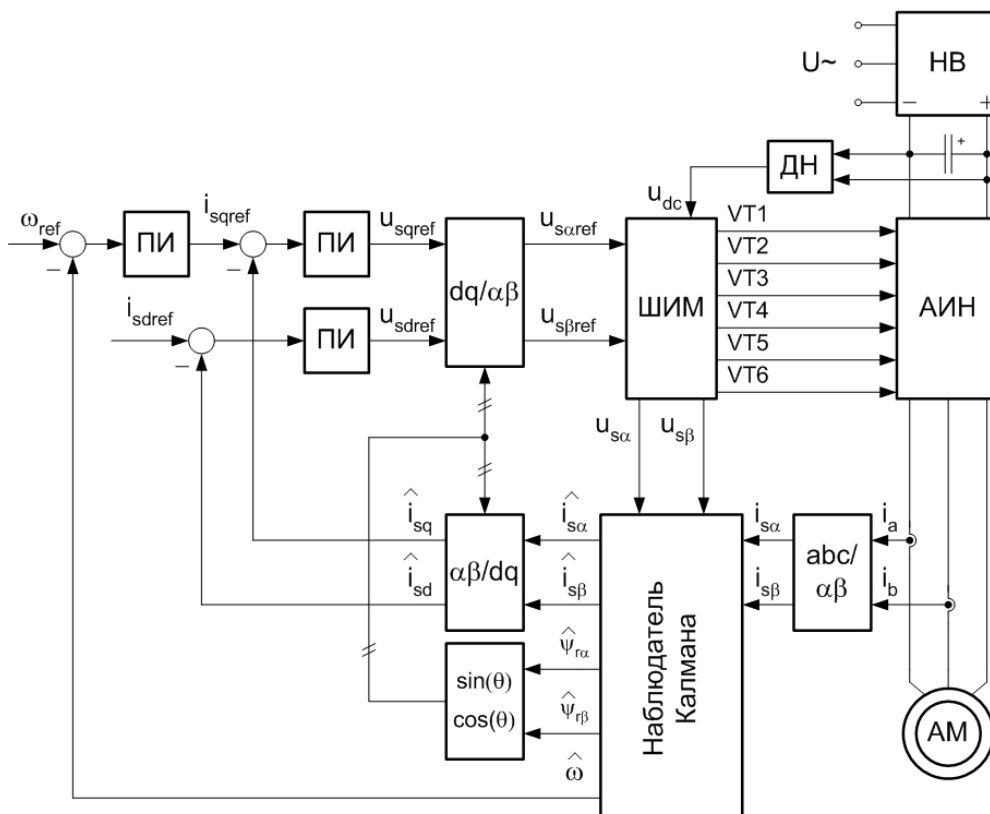


Рис. 6. Структурная схема системы управления

Оценка потокосцепления ротора является наиболее важной задачей, так как от ее точности зависит работоспособность системы и качество регулирования. В качестве обратных связей используются датчики тока в двух фазах питания электродвигателя и датчик напряжения в звене постоянного тока.

Все вычисления выполняются в относительной системе единиц. В качестве базовых величин принимаются удвоенные номинальные значения. Наблюдатель Калмана выполнен в формате представления чисел f1.15 (Q15), а для остальных вычислений (преобразование координат, ПИ-регуляторы, ШИМ и др.) используется формат f4.12 (Q12). Большинство вычислений производится в неподвижной системе координат $\alpha\beta$. Большое внимание уделено программной реализации математических операций над матрицами.

Предложен вариант цифровой реализации ПИ-регулятора с повышенной точностью интегральной составляющей (рис. 7).

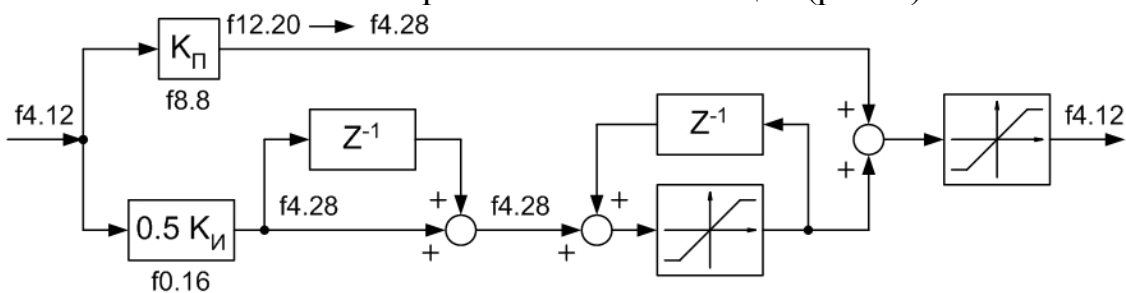


Рис. 7. Цифровая реализация ПИ-регулятора

Рассмотрена программная реализация предложенного алгоритма синусоидальной симплексной пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции.

Силовая часть лабораторной установки выполнена на базе силовой платы серийно выпускаемых в НПП «Новтех» преобразователей частоты для двигателей мощностью 4,0кВт. Силовой сборкой является интеллектуальный силовой модуль PM25RSK120. Цифровая часть выполнена на базе отладочного комплекса eZdsp™ TMS320LF2407A (рис. 8).

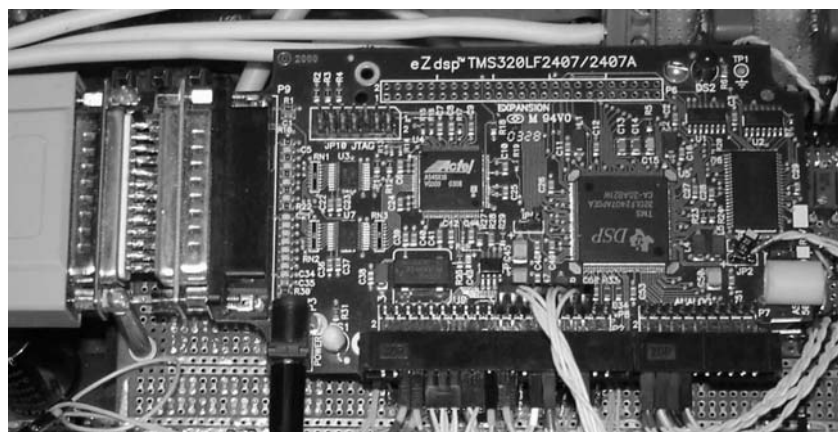


Рис. 8. Отладочный комплекс eZdsp™ TMS320LF2407A

Опытный образец малодатчиковой системы векторного управления асинхронным электроприводом представлен на рис. 9.

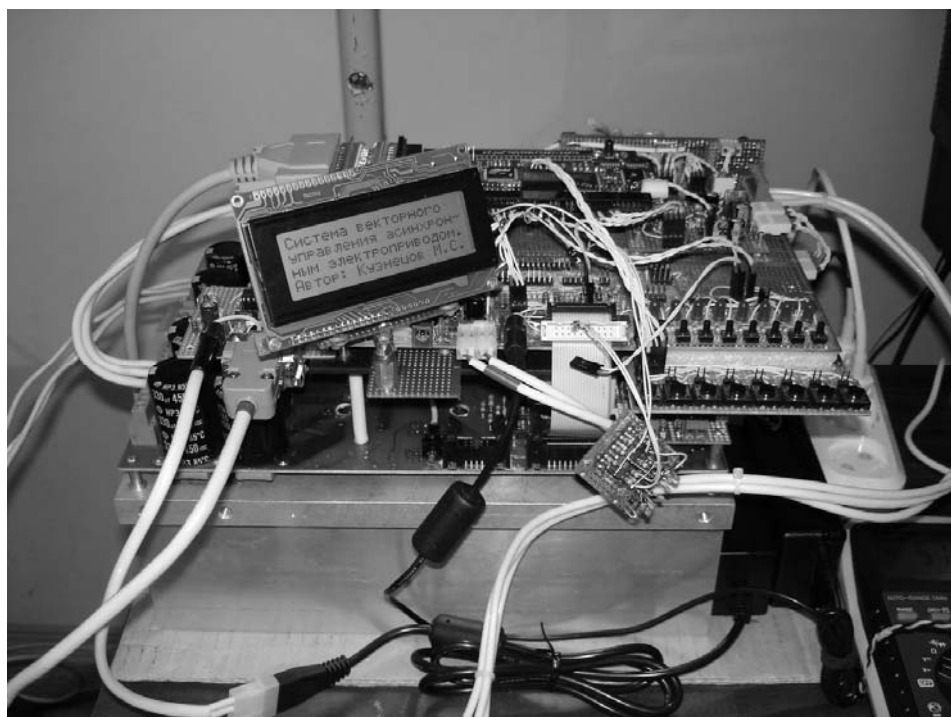


Рис. 9. Экспериментальная установка

Для сопряжения микропроцессора и силовой платы изготовлена плата согласования, к которой для интерфейса с оператором подключаются клавиатура и жидкокристаллический индикатор. Для подключения инкрементального датчика скорости DKS40-A5J02048 предусмотрена дополнительная плата согласования. Измерение фазных токов производится с помощью датчиков тока на эффекте Холла LTS15-NP. Для измерения напряжения в звене постоянного тока используется датчик LV25-P.

Питание энергетического канала силовой платы, импульсного блока питания силовой платы, питание цифровой части системы управления и персонального компьютера между собой гальванически изолированы для повышения помехоустойчивости (рис. 10).

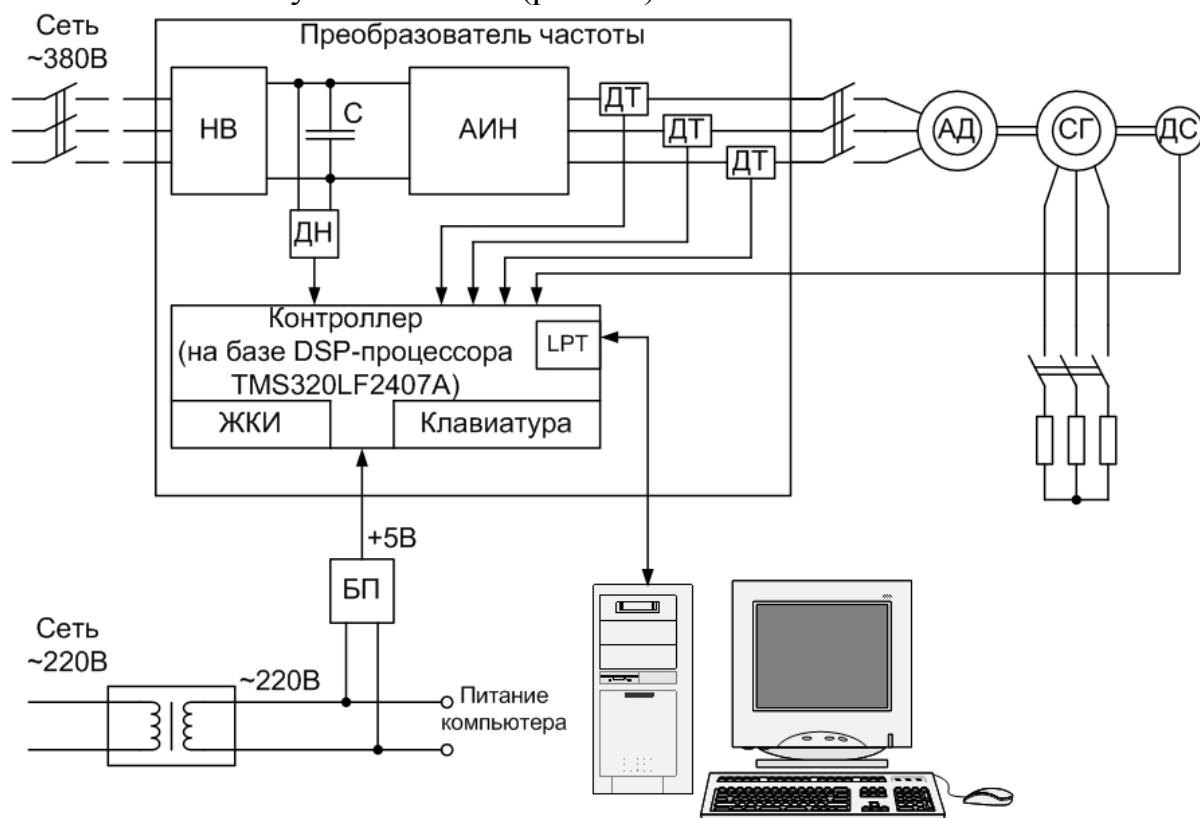


Рис. 10. Схема подключений при проведении испытаний

Выявление ошибки косвенной оценки скорости вращения вала двигателя при использовании рекуррентного алгоритма стохастической фильтрации Калмана происходит при сравнении оценки и эталонной (непосредственно измеренной с помощью инкрементального энкодера) величины скорости вращения.

Приложения. В приложении 1 представлена методика спектрального анализ симплексных алгоритмов модуляции напряжения для автономных инверторов. В приложении 2 представлен исходный текст программы для микропроцессорной системы управления. В приложении 3 представлены результаты экспериментальных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение модернизированного алгоритма синусоидальной симплексной пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции позволило улучшить качество формы выходного напряжения и повысить коэффициент использования напряжения питания автономного инвертора по сравнению с другими алгоритмами модуляции, в частности, классической широтно-импульсной модуляцией. Амплитуда первой гармонической составляющей при симплексной модуляции достигает значения, равного $1/\sqrt{3}$ от величины напряжения в звене постоянного тока, что больше на 7,5%, чем при двухполярной сплошной синусоидальной модуляции. Амплитуды высших гармонических составляющих, например, при кратности частоты модуляции к огибающей частоте 120, при симплексной модуляции практически отсутствуют. При классической модуляции амплитуды высших гармонических составляющих могут достигать нескольких процентов от основной гармоники. Оптимизировано количество переключений на периодах модуляции, что привело к уменьшению коммутационных потерь в силовых ключах.

2. Переход к относительным единицам вносит элемент рационального масштабирования уравнений модели и приводит их к виду, удобному для математического цифрового моделирования. Запись уравнений модели в относительных единицах позволяет оперировать величинами, диапазон численных значений которых, как правило, значительно меньше, чем в исходной системе уравнений. Это способствует повышению точности вычислений и снижению требований к средствам микропроцессорной техники.

3. Ошибка оценки скорости вращения при реализации стохастического фильтра (наблюдателя) в зависимости от изменения нагрузки на валу двигателя и выбора элементов ковариационных матриц случайных возмущений Q и ошибок измерений R может достигать $\pm 1,5\%$ от номинальной скорости вращения, что ограничивает диапазон регулирования скорости электропривода до $40\div 50$.

4. Так как погрешности математических вычислений при использовании 16-разрядных процессоров много меньше погрешностей, обусловленных ошибками измерений и случайными возмущениями, то точность оценки элементов фазового вектора не увеличивается при использовании процессоров с большей разрядностью, чем 16. Поэтому при модернизации электроприводов серии ЭЧР не возникло необходимости перехода на другой тип микропроцессора.

5. Результаты экспериментальных исследований, а также опыт эксплуатации промышленных образцов электроприводов показывают, что электроприводы во всех режимах работы сохраняют устойчивость.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Зимин, Д. А. Моделирование переходных процессов при различных способах пуска асинхронных двигателей / Д. А. Зимин, Т. В. Королев, М. С. Кузнецов // Молодые исследователи – региону: Материалы межрегиональной научной конференции студентов и аспирантов. – Вологда: ВоГТУ, 2002. – С.193-196.
2. Кузнецов, М. С. Асинхронный электропривод с модульным управлением моментом и пространственно-векторной модуляцией напряжения / М. С. Кузнецов // Молодые исследователи – региону: Материалы межрегиональной научной конференции студентов и аспирантов. – Вологда: ВоГТУ, 2003. – С.202-203.
3. Кузнецов, М. С. Векторное управление асинхронными электроприводами на современной элементной базе / М. С. Кузнецов, Т. В. Королев, М. Н. Жирнов // Вузовская наука – региону: Материалы второй всероссийской научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2004. – С.479-481.
4. Кузнецов, М. С. Алгоритмы управления автономным инвертором в электроприводах переменного тока / М. С. Кузнецов, Т. В. Королев, М. Н. Жирнов // Вузовская наука – региону: Материалы второй всероссийской научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2004. – С.482-484.
5. Королев, Т. В. Принцип синтеза структурной схемы асинхронного электропривода / Т. В. Королев, М. С. Кузнецов // Молодые исследователи – региону: Материалы межрегиональной научной конференции студентов и аспирантов. – Вологда: ВоГТУ, 2004. – С.161-162.
6. Королев, Т. В. Возможные причины возникновения качаний ротора короткозамкнутых асинхронных двигателей / Т. В. Королев, М. С. Кузнецов // Молодые исследователи – региону: Материалы межрегиональной научной конференции студентов и аспирантов. – Вологда: ВоГТУ, 2004. – С.165-167.
7. Грузов, В. Л. Отладка управляющей программы электропривода с использованием отладочного комплекса // В. Л. Грузов, Т. В. Королев, М. С. Кузнецов // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: Сб. трудов. Вып. 9 / Под ред. д.т.н., проф. О.Я. Кравца. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2004. – С.179-180.
8. Грузов, В. Л. Проектирование асинхронного электропривода с использованием ЭВМ на этапе моделирования // В. Л. Грузов, Т. В. Королев, М. С. Кузнецов // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: Сб. трудов. Вып. 9 / Под ред. д.т.н., проф. О.Я. Кравца. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2004. – С.180-181.
9. Королев, Т. В. Предварительное определение параметров асинхронного двигателя / Т. В. Королев, М. С. Кузнецов // Молодые исследователи – региону: Материалы межрегиональной научной конференции студентов и аспирантов. – Вологда: ВоГТУ, 2005. – С.306-308.

10. Королев, Т. В. Пространственно-векторная модуляция напряжения при управлении автономным инвертором / Т. В. Королев, М. С. Кузнецов // Молодые исследователи – регионам: Материалы межрегиональной научной конференции студентов и аспирантов. – Вологда: ВоГТУ, 2005. – С.318-320.

11. Королев, Т. В. Оценка качества напряжения на выходе автономного инвертора при симплексной модуляции / Т. В. Королев, М. С. Кузнецов // Молодые исследователи – регионам: Материалы межрегиональной научной конференции студентов и аспирантов. В 2-х т. – Вологда: ВоГТУ, 2006. – Т.1. – С.76-78.

12. Кузнецов, М. С. Испытательный комплекс для тестирования и отладки малосенсорных асинхронных электроприводов / М. С. Кузнецов, Т. В. Королев, В. Л. Грузов // Молодые исследователи – регионам: Материалы Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов. В 2-х т. – Вологда: ВоГТУ, 2006. – Т.1. – С.81-83.

13. Кузнецов, М. С. Пространственно-векторная модуляция напряжения в автономных инверторах с учетом программной реализации системы управления / М. С. Кузнецов // Информационные технологии моделирования и управления. – 2006. – №9(34). – С.1204-1210.

Публикации в изданиях, входящие в перечень **Высшей аттестационной комиссии** Министерства образования и науки Российской Федерации ведущих рецензируемых научных журналов и изданий:

14. Кузнецов, М. С. Пространственно-векторная модуляция напряжения в автономных инверторах с учетом программной реализации системы управления / М. С. Кузнецов // Системы управления и информационные технологии. – 2006. – №1.2(23). – С.248-251.