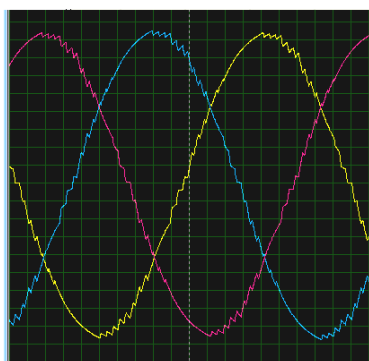




Частотный преобразователь ВОСЬМИКРУТ +Восьмикрут HD



U/f – скалярное управление АД
 $U(\varphi_i)/f$ – управление АД
(элемент векторного управления)

Краткое описание принципов
модуляции
(версия 8)



Существует множество более сложных алгоритмов и решений по вопросу управления асинхронными двигателями, использующих контроллеры с аппаратными ШИМ модулями. В классических версиях “Восьмикрут” использован простой распространённый PIC16 микроконтроллер, который выполняет основную функцию – генератор скалярной трёхфазной пространственно-векторной ШИМ. Разные варианты программ позволяют вращать как стандартные двигатели на 50Гц, так и специальные на 200-400Гц.

Для увеличения плавности регулирования скорости и внедрения дополнительных возможностей и улучшений по управлению приводом и режиму питания машин разработана версия программы управления “Восьмикрут HD” на базе микроконтроллера PIC18F1330 (аппаратным ШИМ). Схемы и ПО доступны пользователям – [здесь](#) и [здесь](#). Информация по “HD” версии программы [изложена в данном документе](#).

Об общей концепции, на основе которой разрабатывался алгоритм управления транзисторным инвертором

Цель - осуществить плавный запуск двигателя и обеспечить работу с номинальными параметрами на естественной механической характеристике, поддерживая возможность разомкнутого скалярного регулирования оборотов частотой вниз и вверх от номинальной.

Основная задача - генерирование сигналов управления трёхфазным транзисторным инвертором с реализацией алгоритмов регулирования скорости и обеспечения номинального режима питания двигателя.

Способ реализации – цифровой программный генератор ШИМ пространственного вектора напряжения (SVPWM).

Про трёхфазную машину

Трёхфазный двигатель имеет в статоре три фазные обмотки, сдвинутые в пространстве на 120 градусов и охваченные общей магнитной связью (трёхфазный двигатель – трёхфазный трансформатор – эл. машины).

При подаче напряжения на одну из обмоток, возникнет ЭДС как в роторе, так и в двух других обмотках. (Это явление, например, используется для определения неизвестных начала и концов фазных катушек при неподвижном роторе, или в так называемом “Расщепителе фаз” при вращающемся роторе). *Магнитная система двигателя едина и взаимосвязана.*

Из этого следует - ток одной из обмоток определяется не только поданным на неё напряжением, а ещё и состоянием других обмоток и ротора.



Про вектор потокосцепления

Общее потокосцепление машины определяется соотношением величин и направлений *токов фазных* обмоток и токов ротора. Можно представить его в виде одного суммарного вращающегося вектора. Момент двигателя определяется магнитным взаимодействием. Для возможности обеспечения номинальных режимов машины магнитное поле должно быть номинальным. Ток обмоток, а соответственно и вектор общего потокосцепления в *установившемся* режиме нагрузки зависит от соотношения *напряжений* на фазных обмотках. Для формирования нужного направления и амплитуды потокосцепления необходимо воздействовать напряжением на фазные обмотки и формировать нужный суммарный вектор напряжения машины V_{ref} . Вектор потокосцепления инерционен и будет догонять, следовать за суммарным вектором напряжения (индуктивный характер нагрузки). Формирование V_{ref} и происходит посредством модуляции пространственного вектора напряжения (SVPWM).

Про базовые вектора SVPWM и вектор напряжения V_{ref}

Обмотки фаз неподвижны, сдвинуты в пространстве на 120гр. Каждая фаза создаёт свой вектор напряжения. Он может иметь всего *два противоположных* направления в зависимости *от полярности* приложенного напряжения, а его *амплитуда* определяется *величиной* этого напряжения. Из *геометрической* суммы трёх векторов напряжения каждой фазы получается суммарный *резльтирующий вектор* напряжения двигателя. Именно его направление и амплитуда (длина) определяют параметры получаемого вектора общего потокосцепления двигателя.

Если рассмотреть схемы подключения трёхфазных обмоток – треугольника и звезды к трёхфазному инвертору, то возможны разные варианты работы транзисторов.

Один из них, когда одновременно открыты два транзистора (другое название - 120-ти градусная коммутация). В таком режиме нет возможности включения нулевого значения напряжения на всех фазах. Структура силовой цепи переменна и зависит от характера нагрузки. Такая работа транзисторов может применяться для простого управления BLDC-моторами.

Другой режим с одновременным открытым состоянием трёх транзисторов (другое название 180-ти градусная коммутация) и он как раз позволяет формировать *нулевое значение* напряжения на всех фазах, путём *закорачивания* обмоток. Структура силовой цепи постоянна и не зависит от характера нагрузки. В таком режиме транзисторы одной фазы инвертора (стойки, полумоста) работают комплементарно (всегда включен какой-то один из двух).



Транзисторы работают в *ключевом режиме* и *напряжение DC-звена принимаем постоянным*. Если перебрать все комбинации включения по алгоритму с одновременным открытием трёх транзисторов (Таблица 1) то можно получить всего 6 направлений общего вектора напряжения, подаваемого на машину. Назовём их *активными базовыми векторами* (направлены по кругу через каждые 60град., делят всю окружность на 6 секторов). И также можно получить те самые два нулевых состояния, когда все обмотки замкнуты инвертором накоротко и напряжение на них равно 0. Назовём эти состояния *нулевыми векторами*.

От схемы соединения обмоток (звезда-треугольник) зависит общий *сдвиг положения* всех базовых векторов, картина фазной ШИМ и *напряжение на обмотках*. Все угловые соотношения между базовыми векторами остаются неизменными.

Активный базовый вектор – когда обмотки двигателя подключаются транзисторами к напряжению DC звена.

Нулевой вектор – когда обмотки двигателя закорочены инвертором и напряжение равно 0 (но ток обмоток двигателя при этом протекает через транзисторы и обратные диоды).

Графически это выглядит так:

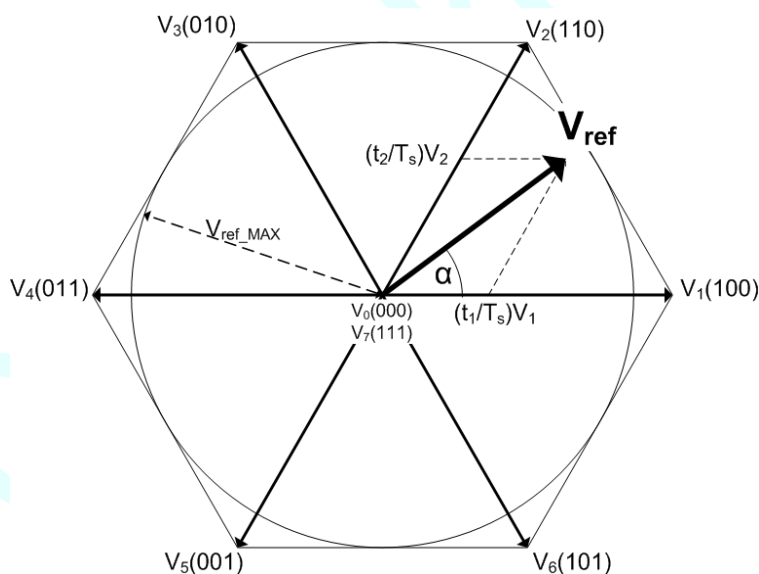


Рис. 1 Направления шести базовых векторов.

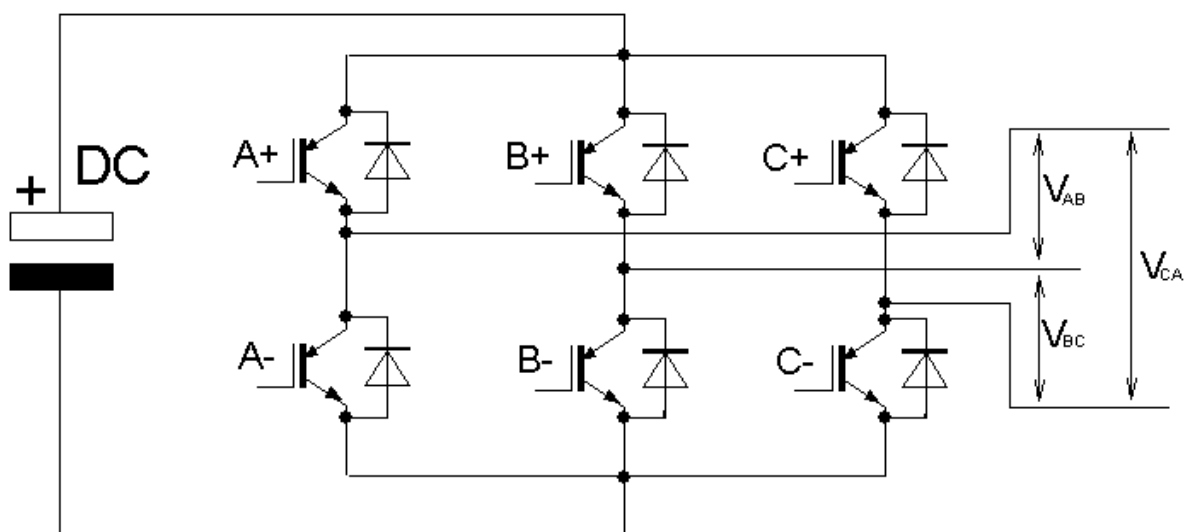


Рис. 2 Схема трёхфазного инвертора и формируемые им вектора напряжений.

Базовый вектор	A+	B+	C+	A-	B-	C-	VAB	VBC	VCA	
V0 = {000}	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	0	0	0	нулевой вектор
V1 = {100}	ВКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ	+VDC	0	-VDC	активный вектор
V2 = {110}	ВКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	0	+VDC	-VDC	активный вектор
V3 = {010}	ВЫКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	-VDC	+VDC	0	активный вектор
V4 = {011}	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	-VDC	0	+VDC	активный вектор
V5 = {001}	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	0	-VDC	+VDC	активный вектор
V6 = {101}	ВКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	+VDC	-VDC	0	активный вектор
V7 = {111}	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	0	0	0	нулевой вектор

Таблица 1 Комбинации включения транзисторов при создании базовых векторов напряжений.

Таким способом модуляции формируется непрерывная двунаправленная характеристика инвертора напряжения. Выходной вектор напряжения задаётся однозначно и не зависит от наличия и направления тока фаз инвертора (аналогично трёхфазной сети). Возможна лишь незначительная ошибка из-за наличия мёртвого времени и падения напряжения на силовых полупроводниках инвертора. Это важно для возможности питания и управления асинхронным двигателем в разных режимах. Двигатель представляет собой активно-индуктивную нагрузку с ЭДС.



Про вращение и получение промежуточных векторов V_{ref}

Если транзисторным инвертором управлять сдвинутым на треть *меандром*, как в известных многим логических схемах, сгенерированный таким способом вектор напряжения будет скакать через каждые 60 град. по базовым векторам, а нулевых векторов не будет совсем. Это при всей инерционности магнитной системы не позволит создать плавного вращения вектора потокоцепления и вызовет ответную реакцию ротора, которая будет выражаться в *сильных пульсациях момента и искажениях потребляемого тока*.

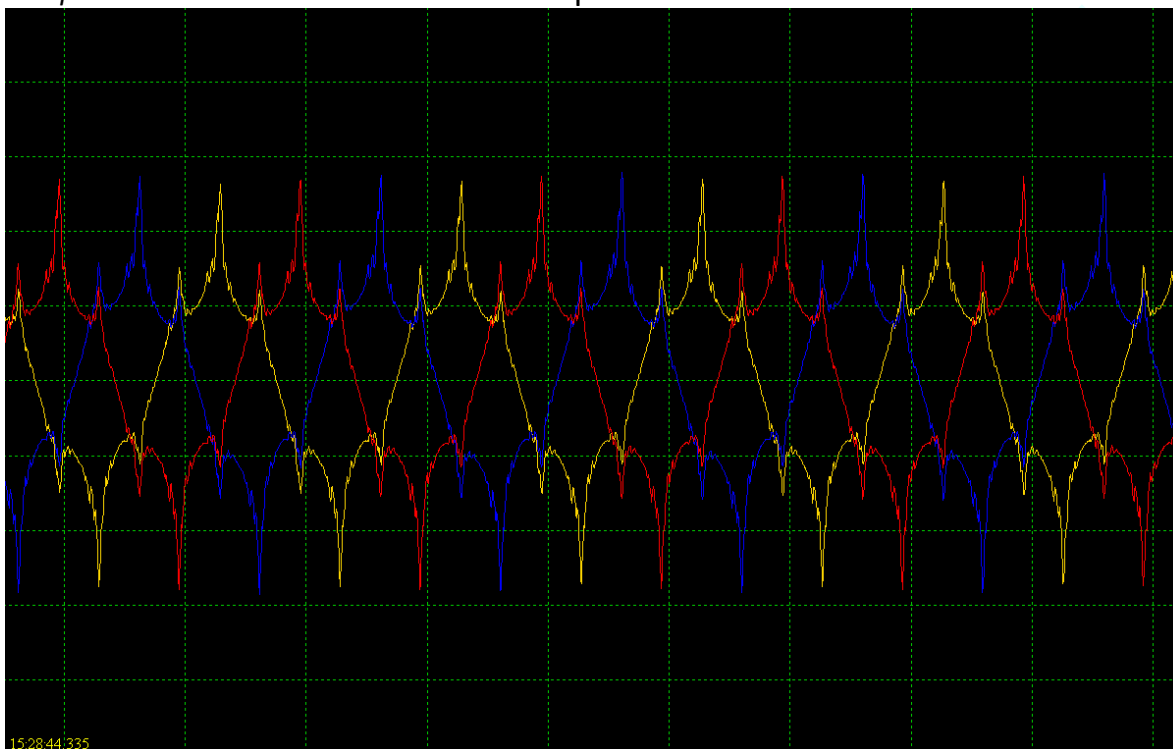


Рис. 3 Ток машины при питании базовыми векторами на х-х

Для получения плавного вращения вектора потокоцепления и ротора соответственно нужно формировать *промежуточные* вектора напряжений, направления которых будут лежать в секторе между базовыми (V_{ref} на рис. 1). Физически для этого нужно изменение величины и направления напряжения на фазных обмотках. Но т.к. у нас предполагается ключевой режим работы транзисторов, то делаем это с помощью ШИМ. Это формирует как-бы мнимый изображающий вектор V_{ref} . Реально каждым ШИМ переключением будет генерироваться какой-то *активный и нулевой вектор в определённом временном соотношении*, формируя этим среднее “мнимое” значение V_{ref} . В виду инерционности магнитной системы и достаточно высокой частоты генерации векторов напряжения по отношению к рабочей частоте вращения, вектор потокоцепления будет определяться именно средним V_{ref} . При этом *каждый ШИМ импульс на любой обмотке воздействует на V_{ref} и на общий вектор потокоцепления двигателя*.



На выходе инвертора вращением Vref формируется ШИМ-эквивалент трёхфазного напряжения нужной величины. Намагничивание машины определяется модулем Vref. Для питания двигателя, номинальным напряжением 220В на частоте 50Гц – должен быть сформирован ШИМ-эквивалент 220В. Это модуляция Vref, которая задаёт ток намагничивания двигателя эквивалентный току намагничивания при подключении к синусоидальному напряжению с действующим значением 220В.

Про алгоритмы формирования Vref в “Восьмикруте”

Есть множество вариантов, как именно перебирать базовые и нулевые вектора для получения нужного направления и величины Vref.

В первых версиях программы (на PIC16F628) был применён упрощённый алгоритм формирования: *нулевой 000 - базовый 1 – базовый 2 – нулевой 111 и далее повтор.* (1 и 2 – это номера базовых векторов одного сектора, которые затем меняются по одному при переходе в другой сектор). При этом транзисторы инвертора работают симметрично, но при переходе с нулевого 000 на нулевой 111 оказываются закрытыми все 6 ключей на величину мертвого времени. Построение Vref происходит за один ход базовых и нулевых векторов, частота их генерации (частота ШИМ на обмотках двигателя) равна частоте ШИМ на затворах транзисторов.

В новых версиях (на PIC16F648A) в программе модуляторе применён классический алгоритм формирования вида: *базовый 1 – базовый 2 – нулевой вектор 111 - базовый 2 - базовый 1 - нулевой вектор 000 - и далее повтор.* При этом также транзисторы работают симметрично, всегда (за исключением мертвого времени) открыты 3 ключа. Построение Vref происходит за два хода базовых и нулевых векторов (прямой и обратный, двухходовая ШИМ, симметричный вектор), частота их генерации (частота ШИМ на обмотках двигателя) равна двойной частоте ШИМ на затворах транзисторов. При одинаковой инерционности вектора потокосцепления это даёт большую плавность его поворота (и при использовании той же частоты ШИМ, что и в первых версиях снижена переменная ШИМ составляющая индукции в железе статора). Для получения максимального значения вектора Vref и дополнительного снижения потерь на переключения в силовом инверторе в алгоритм была введена возможность частичного выключения перебора нулевых векторов. Алгоритм на некоторых участках тогда имеет вид: *базовый 1 – базовый 2 - базовый 2 - базовый 1 и т.д.* Частота генерации на таких участках становится равной частоте ШИМ или отключается.



О программе “Восьмикрут”

В качестве примера ниже представлена структура управления приводом программы под задатчик частоты (крутилку).

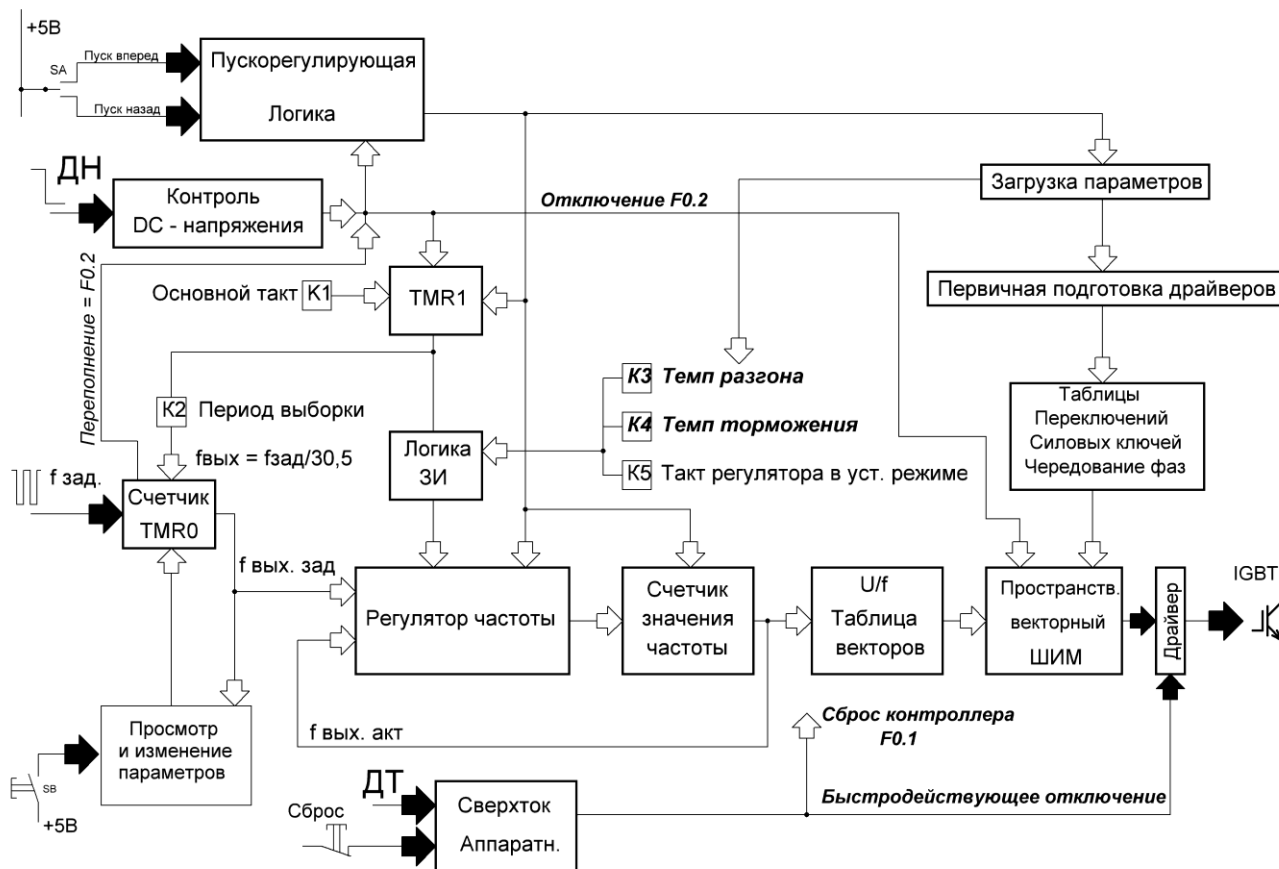


Рис. 4 Структура программы

Программа содержит функции логики пускорегулирования, задатчика интенсивности и регулятора частоты, изменения параметров, таблицу длительностей векторов и пространственно-векторный модулятор ШИМ по таблицам переключения. Имеется также защитная функция отключения ШИМ при детектировании датчиком напряжения ДН пониженного или повышенного напряжения DC-звена. Защита по току выполняется аппаратно на уровне управления драйверов силовых ключей. Подробнее описание эл. схемы в документе “Устройство и Наладка Восьмикрут” [здесь](#) и [здесь](#).



Пространственно-векторный ШИМ “Восьмикрут”

Выходные сигналы управления транзисторами создаются посредством программного перебора констант (интервалов времени) и соответствующих переключений транзисторов инвертора.

Генерация одного оборота магнитного поля двигателя программно выполняется генерированием 18 направлений вектора напряжения (V_{ref}). (Если посмотрите самые новые исходные файлы, вы легко найдёте там места, где формируются эти направления). Соотношение времени действия активных и нулевых векторов определяет амплитуду V_{ref} (напряжение). Шаг угла поворота $V_{ref} = \sim 20^\circ$ и определяется соотношением времени действия двух активных векторов сектора. Длительность прохождения подпрограммы генерирования одного направления V_{ref} формирует период ШИМ, а время всего цикла программы период выходной частоты. Таким образом *частота ШИМ в “Восьмикруте”* определяется генерацией векторов, является *синхронной* и кратной выходной частоте. Её значения лежат в диапазоне 2 - 4,5кГц для программ на 50Гц и 2 - 9кГц для программ на 400Гц.

В каждом секторе строятся по 2 промежуточных направления вектора, на PIC16F648A с двойной частотой генерации, как было отмечено выше. Генерацию одного из направлений вектора V_{ref} можно наблюдать по ШИМ импульсам одной ширины. Каждое из 18 направлений может генерироваться несколько раз в зависимости от множителя. Двойная генерация и множитель приводят к формированию дополнительных частных положений вектора потокосцепления, что делает его вращение относительно плавным. 18 направлений V_{ref} оказывается достаточным, чтоб 4квт-ный мотор крутился на 1Гц, даже при ограничении по разрядности части этих направлений без особых вибраций ротора.

Каждое направление генерируется поочередным переключением транзисторов стоек фаз по вышеописанным алгоритмам перебора активных и нулевых векторов, через отсчётные интервалы времени. Имеется всего 9 ступеней построения одной полуволны, которые получаются из 7 входных задающих интервалов времени констант и множителя. Минимизация при построении программы привела к такому минимальному числу входных данных, чтоб ничего не пересчитывать и расположить всё в таблицах. Три числа определяют длительность активных базовых векторов, а четыре остальных длительность нулевых. Множитель подгоняет диапазон выходной частоты. Разрядность чисел - 1 байт(.255). Исходный расчёт длительностей векторов под программу ШИМ модулятора выполняется в [Excel файле](#).

Программа построена так, что просто перебирает нужные интервалы, а в прерывании в любой момент времени, не зависящий от текущего положения вектора, быстро сменяет исходные данные, считывая новые из таблиц, налету плавно меняя частоту вращения и напряжение, практически без скачков. Для



улучшения и плавного перехода между частотами имеется логика выбора минимального остаточного множителя для следующей ступени частоты.

Управление транзисторами по ходу алгоритма выполняется по значениям таблиц переключения. Туда входят 8 стандартных комбинаций транзисторов (векторов), 6 активных и 2 нулевых + мертвое время при множестве переходов между ними = всего 26 вариантов и ещё несколько для обратного вращения, некоторые повторяются и меняются местами (в итоге более 30, в исходных файлах это таблицы переключения прямого и обратного вращения).

На выходе инвертора получаются близкие к синусоидальным линейные вектора напряжений, а при максимальном выходном напряжении трапецеидальная модуляция. При этом вектор напряжения V_{ref} продолжает движение (смещается) за счёт всегда присутствующей модуляции двух базовых векторов. И так как - *магнитная система двигателя едина и взаимосвязана* - вектор потокосцепления продолжает вращаться и потребляемый ток по фазам остаётся гармоническим.

На подходе к генерированию номинальной частоты и максимального выходного напряжения уменьшается эквивалентная частота ШИМ и соответственно помехи и коммутационные потери на ключах. В этом режиме на затворах транзисторов имеет место выключение ШИМ на треть периода. Схема драйвера должна быть способна обрабатывать время открытого и закрытого состояния транзисторов по 6,5мс.

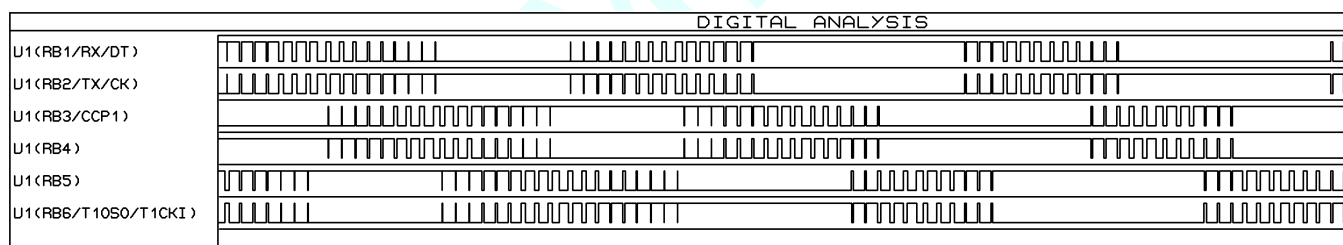


Рис. 5 Диаграмма шести выходных ШИМ сигналов с микроконтроллера при разгоне.

На рис. 5 представлен фрагмент перехода с частоты 48,5Гц на 49Гц с пропуском 3 нулевых векторов и построение вектора V_{ref} при этом большей амплитуды только через активные базовые вектора. Также наглядно видно снижение частоты коммутации ключей за счёт более длительного времени открытия или закрытия транзисторов.

Данное программное решение “Восьмикрут” позволяет получить универсальное управление трёхфазным инвертором с минимальными коммутационными потерями и максимальным использованием питающего напряжения, успешно решая поставленную задачу регулирования скорости и обеспечения номинального режима работы трёхфазного двигателя.

На низких частотах (16,5-20Гц) генерируемая зависимость U/f имеет небольшой подъем, оптимальный для работы двигателя средней мощностью около 4 кВт без потери момента. На данный момент имеются оптимизированные



<DC-AC> VOSMIKRUT SOFT



сборки программ под мощности двигателей $\leq 550\text{Вт}$, $\leq 1500\text{Вт}$, $\leq 4000\text{Вт}$ для получения номинального момента на низких оборотах и расширения диапазона регулирования. А также сборки для однофазных двигателей и управление двигателями постоянного тока.

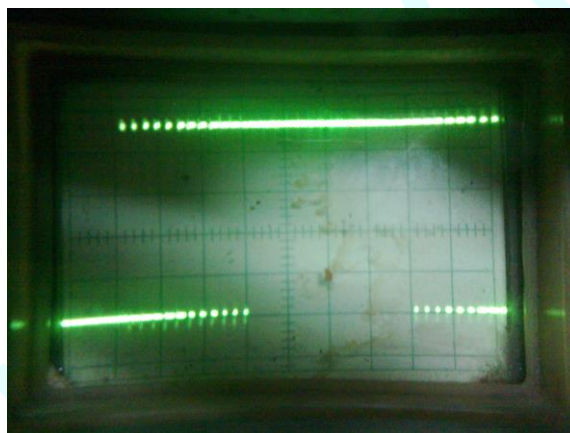
Осциллограммы, диаграммы сигналов и модуляций

Для сравнения ниже представлены аналоговые осциллограммы затворов при максимальном выходном напряжении и частоте 50Гц:



$U = 5\text{В/дел}$ $t = 1,5\text{мс/дел}$

Рис. 6 Синус ШИМ с 0 векторами



$U = 5\text{В/дел}$ $t = 1,5\text{мс/дел}$

Рис. 7 Векторный режим ШИМ



На Рис.8 представлены сигналы на выводах контроллера при генерации разных частот и напряжений векторной ШИМ:

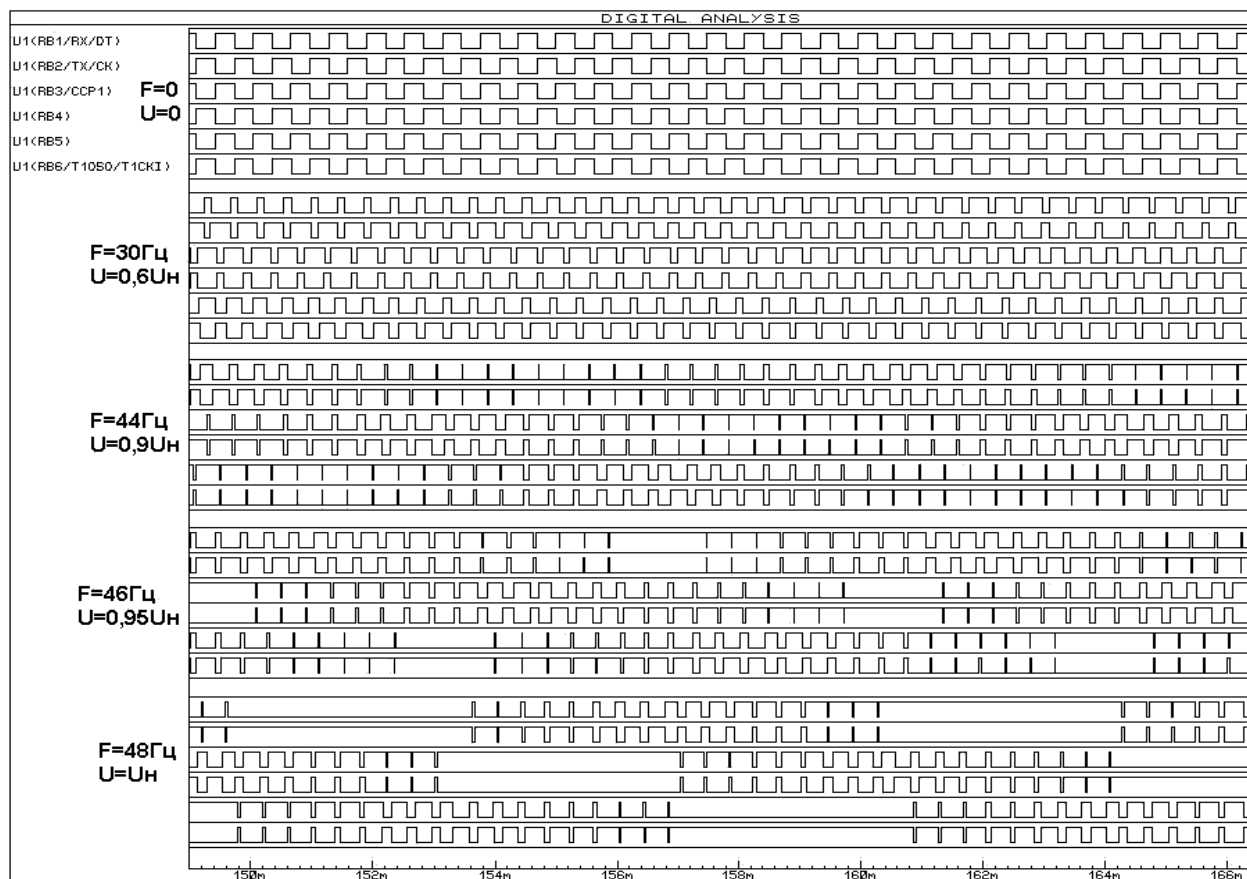


Рис. 8 Диаграмма шести выходных ШИМ сигналов с микроконтроллера для различных частот и напряжений.

Как видно при генерировании околонулевого напряжения работают в основном только нулевые векторы 000 и 111.



<DC-AC> VOSMIKRUT SOFT



Рис. 9 показывает разницу импульсов модуляции на транзисторах и получающегося выходного напряжения на фазах двигателя при векторной ШИМ:

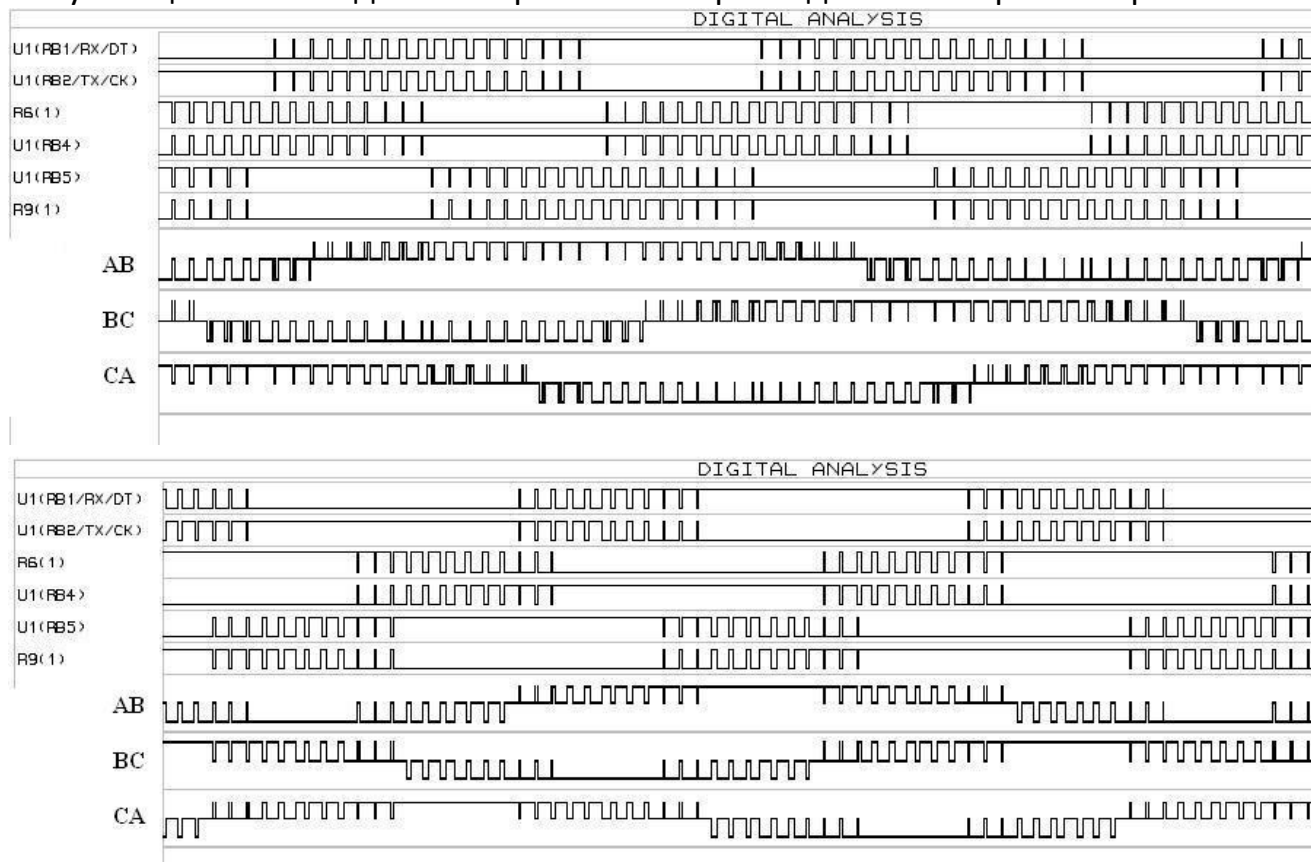
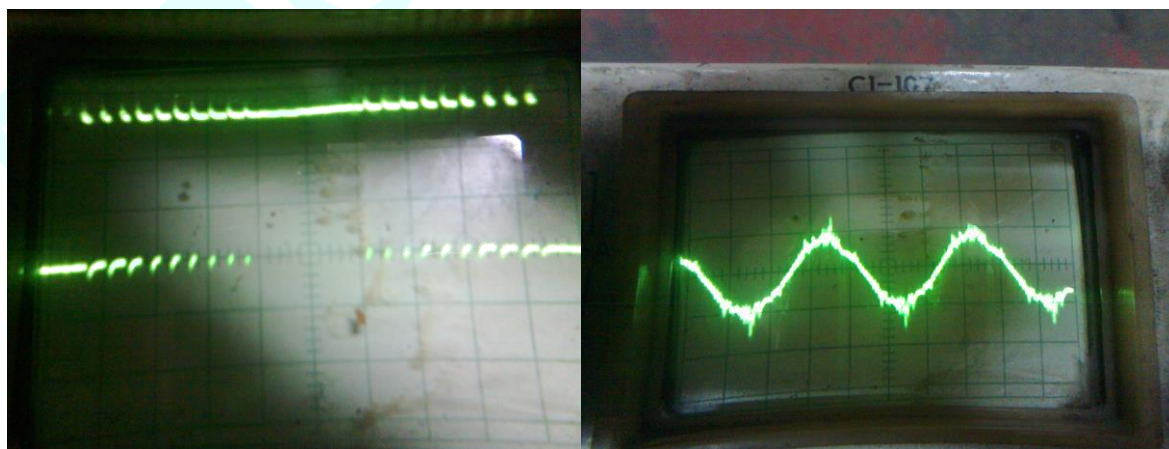


Рис. 9 Диаграммы выходных ШИМ сигналов управления с микроконтроллера и получающаяся ШИМ разность на выходе инвертора при частотах 48Гц (верх) и 50Гц. Выходное напряжение является разностью напряжений на стойках фаз.

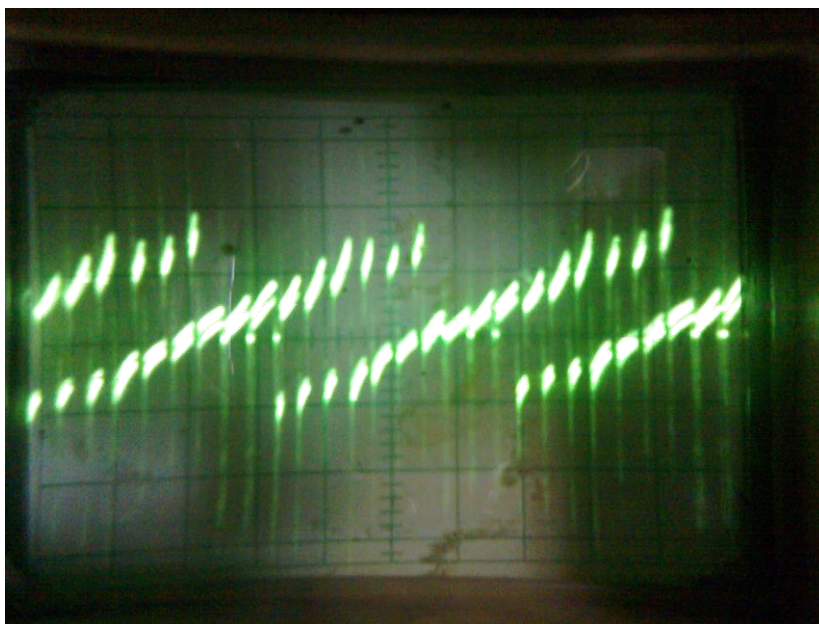
Ниже представлены различные аналоговые осциллограммы при векторной модуляции “Восьмикрут”.



U = 100V/дел t = 1мс/дел

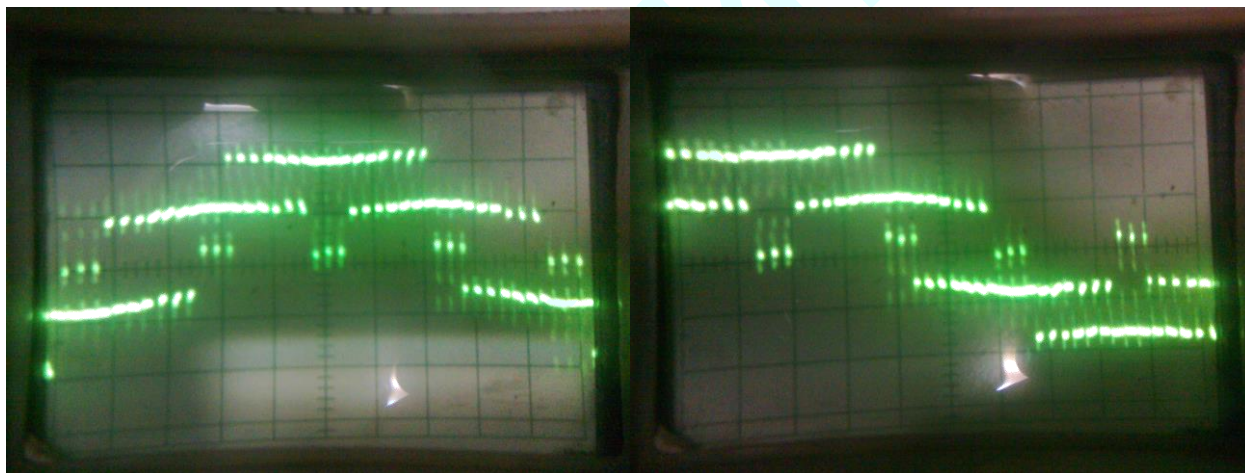
I = 6A/дел t = 5мс/дел

Рис. 10 Полуволна ШИМ на обмотке двигателя и ток фазы двигателя, 50Гц.



$I = 6\text{A/дел}$ $t = 1,4\text{мс/дел}$

Рис. 11 Форма тока между инвертором и DC-звеном, снято с шунта, 50Гц. Холостой ход двигателя, оптимальное намагничивание. Ток разнополярный и его среднее значение мало.



$U = 175\text{В/дел}$ $t = 1,4\text{мс/дел}$

Рис. 12 ШИМ на обмотке двигателя при подключении звездой, DC= 530В. Видно смещение нуля звезды с частотой третьей гармоники.

В качестве нагрузки при снятии осциллограмм использовался двигатель АИР100S2У3.

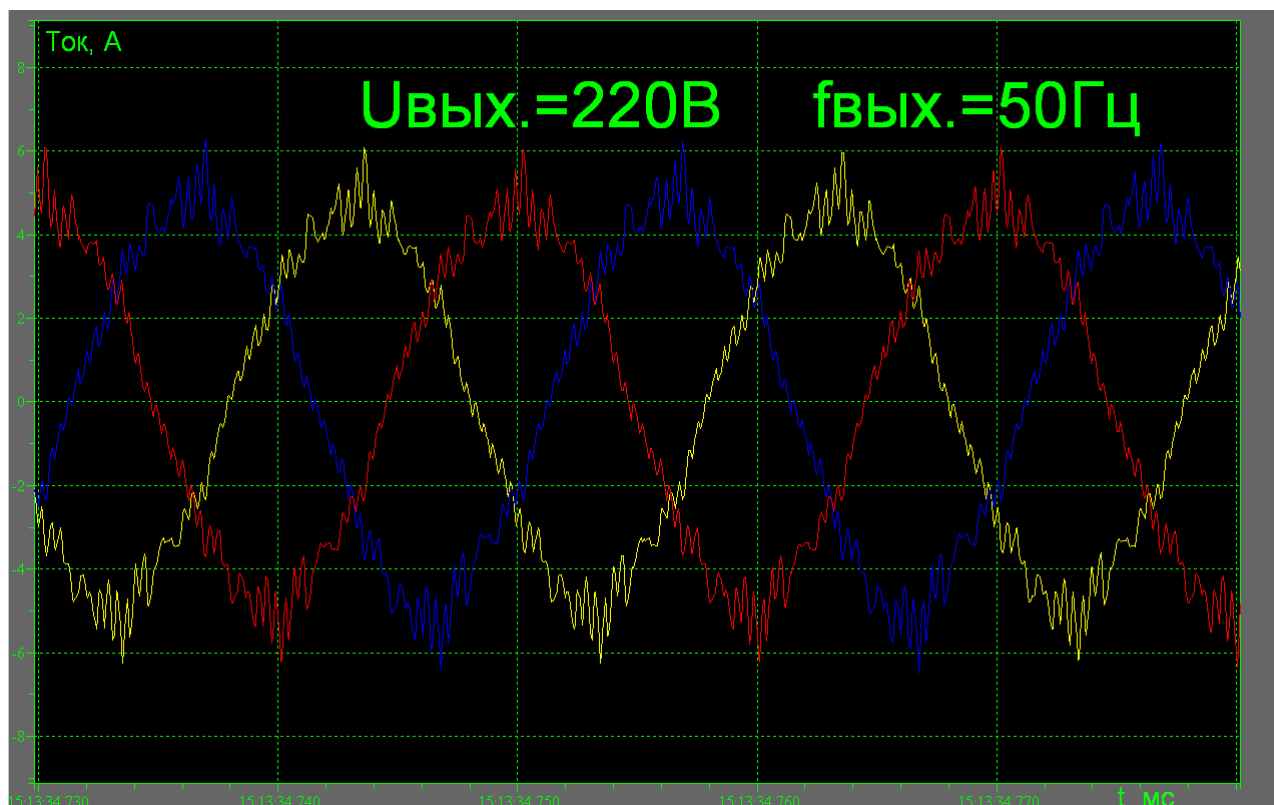


Рис. 13 Ток трёх фаз питания двигателя от преобразователя “Восьмикрут”
Холостой ход двигателя.

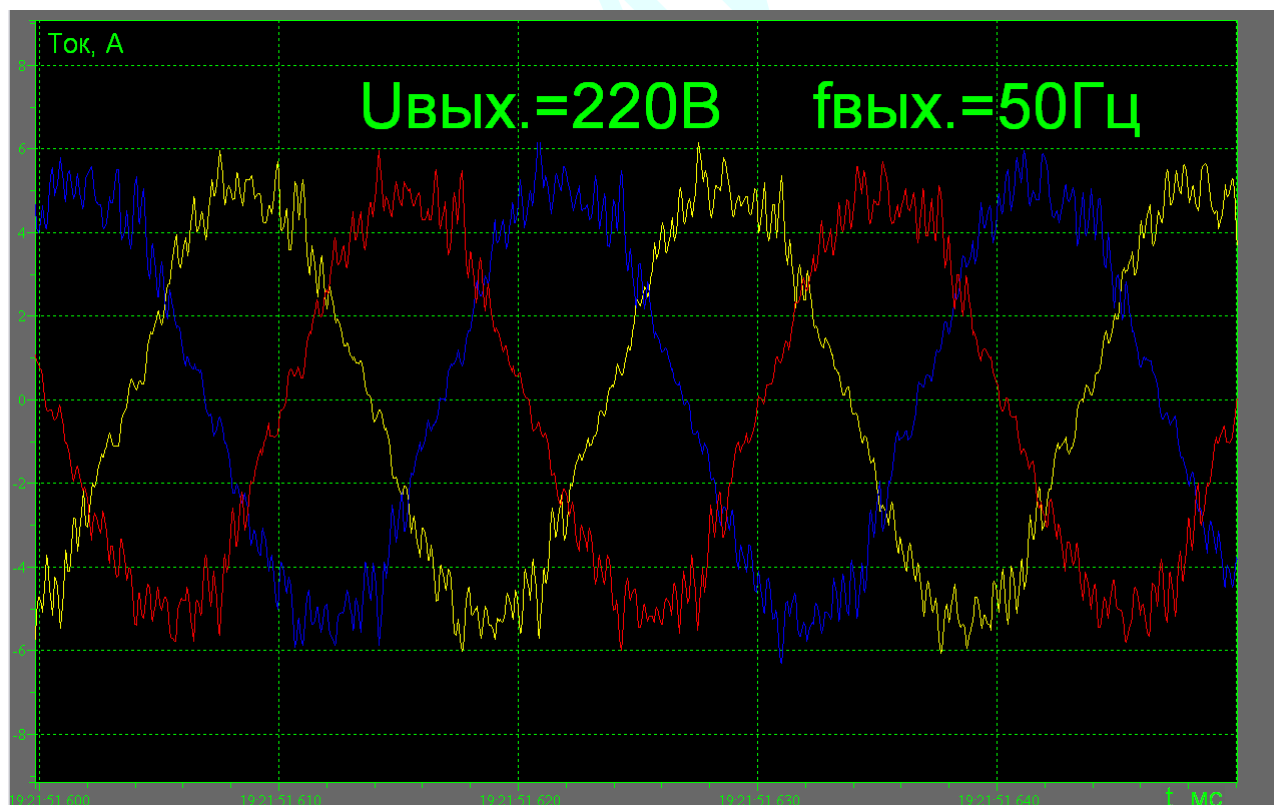


Рис. 14 Ток трёх фаз питания двигателя от преобразователя “Восьмикрут”
Нагрузка двигателя ~25-30%.



<DC-AC> *VOSMIKRUT SOFT*



В качестве нагрузки инвертора при снятии токовых сигналов использовался двигатель АИР80А2УЗ, 1500Вт. Запись токовых кривых производилась на самопишущий осциллограф при номинальной частоте 50Гц и полном напряжении на выходе преобразователя. Сигнал снимался трансформаторами тока в каждой выходной фазе инвертора.

ВОСЬМИКРУТ

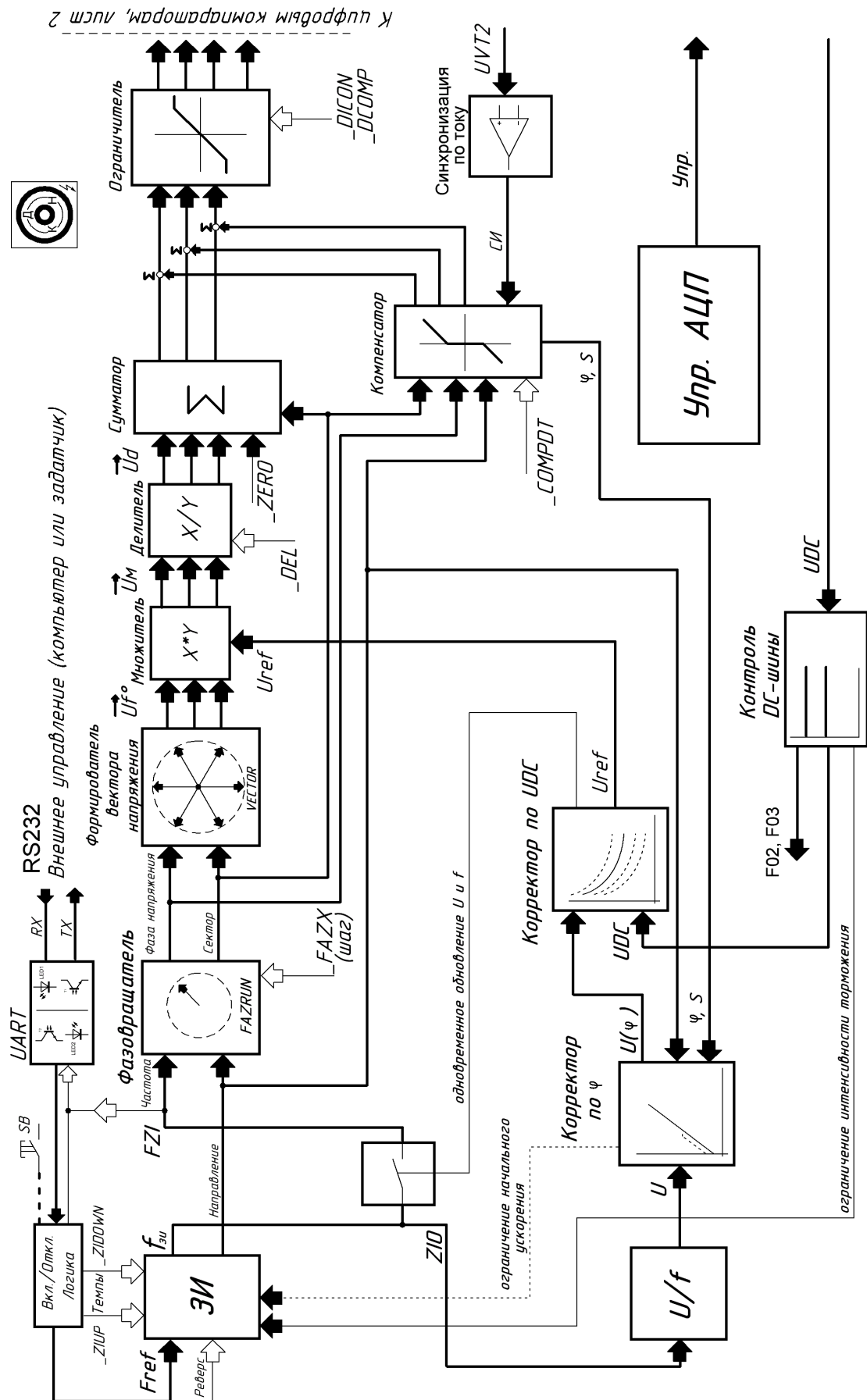


О программе “Восьмикрут HD”

Версия ПО Восьмикрут HD разрабатывалась для улучшения управляемости и стабилизации режима питания двигателей. Схемы драйверной и силовой частей преобразователя оставлены без изменений. Изменения коснулись управления - для моторного контроллера был применён PIC18F1330 с аппаратным модулем ШИМ и умножением. Введены обратные связи по напряжению DC-звена и угловому положению вектора тока статора (без применения отдельных датчиков тока). Управление моторным контроллером и получение информации о состоянии привода осуществляется через гальванически-развязанный интерфейс RS232 от внешнего модуля управления. В предложенном варианте внешнего модуля используется микроконтроллер PIC16F690. Описание интерфейса размещено в архиве программ HD.

Программа моторного контроллера содержит необходимые блоки для получения нужных характеристик управления. Использован шестисекторный модулятор пространственного вектора напряжения с минимальным шагом угла поворота V_{ref} (см. Рис.1) 1 градус.

Для ознакомления ниже представлена структура программы моторного контроллера Восьмикрут HD:



MCU PIC18F1330

Восьмикрут HD Motorcontroller - структурная схема, лист 1

Рис. 15 Структурная схема программы Восьмикрут HD, лист 1.



Восьмикру́т HD Motorcontroller - структурная схема, лист 2

Рис. 16 Структурная схема программы Восьмикрут HD, лист 2.



Краткое описание программных блоков согласно структурным схемам:

Вкл/Откл. Логика – Управление стоп-пуск, выключение импульсов, прерываний и т.д.

Fref – главное задание частоты привода. Может быть задано по интерфейсу с внешнего контроллера, либо изменено (вверх или вниз) командами цифрового потенциометра.

ЗИ – задатчик интенсивности. Генератор функции разгона, торможения и реверса привода в зависимости от установленных параметров темпов.

Фазовращатель – генератор вращения вектора напряжения (изменения значения фазы). Получает задание частоты и направления вращения фазы от **ЗИ**.

UART – блоки работы с интерфейсом. Формирование строки данных состояния, обработка управляющих команд, контроль связи.

Формирователь Вектора напряжения – эталон положения вектора напряжения по заданию фазы и сектора от **фазовращателя**.

Множитель – расчёт модуля вектора напряжения (определяет величину выходного ШИМ-эквивалента напряжения) согласно заданию напряжения **Uref**.

Делитель – масштабирование значений по текущему диапазону работы **цифровых компараторов ШИМ**.

Сумматор – сумма с текущей константой нулевого состояния.

Компенсатор – частичная компенсация вектора ошибки из-за мёртвого времени и нелинейности драйверно-силовой части. Формирование данных для расчёта фазы угла вектора тока (в системе координат x, y , жестко связанной с вращающимся вектором напряжения статора U_{ref}).

Ограничитель – ограничение заданий по текущему диапазону работы **цифровых компараторов ШИМ** и управление модуляцией нулевых векторов в ограничении.

U/F – оптимальная задающая характеристика частота-напряжение. Формирование эталона задания напряжения по значению частоты с **ЗИ**.

Корректор по φ - расчёт фазы угла вектора тока и коррекция эталона задания напряжения по значению фазы. Поддержание и форсирование магнитного потока на низких частотах.

Корректор по UDC – коррекция заданного значения напряжения согласно текущему измеренному значению напряжения DC-звена (по возмущению). Стабилизация магнитного потока, демпфирование колебаний.

Программа также содержит сервисные блоки инициализации, управление прерываниями и ШИМ, задержки, цифровые преобразования.

Генерирование управляющих импульсов осуществляется аппаратным модулем микроконтроллера (PWM) с тремя цифровыми компараторами, формирователем мёртвого времени и внутренней логикой. Сконфигурировано согласно структуры на рис. 16.



<DC-AC> VOSMIKRUT SOFT

Осциллограммы токов двигателей при работе от частотного преобразователя Восьмикрут HD:

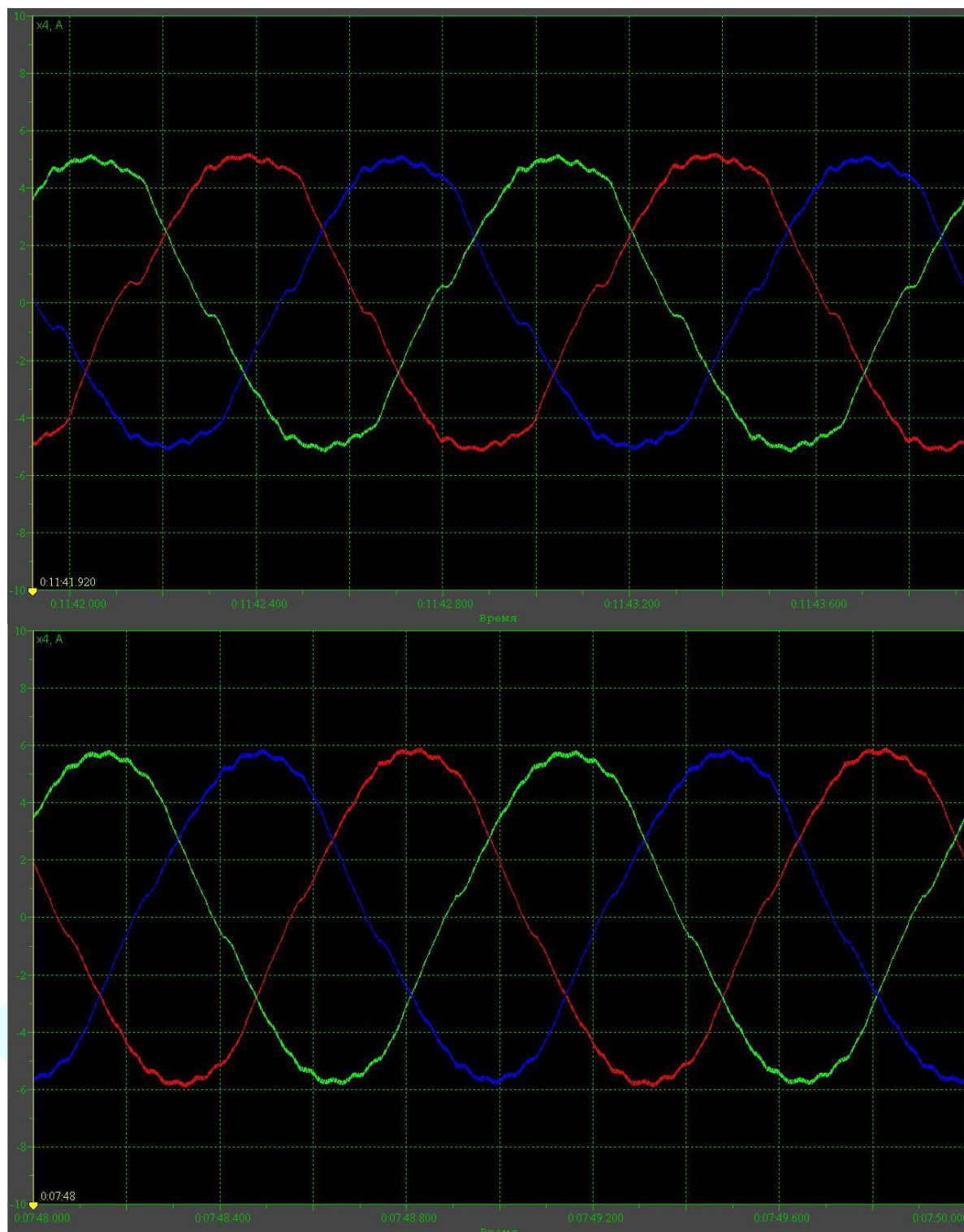


Рис. 17 Разница токов двигателя, мощностью 4кВт, на частоте 1Гц без компенсации ошибки мёртвого времени (верхний) и с частичной компенсацией. Преобразователь HD300, двигатель соединён на 220В (треугольник).

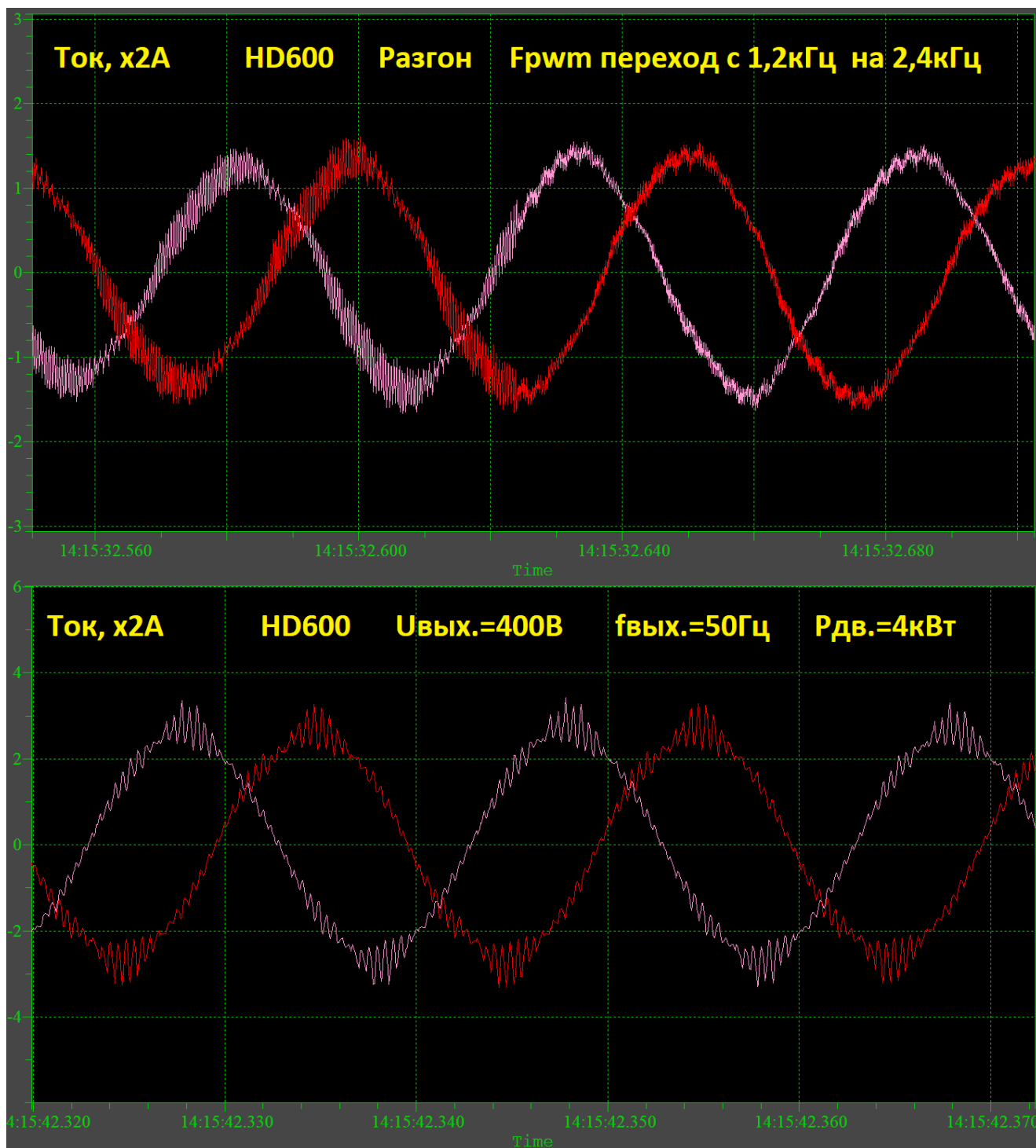


Рис. 18 Токи двигателя мощностью 4кВт, плавный разгон маховика со сменой частоты ШИМ (верхний) и холостой ход на 50Гц (нижний) при работе от преобразователя частоты Восьмикрут HD600, программа для насосов-вентиляторов, соединение двигателя на 380В (звезда).

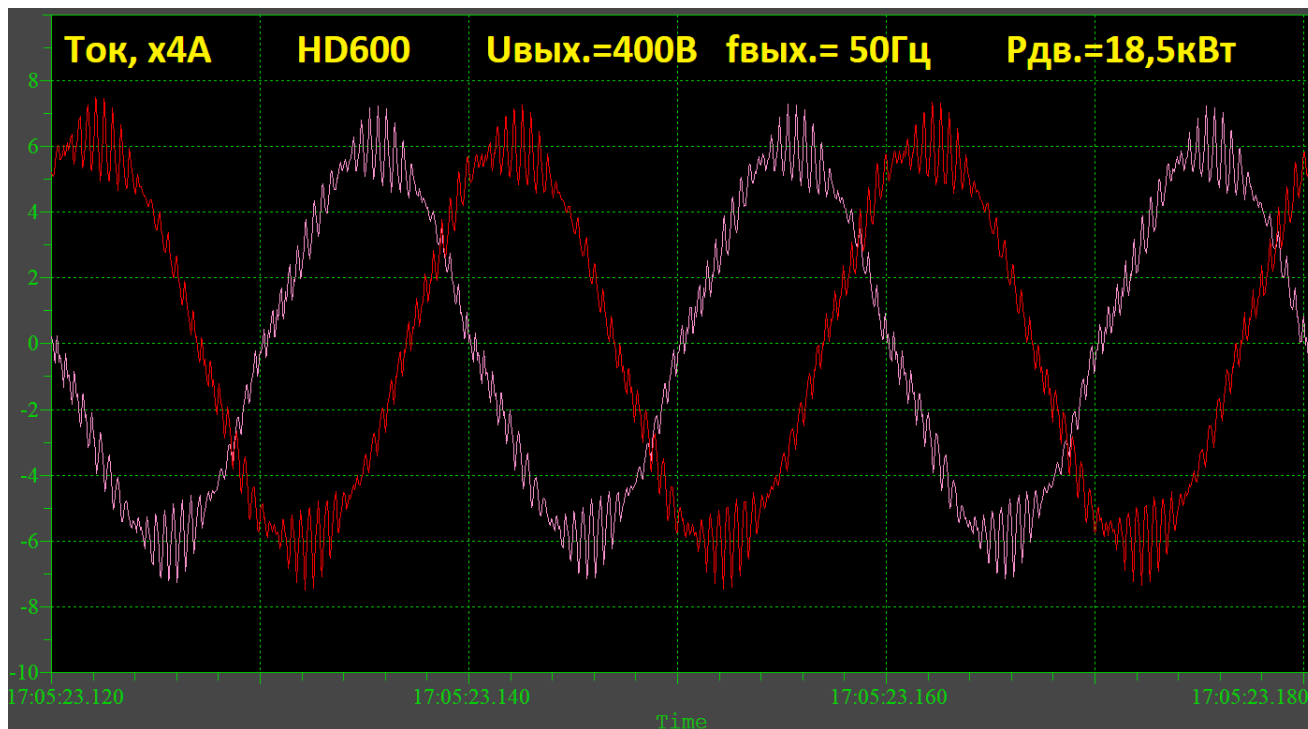


Рис. 19 Специальное тестирование - токи двигателя мощностью 18,5кВт на номинальной частоте 50Гц при работе от преобразователя частоты Восьмикрут HD600, программа для насосов-вентиляторов, холостой ход, соединение двигателя на 380В (треугольник, мотор 380/660).

Токовые сигналы снимались при вращении двигателей АИР100S2У3 4кВт, а также АИР160М2У2 18,5кВт. Запись токовых кривых производилась на самопишущий осциллограф. Сигнал снимался трансформаторами тока по двум или трём выходным фазам инвертора.



<DC-AC> VOSMIKRUT SOFT



Получение дополнительной информации и исходного кода программы Восьмикрут HD возможно по запросу.

Программное обеспечение преобразователей “Восьмикрут” и “Восьмикрут HD” разработано в России.

Форум

<https://radiokot.ru/forum/viewtopic.php?f=25&t=106385>

Видео ресурсы

https://www.youtube.com/channel/UCxjGR3WJkex6I_o_FSWEPyA

<https://rutube.ru/channel/25158207>

<https://zen.yandex.ru/id/6228e49b7d728d3bad0e8325>



<DC-AC> 2016-2025г.