

Направление подготовки: 140400 Электроэнергетика и электротехника

Профиль подготовки: Электрический транспорт

Квалификация (степень) выпускника: магистр

Форма обучения: очная

Дисциплина: "Электрооборудование и системы управления электроподвижным составом"

Комаров В.Г. Лекция 6 21.04.2026 г.

Тема: Электрические цепи электросиловых агрегатов подвижного состава. Расчёт и анализ электромеханических процессов с помощью электрических цепей.

1. Топологические понятия схем электрических цепей

Пространственное электромагнитное поле, с его математической моделью – уравнениями Максвелла, которые мы рассматривали для анализа электросиловых агрегатов – представляет собой классический пример трехмерного объекта с распределенными параметрами. Математический аппарат, строго описывающий объекты с распределенными параметрами, существенно сложнее, чем объекта с сосредоточенными параметрами. Поэтому на практике всегда, где это возможно, заменяют распределенные параметры на сосредоточенные. Для этого от теории поля переходят к теории цепей. Переход от распределённых параметров к сосредоточенным это замена полевых 3D-моделей моделями с сосредоточенными параметрами позволяющий использовать другой способ графической интерпретации моделей, основанный на графах и схемах. Принципиальная схема электрической цепи вместе с математической моделью ее элементов обычно несет в себе достаточную информацию, необходимую для адекватного анализа электромагнитных процессов, протекающих в электротехническом устройстве. Любое электротехническое устройство можно представить в виде электрической цепи, состоящей из нескольких компонент. Под компонентой электрической цепи понимают ее часть, выполненную в конструктивном отношении как единое целое, причем включение каждой компоненты в электрическую цепь осуществляется посредством ее полюсов, физически реализованных в виде выводов. Электрическая цепь характеризуется совокупностью элементов, из которых она состоит, и способом их соединения. Соединение элементов электрической цепи наглядно отображается ее схемой. Топология электрической цепи характеризуется двумя основными понятиями, соответствующими общей теории графов: ветвью и узлом. Узлом называется точка соединения двух или более элементов электрической цепи. Если только два элемента цепи соединены, то их можно объединить по правилам последовательного соединения и представить в виде одного более сложного элемента. Таким образом узел, соединяющий два элемента, как бы устраняется и поэтому называется *устраняемым* узлом.

Если в точке соединены три или более элемента, то устранить узел таким простым приёмом нельзя.

Элемент или группа последовательно соединённых элементов, заключённых между

двумя соседними узлами, называется *ветвью*.

Двумя фундаментальными законами теории электрических цепей являются законы Кирхгофа. Уравнения, составленные по законам Кирхгофа, имеют универсальный характер и справедливы при любых видах воздействий и любых элементах ветвей, как линейных, так и нелинейных. Они зависят лишь от способа соединения элементов схемы друг с другом, т.е. от топологии схемы, и поэтому называются топологическими.

1-ый закон Кирхгофа - закон для токов (ЗТ) применяется к узлам и формулируется следующим образом: *алгебраическая сумма токов в узле равна нулю*. Ток берётся со знаком "+", если направлен от узла, и со знаком "-", если направлен к узлу.

2-ой закон Кирхгофа - закон для напряжений (ЗН) применяется к контурам электрической цепи и формулируется так: *в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма напряжений на зажимах ветвей, входящих в этот контур, равна нулю*. Напряжение берётся со знаком "+", если направление тока в ветви совпадает с направлением обхода контура, и со знаком "-" в противном случае.

Из теории графов для электрических цепей следует, что в связной схеме число линейно независимых уравнений Кирхгофа для напряжений равно количеству ветвей за вычетом количества узлов плюс единица.

Система независимых уравнений равновесия напряжений цепи может быть записана в матричной форме

$$B \cdot U_{\varepsilon} = O,$$

где B - контурная матрица,

U_{ε} - матрица-столбец напряжений ветвей,

O - нулевая матрица-столбец.

Из теории графов для электрических цепей также следует, что в связной схеме число линейно независимых уравнений Кирхгофа для токов равно количеству узлов минус единица.

Система независимых уравнений равновесия токов цепи также может быть записана в матричной форме

$$A \cdot I_{\varepsilon} = O,$$

где A -узловая матрица,

I_{ε} - матрица-столбец токов ветвей,

O - нулевая матрица столбец.

Или используя матрицу главных сечений Q

$$Q \cdot I_{\varepsilon} = O.$$

Для расчётов и моделирования процессов в электрических цепях электросиловых агрегатов необходимо произвести расчёт эквивалентных сосредоточенных параметров тягового электросилового агрегата с точки зрения его электрической цепи. Параметрами электрических цепей электросиловых агрегатов являются токи, ЭДС, напряжения, активные сопротивления, собственные индуктивности и взаимоиндуктивности обмоток электросиловых агрегатов.

В общем случае цепь фазы якоря или индуктора электросилового агрегата может быть представлена в виде схемы замещения, приведённой на рис. 1, где U_s — источник внешнего питающего напряжения, R_a — активное электрическое сопротивление обмотки фазы якоря, L_s — собственная индуктивность (индуктивность рассеяния) фазы якоря, E_a — полная эдс фазы якоря (перемещения и трансформаторная). Эдс перемещения возникает от относительного перемещения индуктора и якоря, а трансформаторная эдс возникает от изменения тока намагничивания (полного тока) во времени.

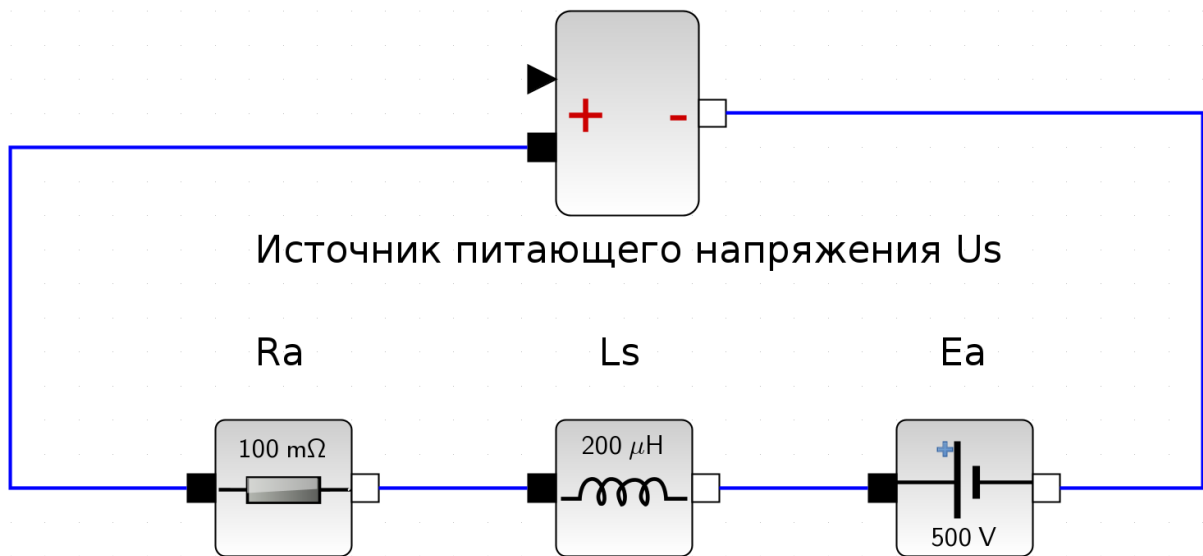


Рис. 1.

Будем использовать основной принцип **управления по ориентации поля (Field Oriented Control — FOC)**, позволяющий в электрической машине добиться независимого управления моментом и магнитным потоком. Ключевая идея метода заключается в представлении переменных величин, характеризующих магнитное поле в зазоре машины в пространственной системе координат, связанной с главным магнитным потоком.

Для упрощения расчетов введены допущения, такие как линейность машины (отсутствие насыщения). Также предполагается сосредоточенное (концентрированное) размещение витков по углу, что влечет за собой равномерное распределение плотности намагничивающей силы по полюсному делению и прямоугольную форму магнитной индукции в зазоре.

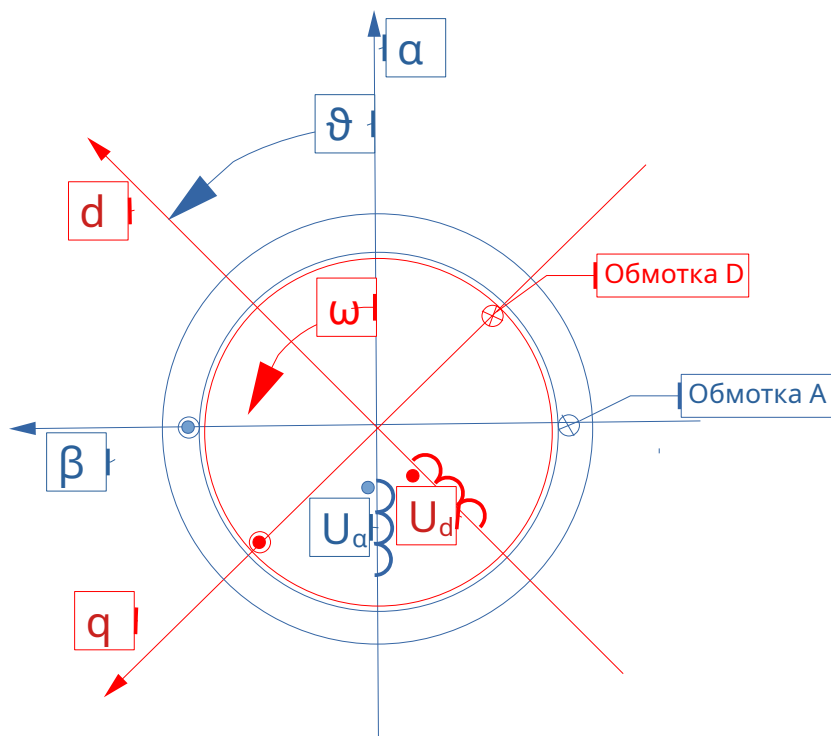


Рис. 2.

На рисунке 2 представлена схема машины. Оси α и β жестко связаны со статором, на котором размещена обмотка якоря. Эта обмотка показана в виде концентрированной катушки. Входящий в плоскость рисунка ток обозначен крестиком в кружке, а выходящий — точкой. Катушка фазы α расположена так, что формирует магнитное поле вдоль оси α . На рисунке система изображена в виде пространственных электрических цепей. Индуктивность обмотки статора по оси α также генерирует магнитное поле вдоль этой оси. Для наглядности активные сопротивления обмоток в схеме не показаны, однако их влияние учитывается в уравнениях:

$$u_{a\alpha} = R_a \cdot i_{a\alpha} + \frac{d\Psi_a}{dt} ,$$

$$\Psi_a = w_a \cdot \Phi_0 = w_a \cdot \Lambda_m \cdot \sum w_k \cdot i_k ,$$

$$\Lambda_m = \frac{1}{\sum \left(\frac{l_k}{S_k \cdot \mu_0 \cdot \mu_k} \right)} .$$

Ротор может свободно вращаться и на нём размещена обмотка возбуждения (индуктора) ориентированная по осям d и q , которые привязаны к положению ротора. Уравнения для ротора принимают следующий вид:

$$u_{fd} = R_f \cdot i_{fd} + \frac{d\Psi_f}{dt} ,$$

$$\Psi_f = w_f \cdot \Phi_0 = w_f \cdot \Lambda_m \cdot \sum w_k \cdot i_k .$$

Постоянный магнитный поток для контура D (в осях dq) при вращении его относительно контура A (в осях $\alpha\beta$) будет создавать в нём переменный магнитный поток рис. 3.

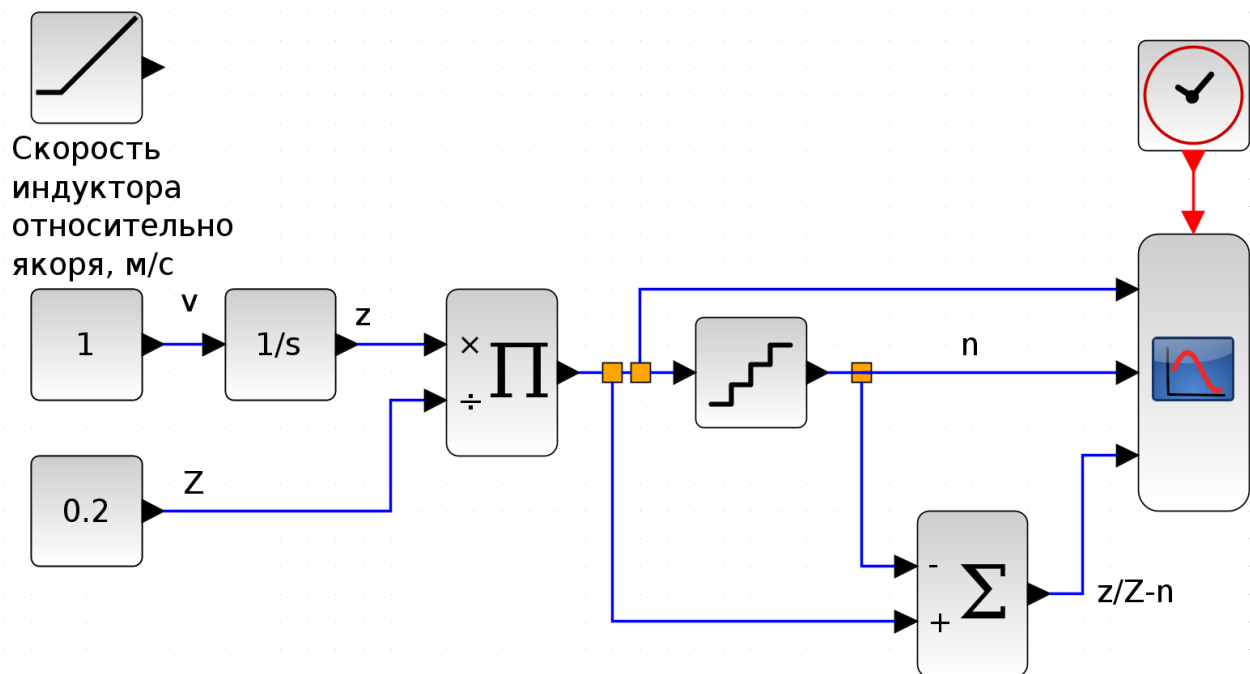


Рис. 3.

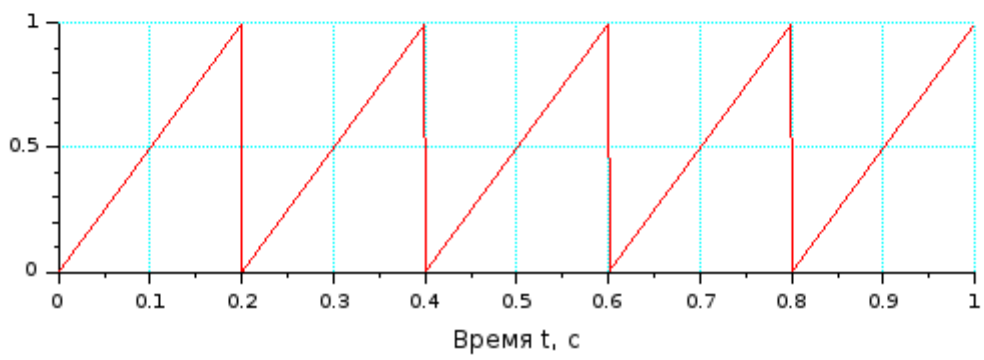
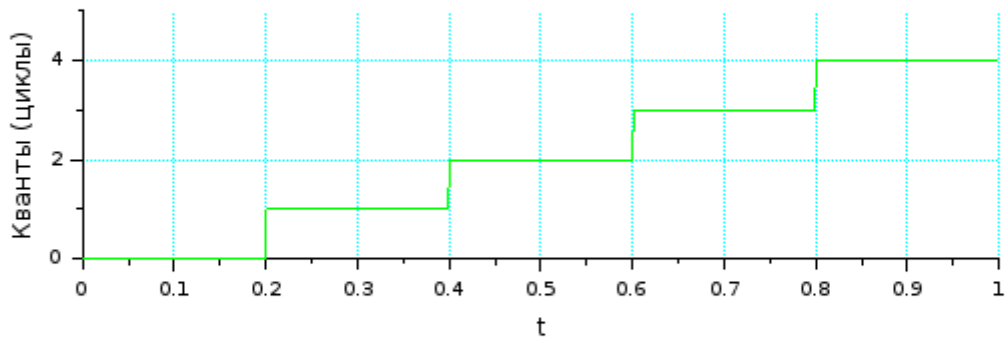
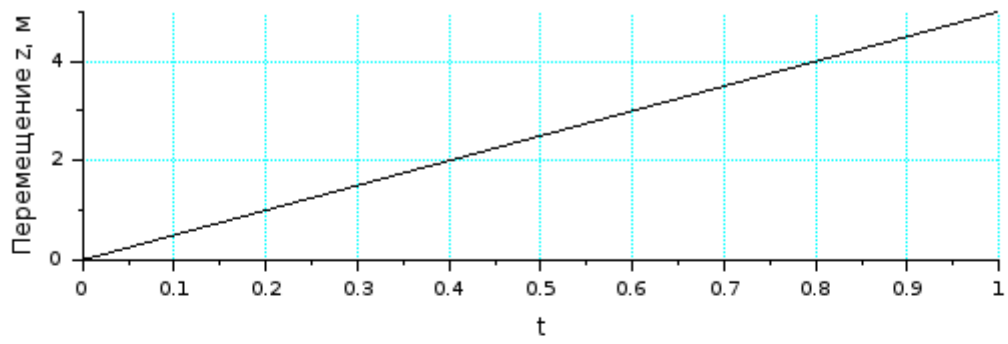


Рис. 4.

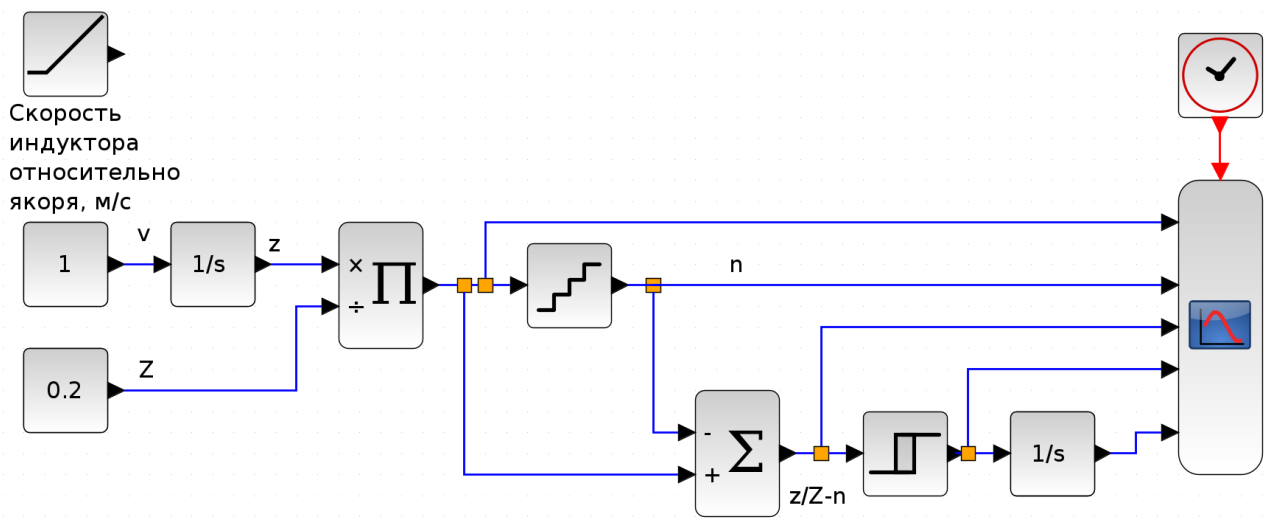


Рис. 5.

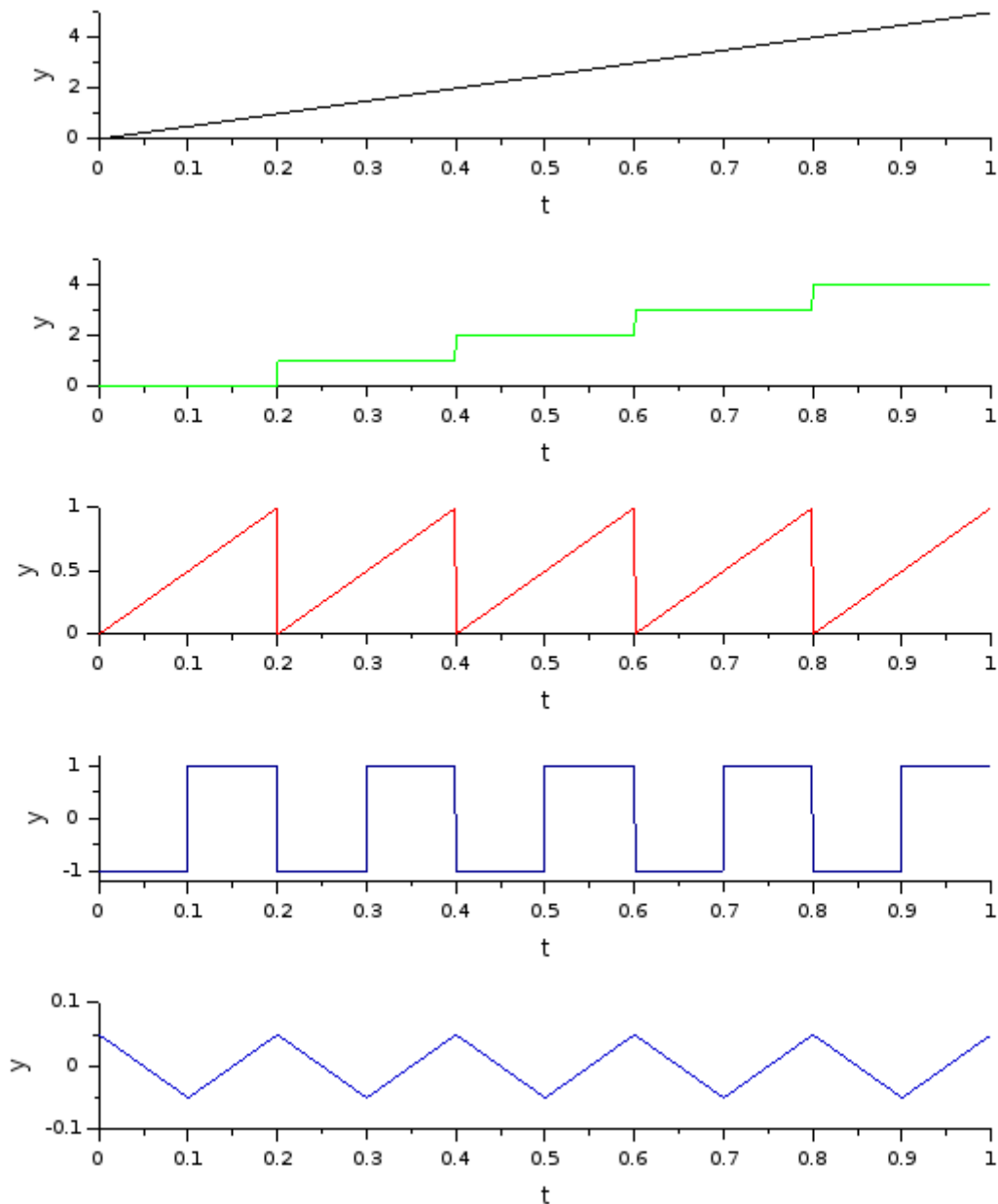


Рис. 6.

Инверторы электросиловых агрегатов Общие сведения

Трёхфазный мостовой инвертор является самым распространённым устройством полупроводниковой преобразовательной техники. Он используется для преобразования постоянного электрического напряжения или тока в трёхфазное напряжение или ток, как постоянной, так и регулируемой частоты. С помощью него обеспечивается регулирование практически всех современных бесконтактных электрических машин, в т. ч. тяговых. Инвертор в общем случае представляет собой определённую топологическую схему соединений силовых импульсных ключей VS, переключаемых с помощью сигналов управления в определённой последовательности, т. е. по определённому алгоритму (программе). Эта последовательность может быть выражена определённой функцией дискретного (квантованного) аргумента времени или пространственной координаты (положения), называемой коммутационной функцией KF. Коммутационная функция представляет собой последовательность двоичных

импульсов, соответствующих включённому $KF="1"$ и выключенному $KF="0"$ состоянию импульсных ключей. Принципиальная электрическая схема силовых цепей трёхфазного мостового инвертора, собранного из полевых транзисторов приведена на Рис. 1.

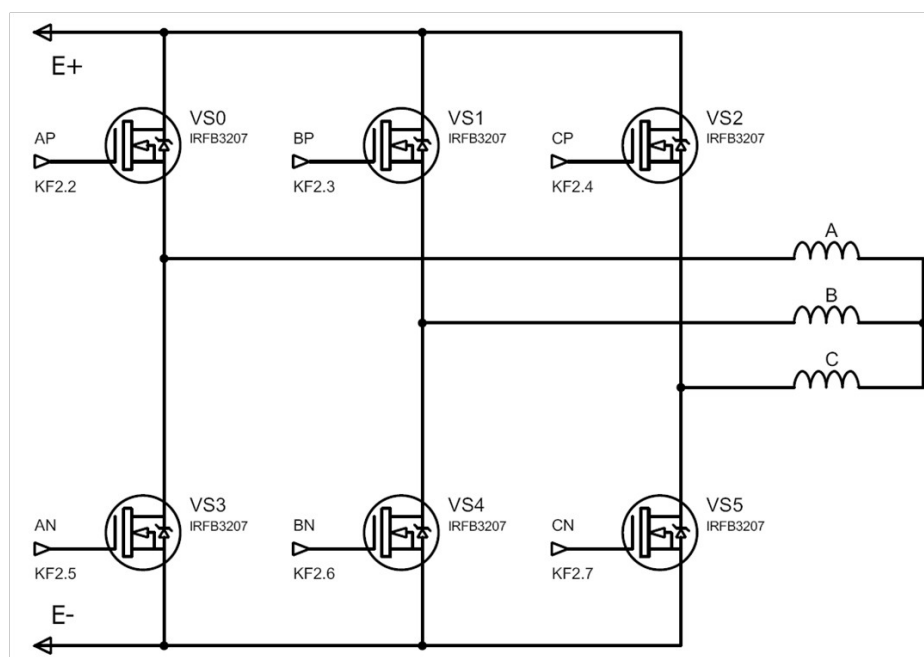


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема трёхфазного мостового инвертора.

Формирование выходного напряжения и тока Рис. 2 определяется последовательностью открытия силовых транзисторов $VS0...VS5$ в соответствии с Таблицей 1, отражающей коммутационную функцию инвертора от дискретных интервалов времени Dt , или с Таблицей 2, от дискретных интервалов пути Dz . Требуемые дискреты времени могут быть сформированы таймером, а дискреты пути датчиками положения слайдера (ротора) SP .

Таблица 1. Коммутационная функция трёхфазного мостового инвертора при управлении T/3 с прямой последовательностью фаз (движение "ВПЕРЕД") на дискретных интервалах времени $Dt=T/6$.

| Разряды (биты) KF | Двоичные сигналы | Дискретные интервалы времени Dt (TIM1) | | | | | |
|----------------------|---------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | 0 (0b00000000) | 1 (0b00000001) | 2 (0b00000010) | 3 (0b00000011) | 4 (0b00000100) | 5 (0b00000101) |
| KF2.2 | AP | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| KF2.3 | BP | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| KF2.4 | CP | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| KF2.5 | AN | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| KF2.6 | BN | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| KF2.7 | CN | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 2. Коммутационная функция трёхфазного мостового инвертора при управлении Z/3 с прямой последовательностью фаз (движение "ВПЕРЕД") на дискретных интервалах пути $Dz=Z/6$.

| Разряды (биты) KF | Двоичные сигналы | Дискретные интервалы пути Dz (SP) | | | | | |
|----------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | 0 (0b00000011) | 1 (0b00000001) | 2 (0b00000101) | 3 (0b00000100) | 4 (0b00000110) | 5 (0b00000010) |
| KF2.2 | AP | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| KF2.3 | BP | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| KF2.4 | CP | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| KF2.5 | AN | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| KF2.6 | BN | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| KF2.7 | CN | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

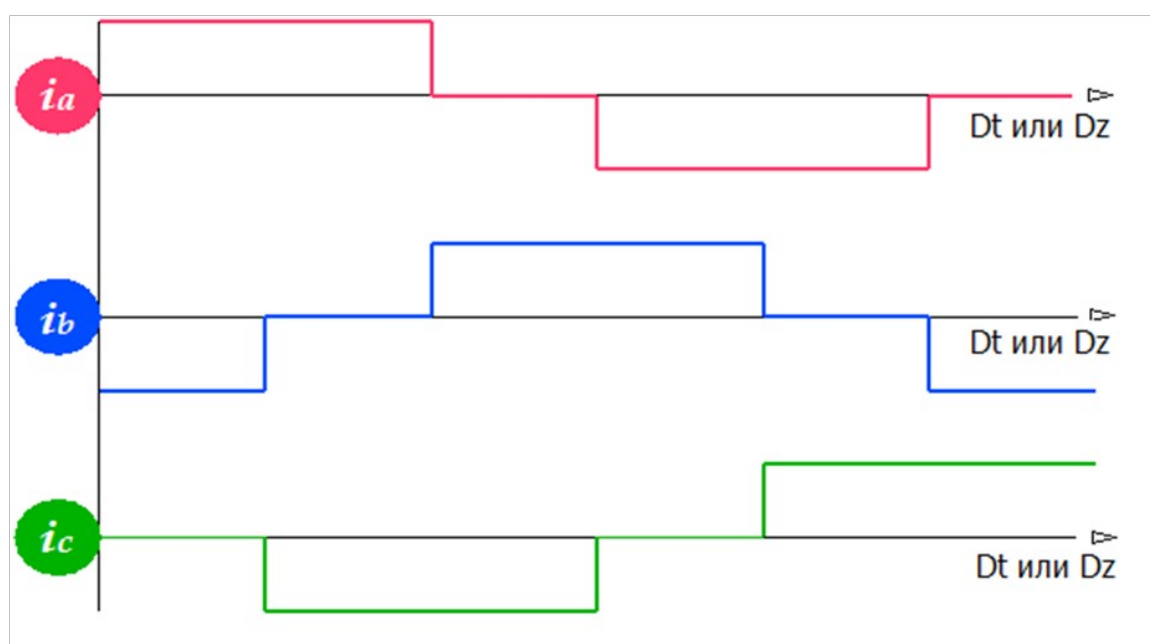


Рис. 2. Диаграмма токов фаз инвертора.

Обозначения сигналов управления импульсными ключами инвертора:

AN - ANegative - катодная группа фазы A;

BN - BNegative - катодная группа фазы B;

CN - CNegative - катодная группа фазы C;

AP - APositive - анодная группа фазы A;

BP - BPositive - анодная группа фазы B;

CP - CPositive - анодная группа фазы C.

Для оперативного хранения переменных в процессорной системе управления используются следующие поименованные регистры:

Dz - регистр текущего значения пути в дискретах цикла пути dx/Z , где Z- цикл пути;

Dt - регистр текущего времени в дискретах интервалов цикла dt/T , где T- цикл (период) времени;

IC (Input Command) - регистр кода входных команд;

DM (Drive Mode) - регистр кода текущего режима привода;

SP (Slider Position) - регистр кода текущего положения слайдера (ротора);

KF (Commutation Function) - регистр текущего значения кода коммутационной функции.

Ввод команд управления в регистр IC (Input Command) осуществляется через внешний последовательный интерфейс MODBUS (RS485). Реализация протокола MODBUS полностью программная и строится на базе обычного UART. Команды управления IC, а также соответствующие им коды приведены в Табл. 3.

Таблица 3. Коды управления IC

| Наименование команд | Разряды регистра IC | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------|---|---|---|---|-------|------|------|
| | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 (D) | 1(G) | 0(M) |
| "ВПЕРЕД" (ONWARD) | x | x | x | x | x | 0 | 0 | 0 |
| "НАЗАД" (BACKWARD) | x | x | x | x | x | 1 | 0 | 0 |
| "ТЯГА" (TRACTION, MOTORING) | x | x | x | x | x | x | 0 | 1 |
| "ТОРМОЗ" (BRAKE, GENERATING) | x | x | x | x | x | x | 1 | 0 |
| "ВЫБЕГ" (OUT) | x | x | x | x | x | x | 1 | 1 |
| "СТОП" (STOPPING) | x | x | x | x | x | x | 0 | 0 |

Бит 2(D) в регистре IC определяет заданное направление движения (DIRECTION):

OW - вперед; BW - назад.

Переключение возможно только в состоянии привода "СТОП", т. е. DM.0="0" и DM.1="0".

Стояночный тормоз (режим "СТОП") включается только в режимах "ТОРМОЗ" и "ВЫБЕГ" при скорости движения менее 0,5 м/с. Во всех остальных случаях стояночный тормоз выключен, а левитация включена. В режиме "СТОП" левитация выключена, а стояночный тормоз включён.

Логiku управления можно разделить на две задачи.

Первая - управление направлением движения, которая выполняется только в режиме "СТОП":

коды управления IC.2 (D) = "0" - вперед ("OW");

IC.2 (D) = "1" - назад ("BW").

Вторая - управление тягой, электрическим торможением и стояночным тормозом.

Табл. 3 в этом случае может быть упрощена до Табл. 4.

Таблица 4.

| Режим (MODE) | IC.1 (G) | IC.0 (M) |
|-----------------------------|----------|----------|
| "ТЯГА" (TRACTION, MOTORING) | 0 | 1 |

| | | |
|------------------------------|---|---|
| | | |
| "ТОРМОЗ" (BRAKE, GENERATING) | 1 | 0 |
| "ВЫБЕГ" (OUT) | 1 | 1 |
| "СТОП" (STOPPING) | 0 | 0 |

Выбор направления движения определяет для инвертора последовательность фаз: прямая при движении "ВПЕРЁД" и обратная "НАЗАД".

ШИМ-инверторы

В предыдущем разделе мы с вами рассмотрели работу простого трёхфазного мостового инвертора. Он позволяет преобразовать постоянный ток в трёхфазный переменный, однако не позволяет регулировать величину и форму выходного напряжения или тока. Для этих целей в современных полупроводниковых преобразователях обычно используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) или по английскому Pulse Width Modulation (PWM). Использование ШИМ в мостовом инверторе не требует изменения топологии электрической схемы, достаточно только изменить алгоритм управления импульсными ключами, т. е. изменить управляющую программу. Для начала разберёмся в изменениях алгоритма преобразования.

Принципиальная электрическая схема силовых цепей инвертора остаётся без изменений и приведена на Рис. 1.

Формирование выходного напряжения и тока определяется последовательностью открытия силовых транзисторов VS0...VS5 в соответствии с коммутационной функцией инвертора от дискретных интервалов времени Dt или от дискретных интервалов пути Dz аналогично рассмотренному ранее трёхфазному инвертору. Отличием является использование ШИМ внутри дискретных интервалов коммутационной функции инвертора. Для оперативного управления шириной импульсов в процессорной системе добавляем логическую импульсную переменную PWM (Pulse Width Modulation), отражающую во времени ширину импульсов в фазах.

В режиме тяги (Motoring Mode)

Плюсовая группа транзисторов VS0, VS1, VS2 управляется, как и в простом инверторе сигналами коммутационной функции KF2.2, KF2.3, KF2.4, соответственно. А вот минусовая группа транзисторов VS3, VS4, VS5 управляется сигналами коммутационной функции KF2.5, KF2.6, KF2.7 с наложенными на неё сигналами ШИМ соответствующих фаз, т. е. KF2.5 & PW_A, KF2.6 & PW_B, KF2.7 & PW_C. Цепь протекания тока на интервалах коммутации фаз в режиме ШИМ в пределах первого такта коммутационной функции в режиме тяги приведена на Рис. 9 и 10.

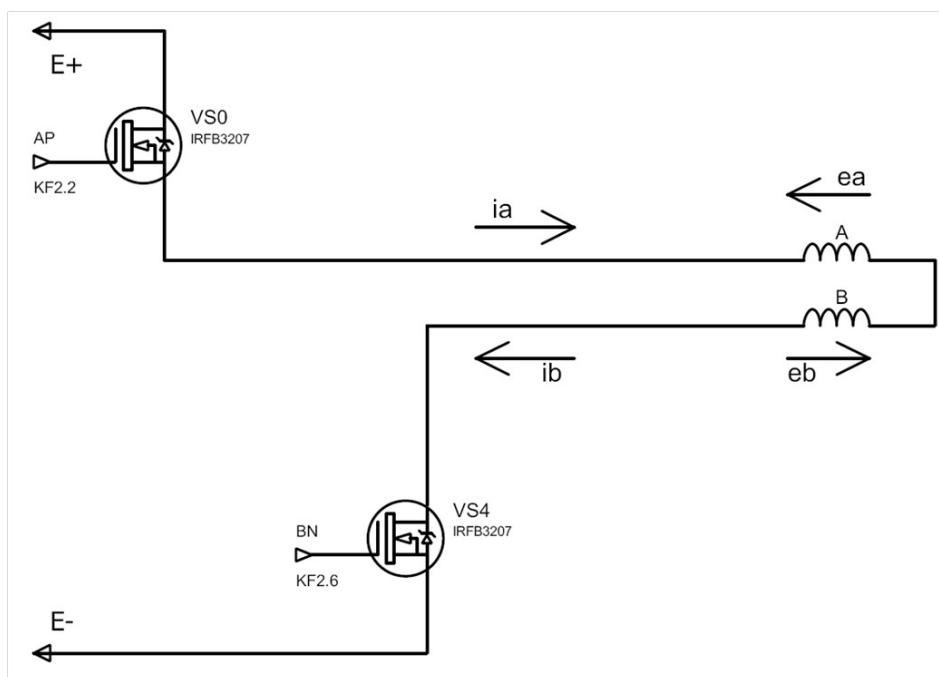


Рис. 9. Цепь протекания тока фаз в режиме "ТЯГА" при сигнале PWM=1.

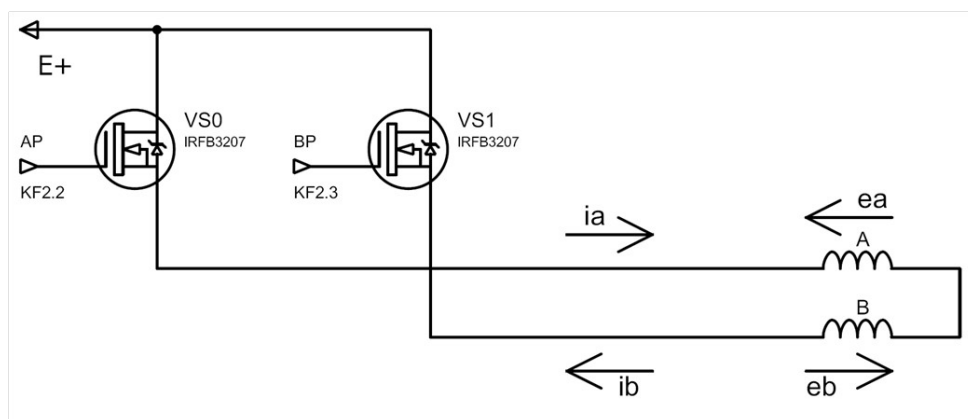


Рис. 10. Цепь протекания тока фаз в режиме "ТЯГА" при сигнале PWM=0.

В режиме торможения (Generating Mode)

Плюсовая группа транзисторов VS0, VS1, VS2 закрыта (сигналы коммутационной функции KF2.2, KF2.3, KF2.4 равны нулю. Минусовая группа транзисторов VS3, VS4, VS5 управляется сигналами коммутационной функции KF2.5, KF2.6, KF2.7 с наложенными на неё сигналами ШИМ, т. е. KF2.5 & PWM, KF2.6 & PWM, KF2.7 & PWM. Цепь протекания тока на интервалах коммутации фаз в режиме ШИМ в пределах первого такта коммутационной функции в режиме торможения приведена на Рис. 11 и 12.

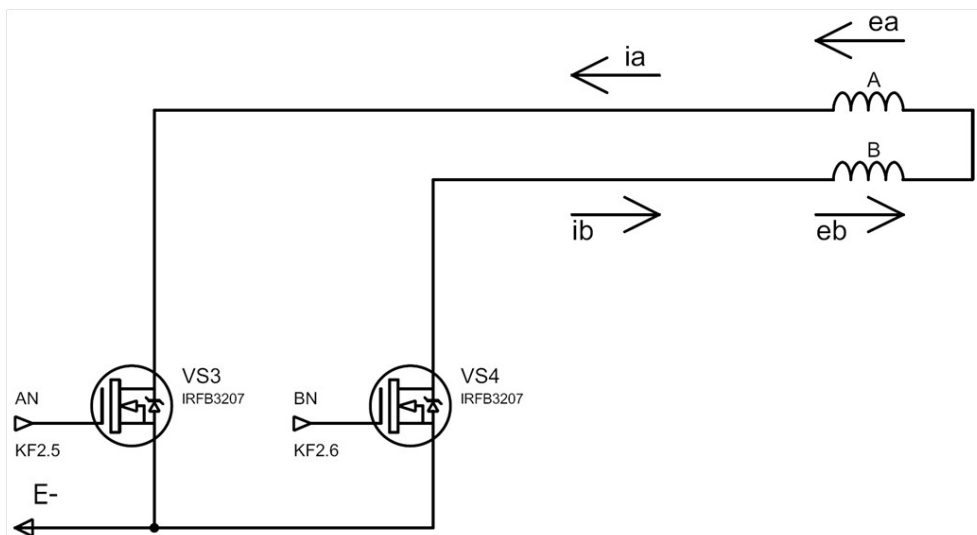


Рис. 11. Цепь протекания тока фаз в режиме "ТОРМОЗ" при сигнале PWM=1.

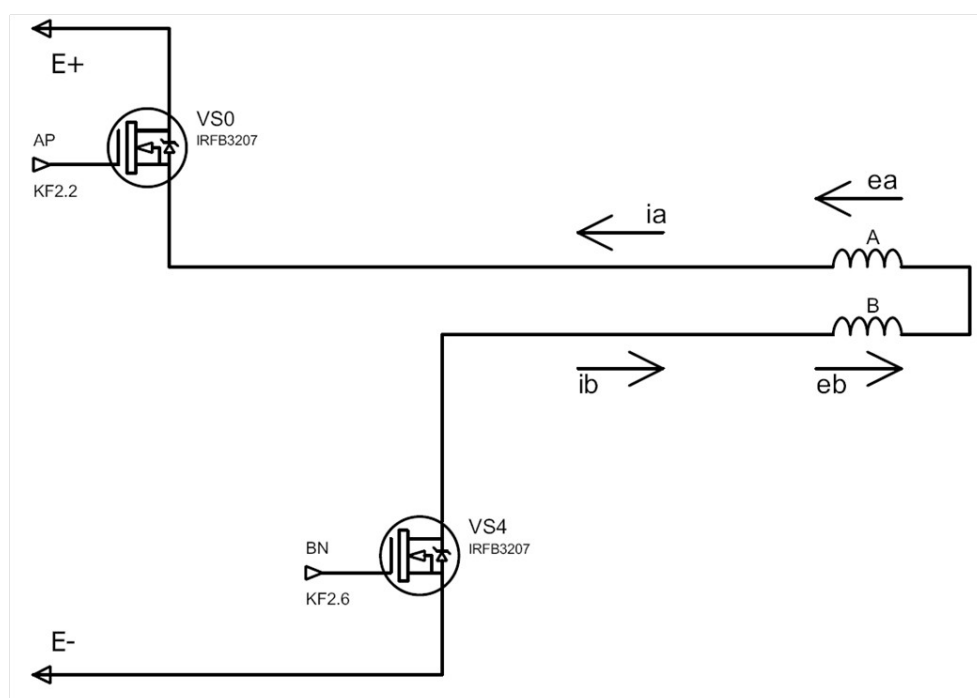


Рис. 12. Цепь протекания тока фаз в режиме "ТОРМОЗ" при сигнале PWM=0.

В соответствии с вышеизложенным в режиме тяги ("TRAC") в выходной порт D управляющего микроконтроллера (плюсовая группа вентилей) выводим текущие значения KF2, а в режиме торможения ("BRAK") значение "zero".