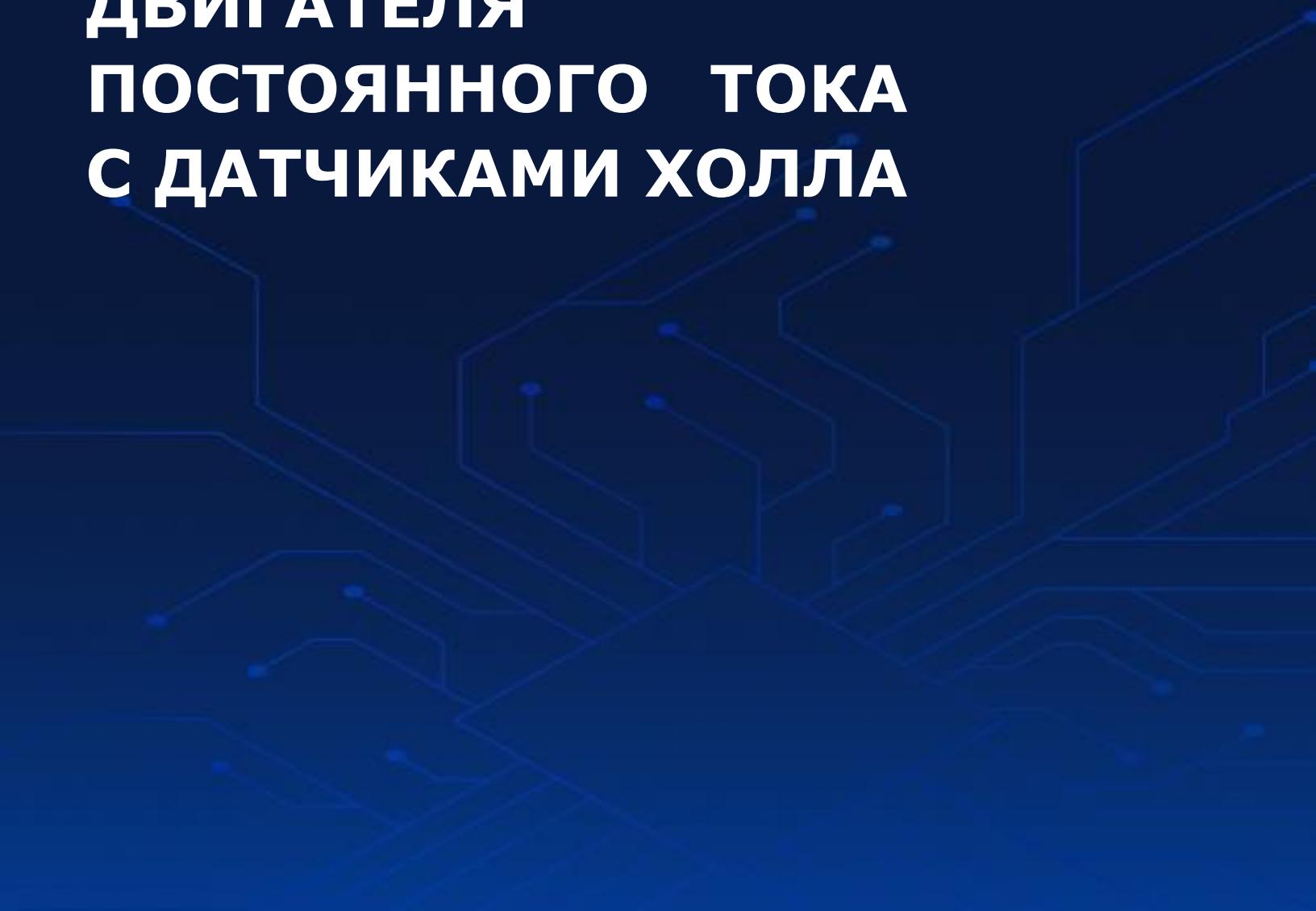


Autogramma

УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДАТЧИКАМИ ХОЛЛА



Содержание

«Псевдовекторный» алгоритм формирования пространственной трехфазной ШИМ	3
Обработка сигнала датчика Холла.....	5
Формирование сигналов	6
Архитектура	8
Моделирование.....	9
Результаты моделирования	42
История изменений документа	48

Для управления бесколлекторным двигателем можно использовать следующие методы:

- скалярный – основан на постоянстве соотношения напряжение/частота. Используется для высокооборотистых бесколлекторных двигателей с постоянной нагрузкой;
- векторный – позволяет независимо регулировать скорость вращения и момент на валу двигателя. Недостатками являются большая вычислительная мощность, требовательность к точности определения положения ротора в каждый момент времени, а также необходимость задания параметров двигателя в некоторых случаях.

Также существует трапециoidalный метод управления, который является упрощением векторного – отказываются от векторной структуры и попарно включают фазы двигателя по датчикам Холла. Простейшим методом управления скоростью при таком управлении является изменение напряжения питания посредством ШИМ коммутации ключей инвертора (Рисунок 1). Такой подход уменьшает вычислительную мощность контроллера, а также уменьшает требования к точности определения положения ротора.

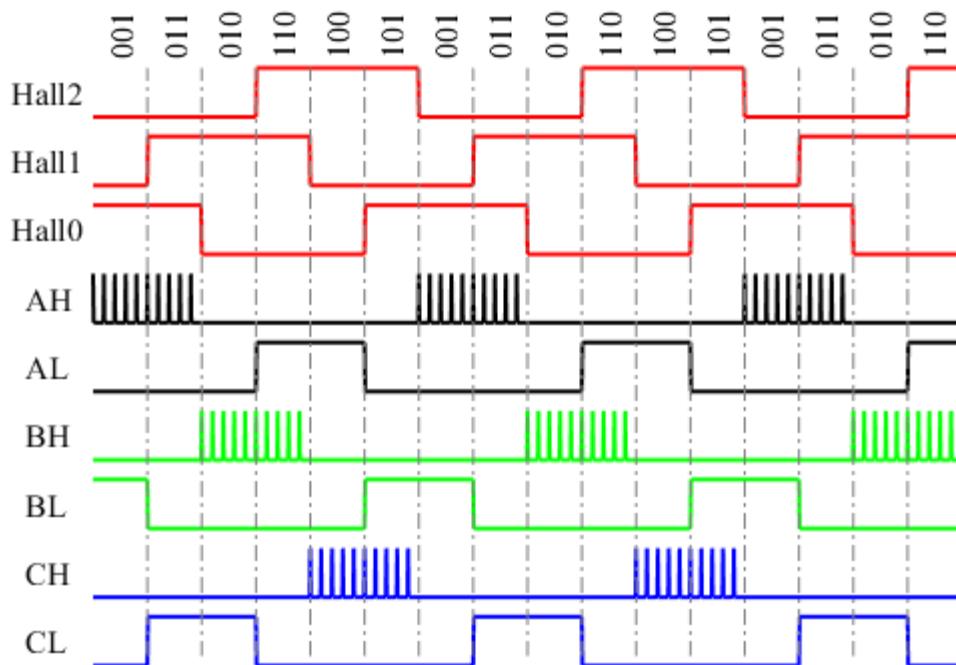


Рисунок 1 – Управление скоростью с помощью изменения питания
напряжения

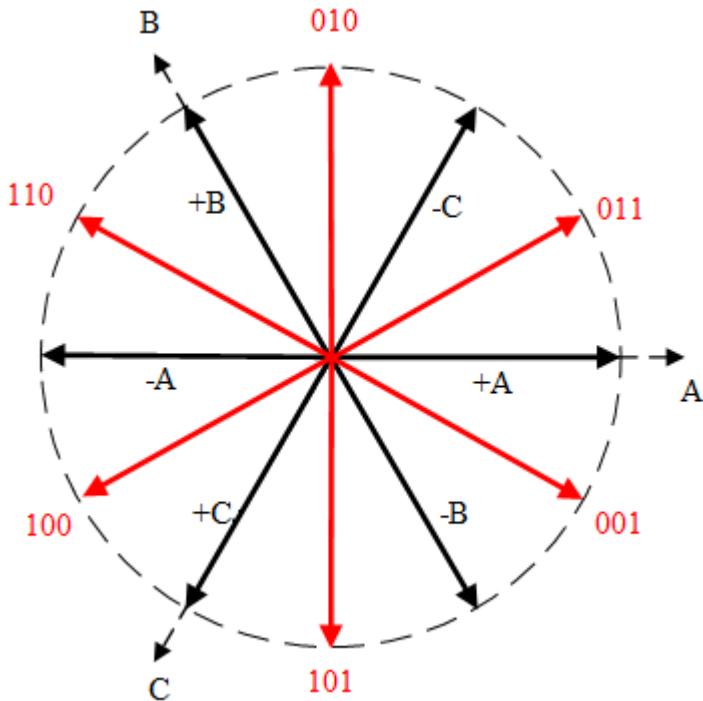


Рисунок 2 – Ненулевые базовые векторы в неподвижной системе координат (черные) и результирующие векторы магнитного поля (красные)

Т.к. при таком методе управления в единицу времени коммутируются только 2 фазы, вектор магнитного поля статора меняет свое направление импульсно (Рисунок 2), что приводит к пульсациям момента и скорости в установившемся режиме, а особенно данный недостаток выражен при низкой скорости. Модуль вектора магнитного поля, влияющий на скорость вращения ротора изменяется коэффициентом заполнения ШИМ.

Для снижения пульсаций необходимо плавно менять направление вектора магнитного поля – добиться этого можно только коммутацией всех трёх фаз двигателя в единицу времени. Добиться этого с минимальными усложнениями системы управления можно используя невекторный алгоритм формирования пространственной трехфазной ШИМ и наложения ее на ШИМ, контролирующую модуль вектора.

«Псевдовекторный» алгоритм формирования пространственной трехфазной ШИМ

Самым легким способом коммутации всех трех фаз является синусоидальная ШИМ: в качестве коэффициента заполнения используется значение в соответствии с Рисунком За. Но при таком подходе линейные напряжения недоиспользуют источник питания (Рисунок 3б).

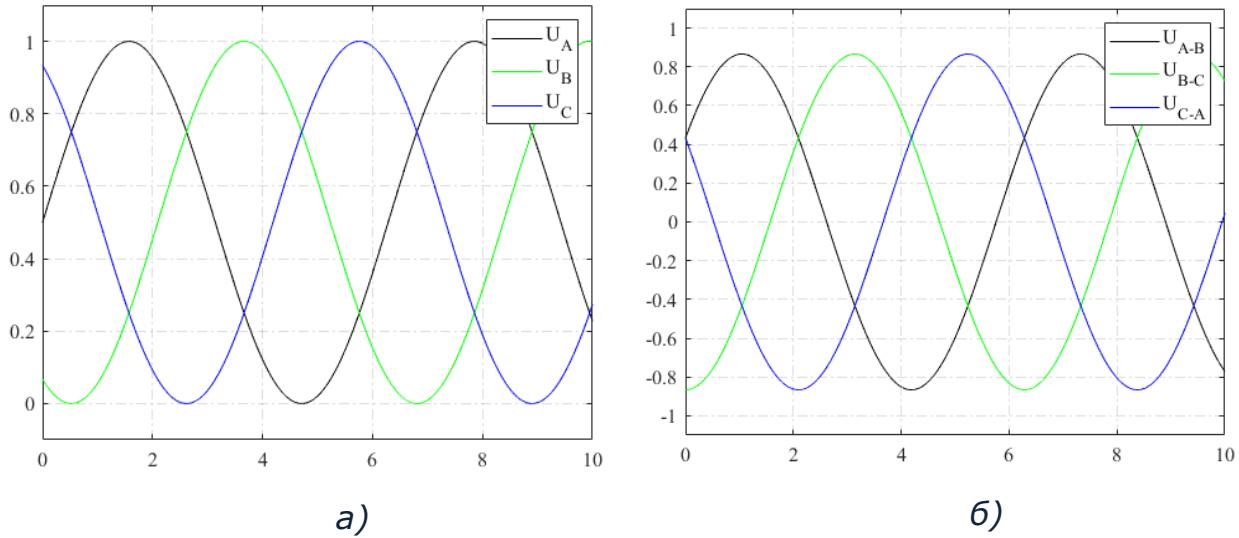


Рисунок 3 – Коммутация с помощью синусоидальной ШИМ: а) фазные напряжения; б) линейные напряжения

Для увеличения эффективности необходимо сформировать сигналы пространственной трехфазной ШИМ. Фазные напряжения рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} U_{A1} &= \frac{2}{\sqrt{3}} U_A - \frac{2}{\sqrt{3}} \min(U_A, U_B, U_C) \\ U_{B1} &= \frac{2}{\sqrt{3}} U_B - \frac{2}{\sqrt{3}} \min(U_A, U_B, U_C) \\ U_{C1} &= \frac{2}{\sqrt{3}} U_C - \frac{2}{\sqrt{3}} \min(U_A, U_B, U_C) \end{aligned} \quad (1)$$

На рисунке 4 показаны полученные фазные и линейные напряжения.

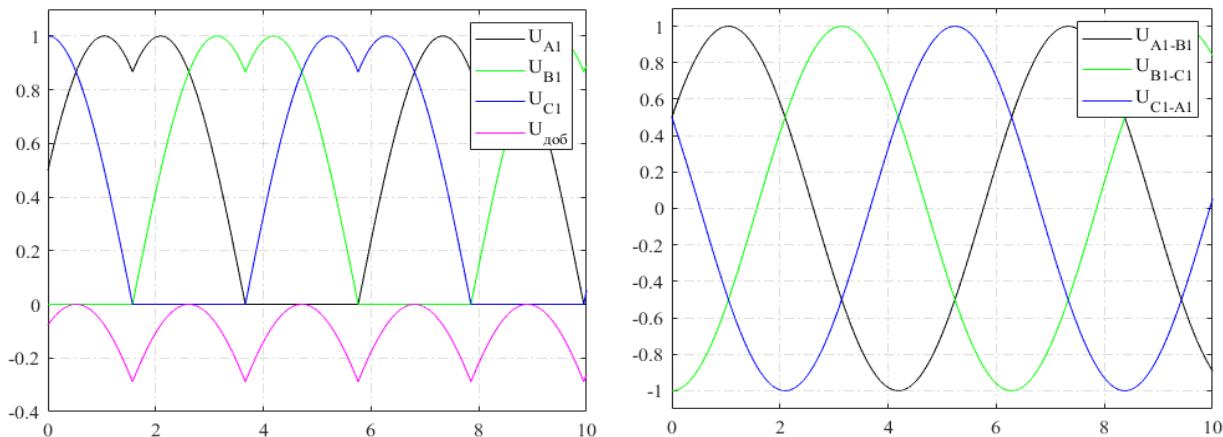


Рисунок 4 – Напряжения, сформированные алгоритмом невекторной трехфазной ШИМ: а) фазные и добавочное; б) линейные.

В соответствии с полученными фазными напряжениями формируется таблица значений коэффициента заполнения ШИМ, который влияет на направление вектора магнитного поля.

Регулирование скорости происходит за счет изменения опорного напряжения источника посредством коэффициента заполнения, который рассчитывает ПИ-регулятор. Результатирующим коэффициентом заполнения является произведение вышеперечисленных.

Обработка сигнала датчика Холла

Для коммутации фаз с помощью трехфазной ШИМ необходимо знать положение ротора в каждый момент времени. Датчик Холла, состоящий из 3 элементов, выдает только 6 импульсов на оборот (черная линия на рисунке 5). Делая допущение, что между этими импульсами скорость вращения постоянна, можно экстраполировать сигнал (зеленая линия).

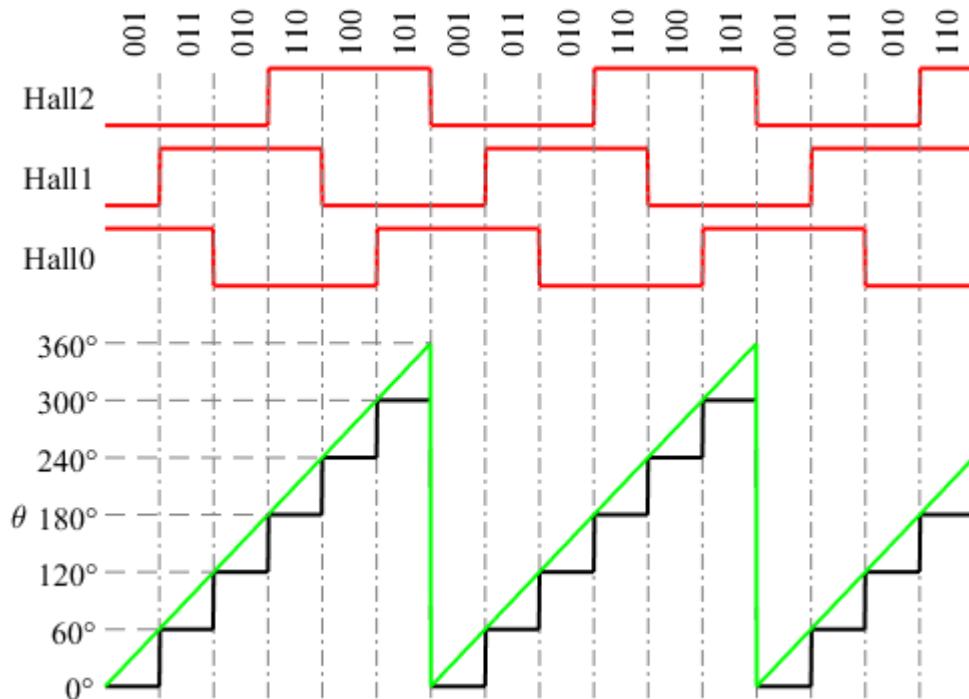


Рисунок 5 – Обработка сигнала с датчика Холла

Экстраполяция сигнала проводится по следующей формуле:

$$\theta = 60 \cdot \frac{\text{CurrentTimerValue} - \text{InterruptTimerValue}[i]}{\text{InterruptTimerValue}[i] - \text{InterruptTimerValue}[i - 1]}, \text{ где } \quad (2)$$

CurrentTimerValue – значение таймера в текущий момент,

$InterruptTimerValue[i]$ – значение таймера в момент изменения сигнала датчика Холла,

$InterruptTimerValue[i - 1]$ – значение таймера в момент предыдущего изменения сигнала датчика Холла

Для исключения накопления ошибки, появляющейся из-за непостоянности скорости вращения двигателя, в момент изменения сигнала датчика Холла значение угла корректируется.

Для расчета коэффициента заполнения ШИМ в момент изменения сигнала датчика Холла определяется текущая скорость вращения:

$$CurrentSpeed = \frac{60 \cdot TimerFrequency}{6 \cdot CurrentTimerValue - InterruptTimerValue[i]} \quad (3)$$

Также для уменьшения погрешности измерений вычисленная скорость попадает в буфер, а для последующих расчетов коэффициента заполнения используется среднее арифметическое значение буфера.

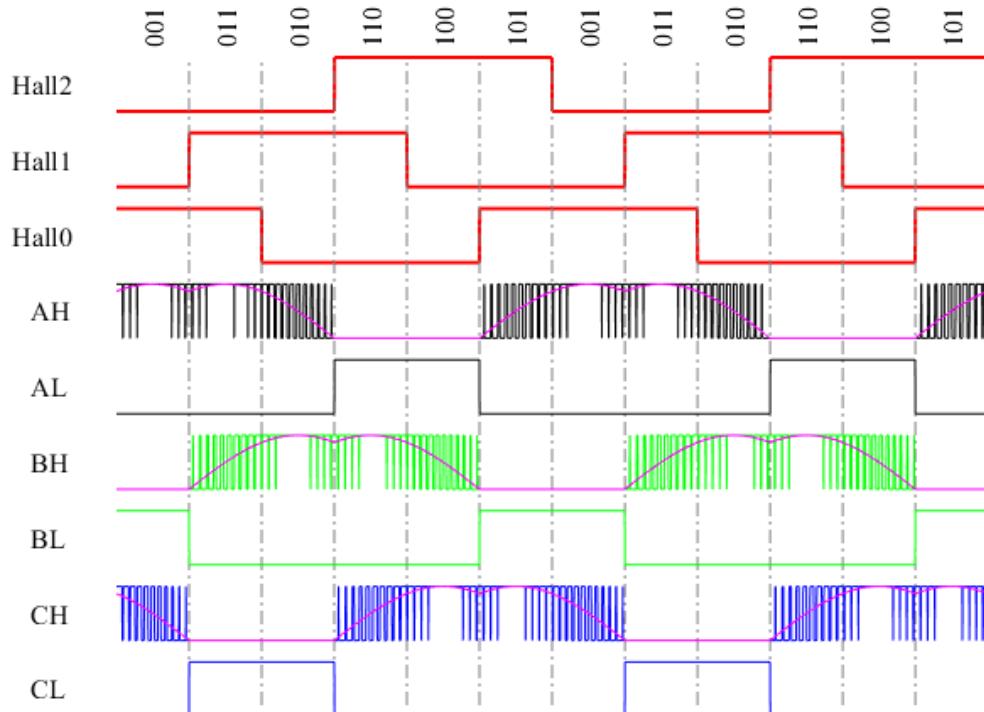
Формирование сигналов

На рисунке 6 приведены сигналы коммутации ключей инвертора при вышеописанном алгоритме управления. Для исключения замыкания стоеч инвертора необходимо вводить паузы между переключением комплементарных ключей либо в таблице задания пространственной ШИМ обнулить крайние значения, как показано в Таблице 1, что задержит включение верхнего ключа.

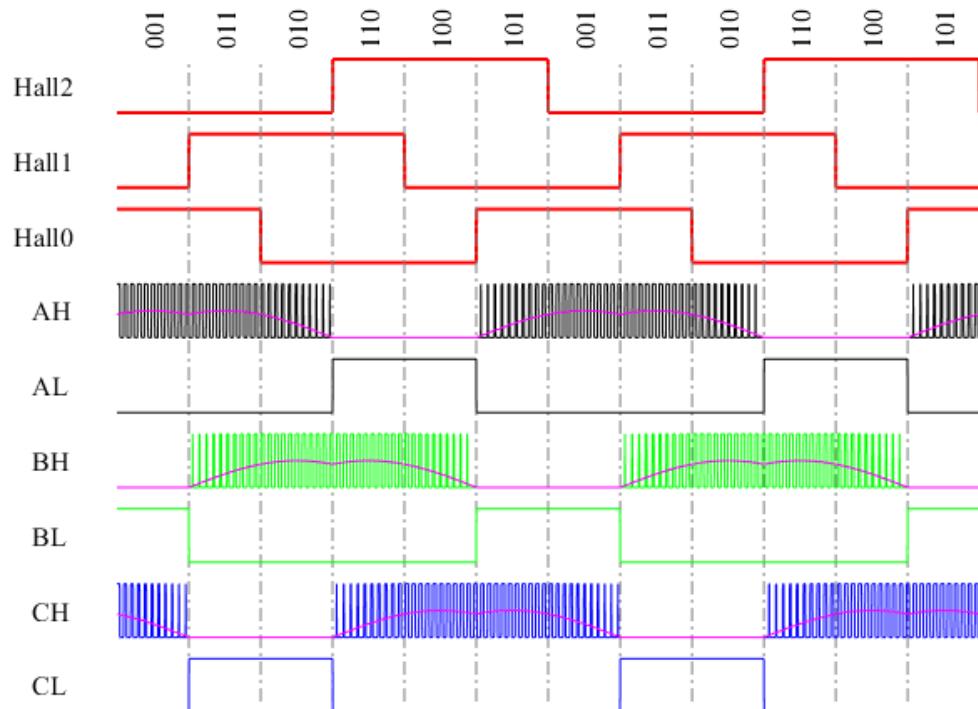
Таблица 1 – Внесение изменений в таблицу коэффициентов заполнения

Полученные значения	0	8	17	25	33	42	...	42	33	25	17	8	0
Измененные значения	0	0	0	25	33	42	...	42	33	25	0	0	0

Старт двигателя такими сигналами невозможен из-за отсутствия информации о положении ротора, поэтому старт проводится с помощью трапециoidalного метода управления. После 2-3 обновлений сигнала датчика Холла происходит переход на изложенный выше метод управления.



a)

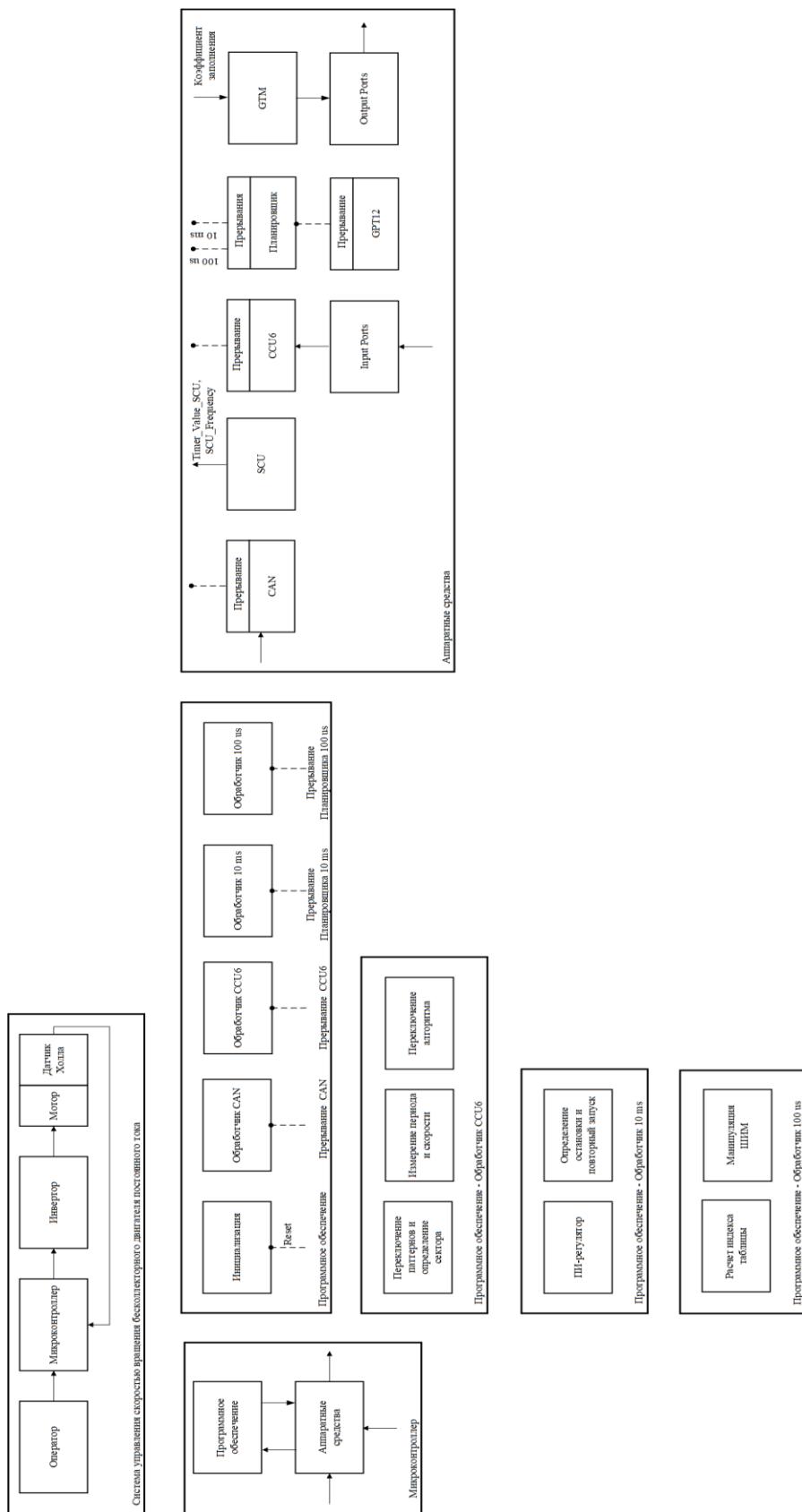


б)

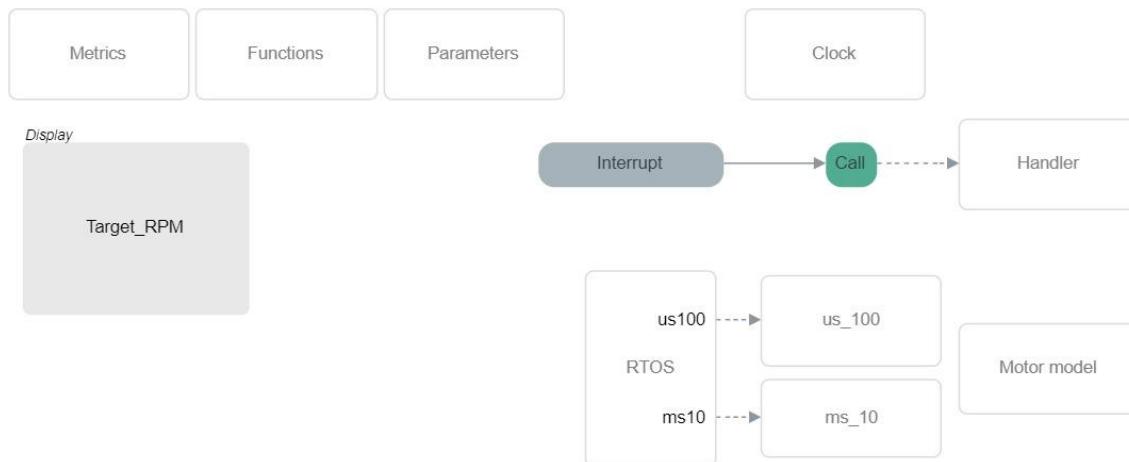
Рисунок 6 – Коммутация ключей инвертора при опорном напряжении:

a) $U_{пит}$; *б)* $0.5 \cdot U_{пит}$

Архитектура



Моделирование



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Interrupt	correct hall event	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Target_RPM	Target Velocity	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0

Рисунок 7 – Общий вид модели

Test_C_for_pictures/Metrics/

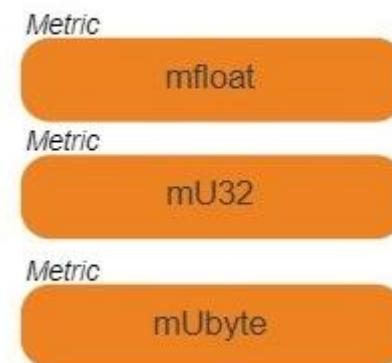


Рисунок 8 – Метрики для генерируемого кода

Метрики соответствуют типам данных языка С соответственно: float_t, uint32_t, uint8_t.



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
AH	High key phase A	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
AL	Low key phase A	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
A_Current	High key phase A	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
BH	High key phase B	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
BL	Low key phase B	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
B_Current	High key phase B	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
Buffer_size	buffer size	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	10
Buffer_sum	Sum of buffer's value	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
CH	High key phase C	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
CL	Low key phase C	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
C_Current	High key phase C	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
Current_RPM	Current Velocity	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
Current_sector	Current sector	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Hall_pattern	pattern hall sensor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Interrupt	correct hall event	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
K_J	Low key phase A	Скаляр	ОЗУ		1:1	Single	mfloat	7e-8
K_P	Low key phase A	Скаляр	ОЗУ		1:1	Single	mfloat	0.00007
Launched	Launch rotor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
RPM_circ_buf	buffer	Ось	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	↓
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RPM_raw	Raw RPM value	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
SINTABLE	Sinus value	Массив × Массив	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	↓
221.000	225.000	229.000	232.000	236.000	239.000	241.000	244.000	248.000
254.000	254.000	253.000	252.000	250.000	248.000	246.000	244.000	241.000
202.000	197.000	192.000	186.000	180.000	174.000	168.000	162.000	155.000
82.000	74.000	68.000	58.000	50.000	42.000	33.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
142.000	149.000	155.000	162.000	168.000	174.000	180.000	186.000	192.000
236.000	239.000	241.000	244.000	246.000	248.000	250.000	252.000	253.000
250.000	248.000	246.000	244.000	241.000	239.000	236.000	232.000	229.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
155.000	162.000	168.000	174.000	180.000	186.000	192.000	197.000	202.000
241.000	244.000	246.000	248.000	250.000	252.000	253.000	254.000	255.000
246.000	244.000	241.000	239.000	236.000	232.000	229.000	225.000	221.000
250.000	252.000	253.000	254.000	255.000	255.000	255.000	254.000	253.000
236.000	232.000	229.000	225.000	221.000	217.000	212.000	207.000	202.000
142.000	135.000	128.000	120.000	113.000	105.000	98.000	90.000	82.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
66.000	74.000	82.000	90.000	98.000	105.000	113.000	120.000	128.000
192.000	197.000	202.000	207.000	212.000	217.000	221.000	225.000	229.000
253.000	254.000	254.000	255.000	255.000	254.000	253.000	252.000	250.000
229.000	225.000	221.000	225.000	229.000	232.000	236.000	239.000	241.000
255.000	254.000	254.000	253.000	252.000	250.000	248.000	246.000	244.000
212.000	207.000	202.000	197.000	192.000	186.000	180.000	174.000	168.000
98.000	90.000	82.000	74.000	66.000	58.000	50.000	42.000	33.000
Stm_frequency	Frequency timer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Single	mfloat	1
Stopped	Stop rotor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Target_RPM	Target Velocity	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
count_isr	counter	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
duty_cycle	Duty Cycle for PWM	Скаляр	ОЗУ		1:1	Single	mfloat	0
i	counter	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
pattern_switch	Last switch pattern value of microcontroller timer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
sin_index	sin value index	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
stm_value	Value of microcontroller timer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
ticks_per_sector	value of microcontroller timer in 60 degrees sector	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0

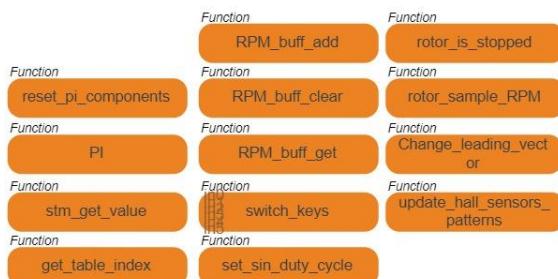
Рисунок 9 – Параметры для генерируемого кода

Параметры float: K_I, K_P, duty_cycle.

Параметры uint8: Stopped, Hall_pattern, Launched, AH, BH, CH, AL, BL, CL, Interrupt, Current_sector, sin_index, count_isr.

Остальные параметры uint32.

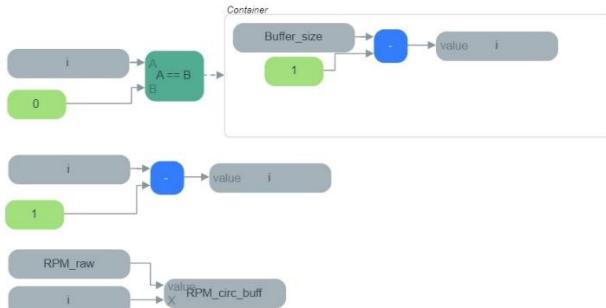
Параметры K_I и K_P инициализируются значениями для конкретного мотора, в параметр SINTABLE, определенный как массив [3][192], заполняется значениями, полученными в формуле (1). Остальные параметры инициализируются нулем.



Функция	Описание	Входы	Выходы
Change_leading_vector	Change leading vector		
PI	PI controller		
RPM_buff_add	add element to buffer		
RPM_buff_clear	Clear buffer values		
RPM_buff_get	Get buffer's average arithmetic values		
get_table_index	get index sin value		
reset_pi_components	Reset PI		
rotor_is_stopped	rotor stop flag		
rotor_sample_RPM	timer value update		
set_sin_duty_cycle	set sin duty cycle		
stm_get_value	current value of timer		
switch_keys	switch invertors keys	mUbyte, mUbyte, mUbyte, mUbyte, mUbyte, mUbyte	
update_hall_sensors_patterns	update_hall_sensors_patterns		

Рисунок 10 – Функции для генерируемого кода

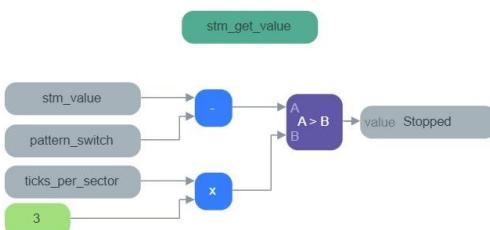
RPM_buff_add
add element to buffer
Входы: отсутствуют
Выходы: отсутствуют



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
<u>Buffer_size</u>	buffer size	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	10
<u>RPM_circ_buff</u>	buffer	Ось	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	↓
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<u>RPM_raw</u>	Raw RPM value	Скаляр	ОЗУ	1:1	Uint32	mU32	0	
i	counter	Скаляр	ОЗУ	1:1	Uint32	mU32	0	

Рисунок 11 – Функция добавления значения скорости в буфер

rotor_is_stopped
rotor stop flag
Входы: отсутствуют
Выходы: отсутствую



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
<u>Stopped</u>	Stop rotor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
<u>pattern_switch</u>	last switch pattern value of microcontroller timer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
<u>stm_value</u>	Value of microcontroller timer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
<u>ticks_per_sector</u>	value of microcontroller timer in 60 degrees sector	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0

Функция	Описание	Входы	Выходы
stm_get_value	current value of timer		

Рисунок 12 – Функция определения остановки ротора

reset_pi_components

Reset_PI

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
back_l	back_Integral_component	Скаляр	ОЗУ		1:1	Single	mfloat	0

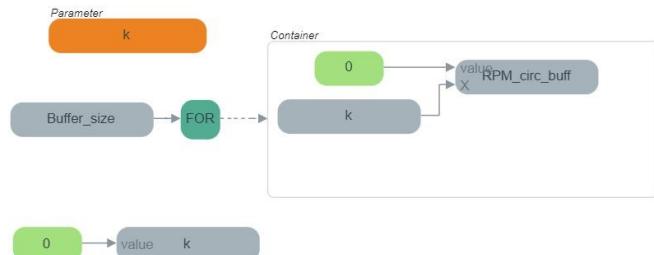
Рисунок 13 – Сброс значения интегральной составляющей ПИ-регулятора

RPM_buff_clear

Clear buffer values

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Buffer_size	buffer size	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	10
RPM_circ_buff	buffer	Ось	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	↓
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
k	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0	

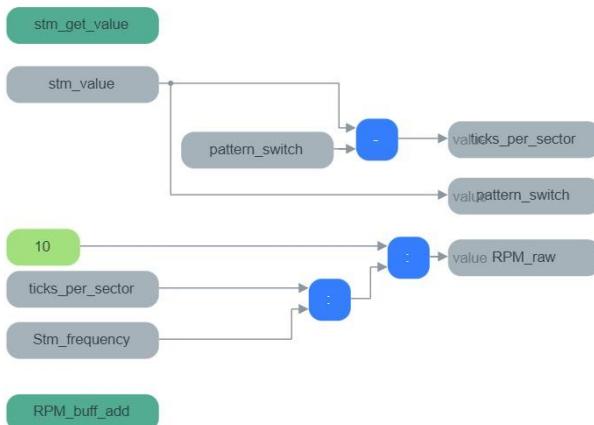
Рисунок 14 – Функция очистки буфера

rotor_sample_RPM

timer value update

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
RPM_raw	Raw RPM value	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
Stm_frequency	Frequency timer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Single	mfloat	1
pattern_switch	last switch pattern value of microcontroller timer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
stm_value	Value of microcontroller timer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
ticks_per_sector	value of microcontroller timer in 60 degrees sector	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0

Функция	Описание	Входы	Выходы
RPM_buff_add	add element to buffer		
stm_get_value	current value of timer		

Рисунок 15 – Функция расчета скорости по формуле (3)

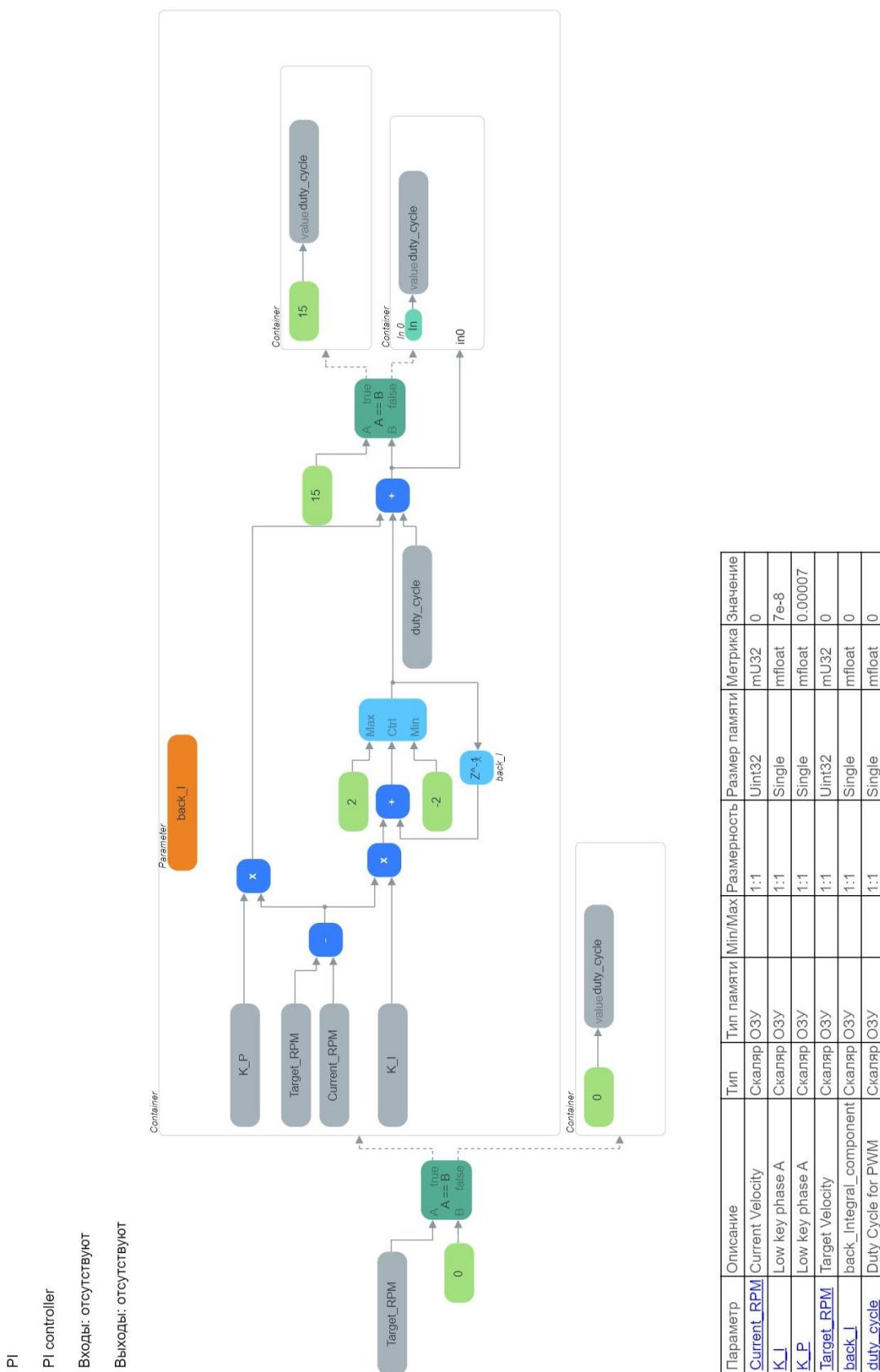


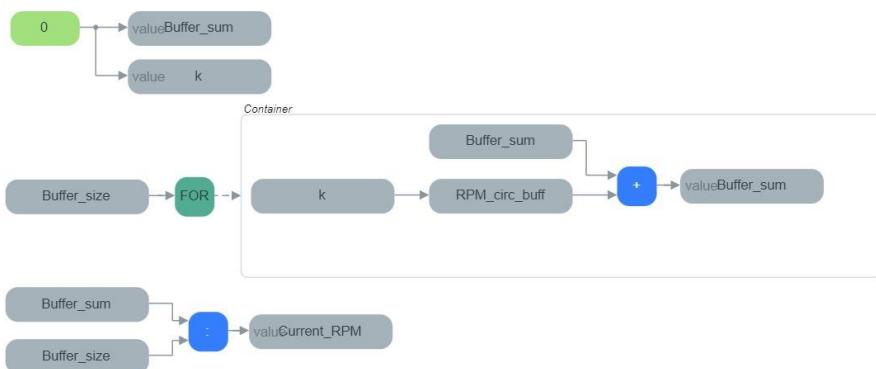
Рисунок 16 – ПИ-регулятор

RPM_buf_get

Get buffer's average arithmetic values

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
<u>Buffer_size</u>	buffer size	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	10
<u>Buffer_sum</u>	Sum of buffer's value	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
<u>Current_RPM</u>	Current Velocity	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
<u>RPM_circ_buff</u>	buffer	Ось	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	↓
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
k	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0	

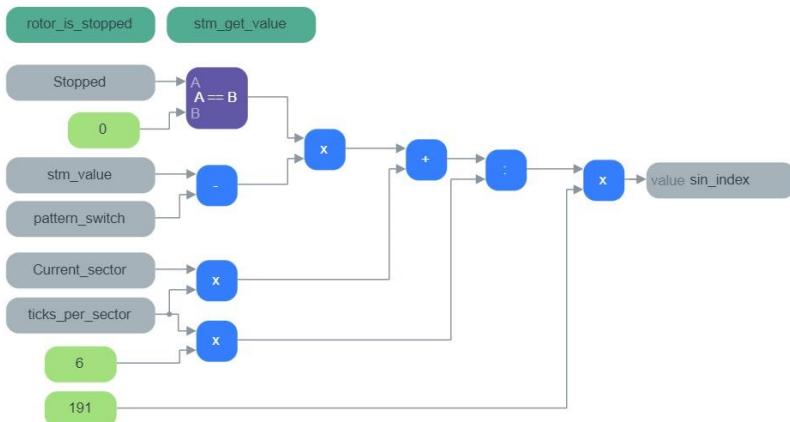
Рисунок 17 – Функция расчета средней скорости из буфера

get_table_index

get index sin value

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Current_sector	Current sector	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Stopped	Stop rotor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
pattern_switch	last switch pattern value of microcontroller timer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
sin_index	sin value index	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
stm_value	Value of microcontroller timer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0
ticks_per_sector	value of microcontroller timer in 60 degrees sector	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0

Функция	Описание	Входы	Выходы
rotor_is_stopped	rotor stop flag		
stm_get_value	current value of timer		

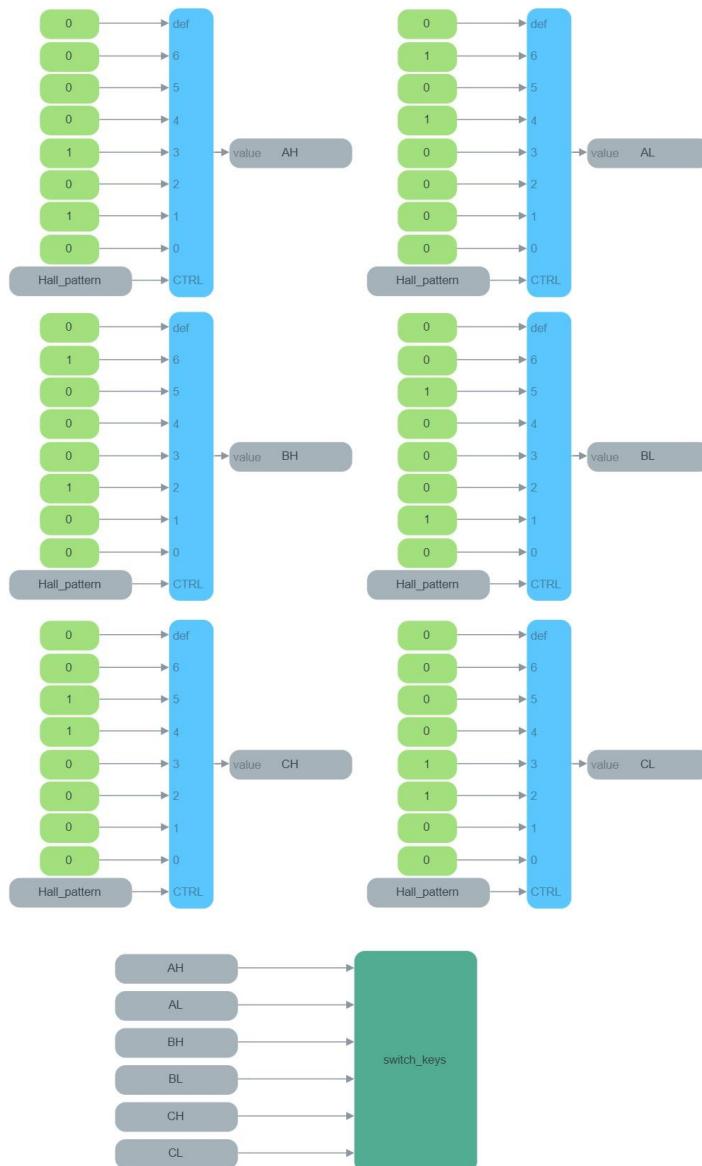
Рисунок 18 – Расчет индекса таблицы значений синуса

Change_leading_vector

Change leading vector

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют

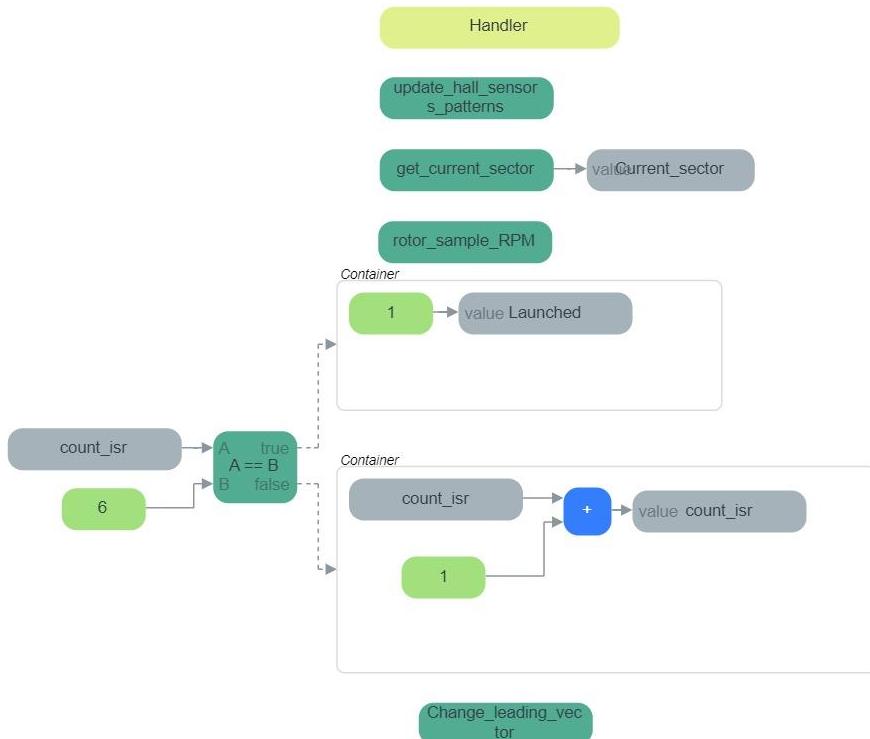


Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
AH	High key phase A	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
AL	Low key phase A	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
BH	High key phase B	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
BL	Low key phase B	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
CH	High key phase C	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
CL	Low key phase C	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Hall_pattern	pattern hall sensor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0

Функция	Описание	Входы	Выходы
switch_keys	switch invertors keys	mUbyte, mUbyte, mUbyte, mUbyte, mUbyte, mUbyte	

Рисунок 19 – Переключение ключей инвертора

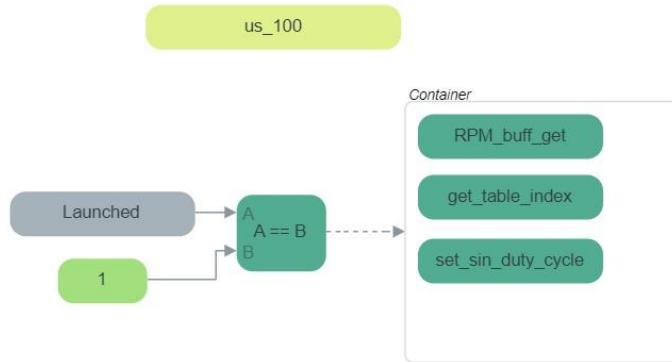
Функции, не приведенные на рисунках объявляются внешними и определяются на целевой платформе.



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
<u>Current_sector</u>	Current sector	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
<u>Launched</u>	Launch rotor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
<u>count_isr</u>	counter	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0

Функция	Описание	Входы	Выходы
<u>Change_leading_vector</u>	Change leading vector		
<u>get_current_sector</u>	get_current_sector		mUbyte
<u>rotor_sample_RPM</u>	timer value update		
<u>update_hall_sensors_patterns</u>	update_hall_sensors_patterns		

Рисунок 20 – Обработчик прерываний



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Launched	Launch rotor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0

Функция	Описание	Входы	Выходы
RPM_buff_get	Get buffer's average arithmetic values		
get_table_index	get index sin value		
set_sin_duty_cycle	set sin duty cycle		

Рисунок 21 – Уровень 100 нс планировщика

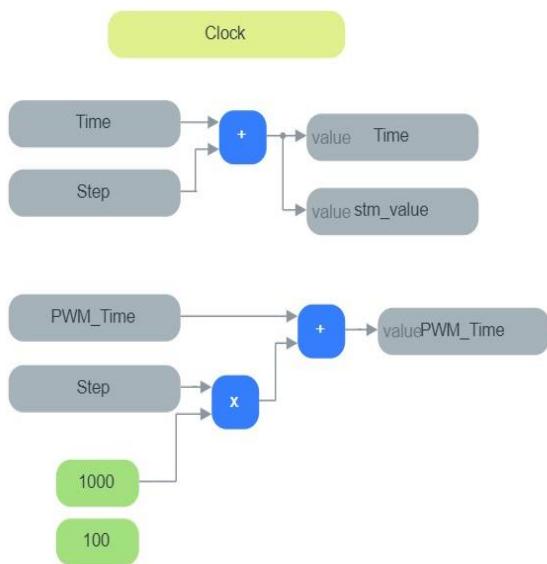


Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Launched	Launch rotor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Stopped	Stop rotor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Target_RPM	Target Velocity	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0

Функция	Описание	Входы	Выходы
PI	PI controller		
rotor_is_stopped	rotor stop flag		

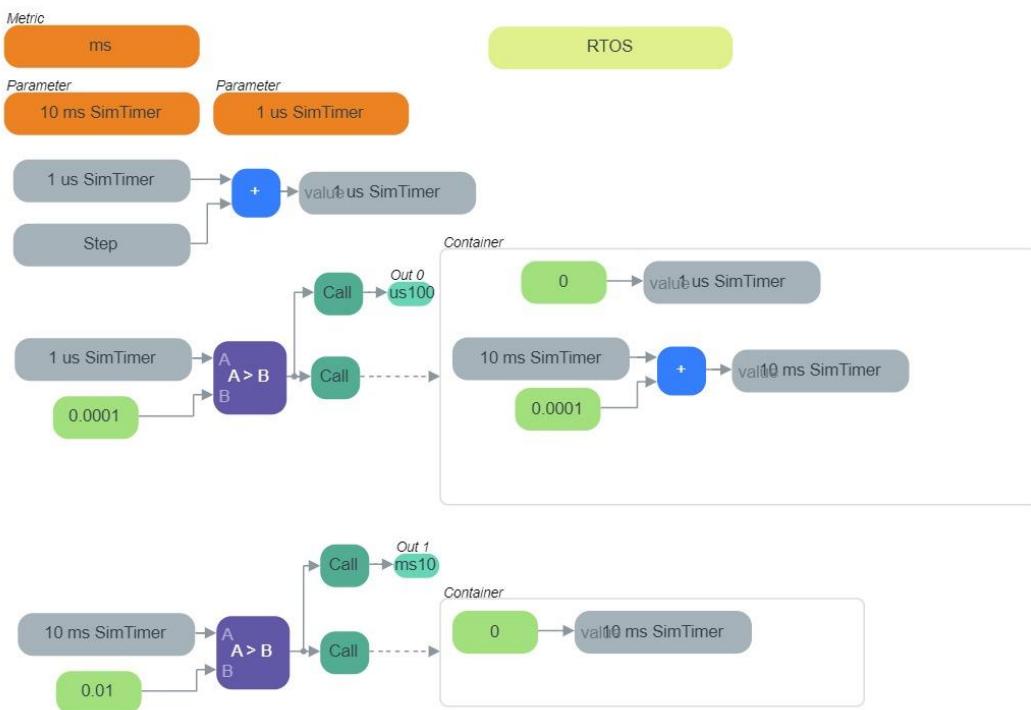
Рисунок 22 – Уровень 10 мс планировщика

Вышеприведенные блоки модели непосредственно генерируются в файлы с кодом языка С и встраиваются в целевую платформу. Для отладки алгоритмов необходимо добавить блоки таймера, планировщика и мотора.



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
<u>Code_generation_flag</u>	1 us SimTimer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	ms	0
<u>PWM_Time</u>	Время моделирования	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>Step</u>	Шаг моделирования	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.00001
<u>Time</u>	Время моделирования	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>stm_value</u>	Value of microcontroller timer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint32	mU32	0

Рисунок 23 – Блок имитации таймера



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
1 us SimTimer	1 us SimTimer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	ms	0
10 ms SimTimer	10 ms SimTimer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	ms	0
Code_generation_flag	1 us SimTimer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	ms	0
Step	Шаг моделирования	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.00001

Рисунок 24 – Блок имитации планировщика

Модель бесколлекторного двигателя постоянного тока основана на упрощенной математической модели:

$$U_k = I_k R_k + L \frac{dI_k}{dt} + e_k, \text{ где} \quad (4)$$

U_k - напряжение фазы, I_k - ток фазы, R_k - сопротивление фазы, L_k - индуктивность фазы, e_k - противоэдс фазы.

$$e_k = K_e * \psi_k * \omega, \text{ где}$$

K_e – коэффициент противоэдс, ω – угловая скорость вращения ротора, ψ_k – единичная функция противоэдс:

$$\begin{aligned}\psi_A &= \begin{cases} \frac{\varphi - 30}{30}, & 0 < \varphi \leq 60 \\ 1, & 60 < \varphi \leq 180, \\ \frac{210 - \varphi}{30}, & 180 < \varphi \leq 240, \\ -1, & 240 < \varphi \leq 360 \end{cases} \\ \psi_B &= \begin{cases} -1, & 0 < \varphi \leq 120 \\ \frac{\varphi - 150}{30}, & 120 < \varphi \leq 180, \\ 1, & 180 < \varphi \leq 300, \\ \frac{330 - \varphi}{30}, & 300 < \varphi \leq 360 \end{cases} \\ \psi_C &= \begin{cases} 1, & 0 < \varphi \leq 60 \\ \frac{90 - \varphi}{30}, & 60 < \varphi \leq 120, \\ -1, & 120 < \varphi \leq 240, \\ \frac{\varphi - 270}{30}, & 240 < \varphi \leq 300, \\ 1, & 300 < \varphi \leq 360 \end{cases}\end{aligned}\tag{5}$$

φ – угол поворота ротора.

$$M_{\text{дв}} - M_{\text{н}} = J \frac{d\omega}{dt}, \text{ где}$$

$M_{\text{дв}} = \frac{e_A \cdot I_A + e_B \cdot I_B + e_C \cdot I_C}{\omega} p$ – момент, создаваемый двигателем; $M_{\text{н}}$ – момент нагрузки; J – момент инерции ротора, p – количество пар полюсов.

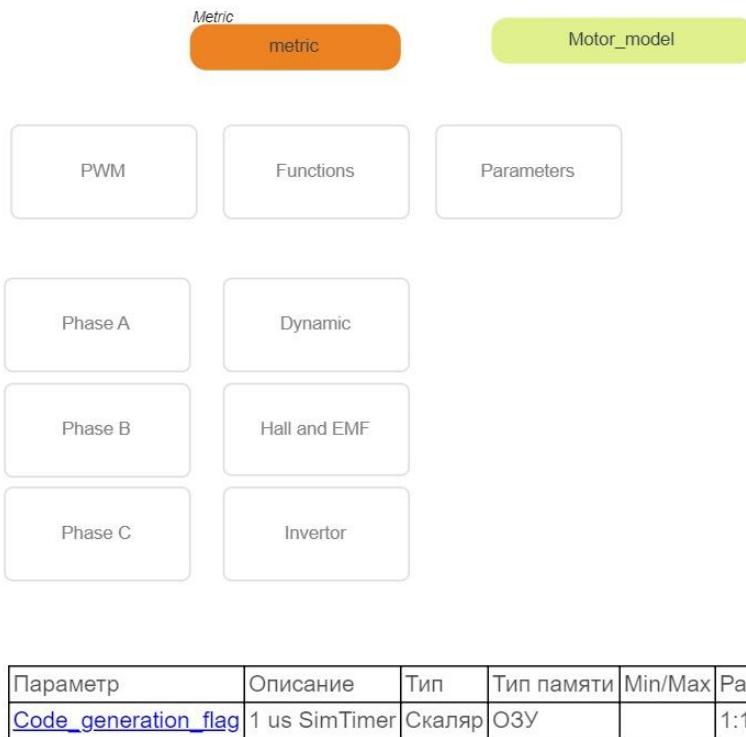
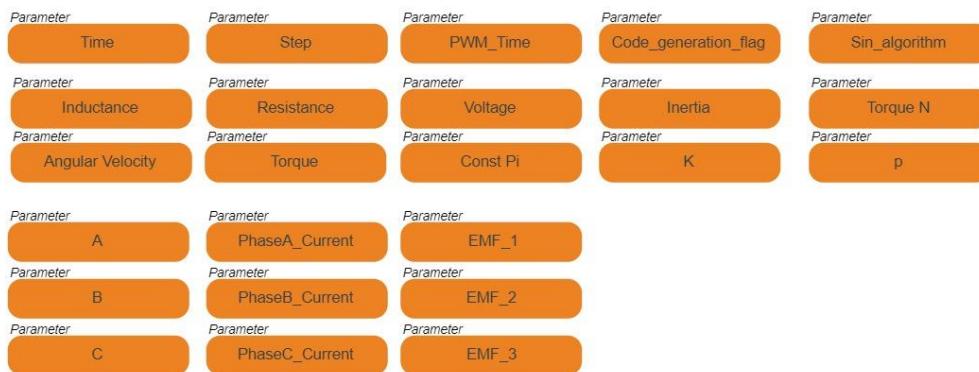
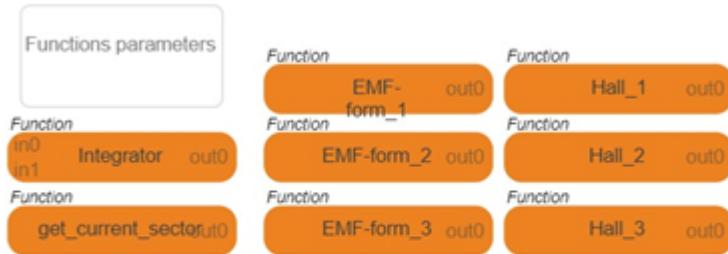


Рисунок 25 – Общий вид модели БДПТ



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
A		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Angular Velocity	Угловая скорость	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
B		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
C		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Code_generation_flag	1 us SimTimer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	ms	0
Const Pi	число Pi	Скаляр	Конст.		1:1	Double	metric	3.141596535
EMF_1		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
EMF_2		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
EMF_3		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Inductance	Индуктивность	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.000113
Inertia	Момент инерции ротора	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.000002
K	Коэффициент противо-ЭДС	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.01025
PWM_Time	Время моделирования	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
PhaseA_Current		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
PhaseB_Current		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
PhaseC_Current		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Resistance	Сопротивление	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.695
Sin_algorithm	1 us SimTimer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	ms	1
Step	Шаг моделирования	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.00001
Time	Время моделирования	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Torque	Момент	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Torque_N	Момент нагрузки	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Voltage	Напряжение питания	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	12
p	Количество пар полюсов	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	1

Рисунок 26 – Параметры для моделирования мотора



Функция	Описание	Входы	Выходы
EMF-form_1			
EMF-form_2			
EMF-form_3			
Hall_1			
Hall_2			
Hall_3			
Integrator	Интеграл		
get_current_sector	get_current_sector		mUbyte

Рисунок 27 – Функции для моделирования мотора

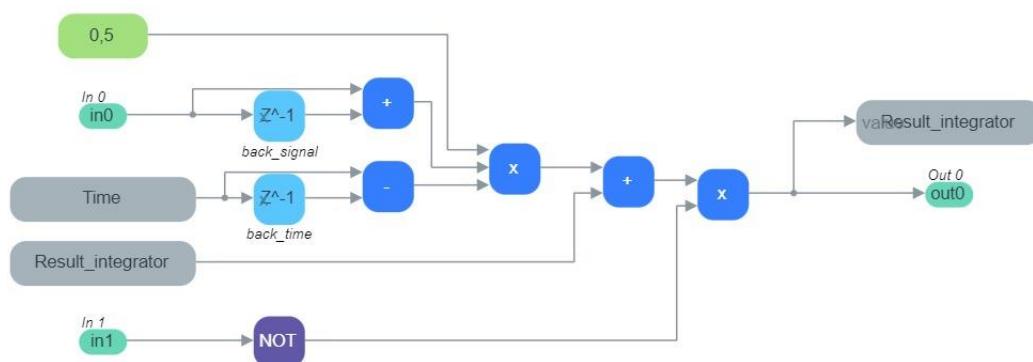
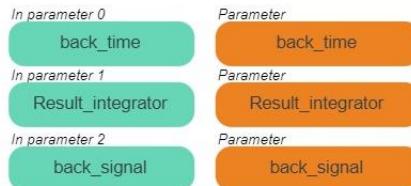
Для моделирования необходима функция интегрирования. В данной модели реализована функция численного интегрирования методом трапеций (Рисунок 28).

Integrator

Интеграл

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
<u>Result_integrator</u>		Скаляр	Указатель		1:1	Double	metric	0
<u>Time</u>	Время моделирования	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>back_signal</u>		Скаляр	Указатель		1:1	Double	metric	0
<u>back_time</u>		Скаляр	Указатель		1:1	Double	metric	0

Рисунок 28 – Функция численного интегрирования

Для каждого вызова функции интеграла необходимо создавать 3 параметра, показанные в верхней части рисунка 28.



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Angle_result_integrator		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
CurrentA_result_integrator		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
CurrentB_result_integrator		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
CurrentC_result_integrator		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Filter_result_integrator		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
PI_result_integrator		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Period_result_integrator		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Time_back_for_PI		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Time_back_for_angle		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Time_back_for_currentA		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Time_back_for_currentB		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Time_back_for_currentC		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Time_back_for_filter		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Time_back_for_period		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Time_back_for_torque		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Torque_result_integrator		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
back_signal_for_PI		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
back_signal_for_angle		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
back_signal_for_currentA		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
back_signal_for_currentB		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
back_signal_for_currentC		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
back_signal_for_filter		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
back_signal_for_period		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
back_signal_for_torque		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0

Рисунок 29 – Параметры для вызовов функции интегрирования

Функции, показанные на рисунках 30-32, основаны на выражениях 5. Имитация сигналов датчика Холла, продемонстрированная на рисунке 33, опирается на выражения:

$$Hall_1 = \begin{cases} 1, & \sin \theta \geq 0 \\ 0, & \sin \theta \geq 0 \end{cases}$$

$$Hall_2 = \begin{cases} 1, & \sin(\theta - 120) \geq 0 \\ 0, & \sin(\theta - 120) < 0 \end{cases}$$

$$Hall_3 = \begin{cases} 1, & \sin(\theta + 120) \geq 0 \\ 0, & \sin(\theta + 120) < 0 \end{cases}$$

На рисунке 34 показана модельная реализация уравнения 4, а на рисунке 35 – уравнения 6.

EMF-form_1

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют

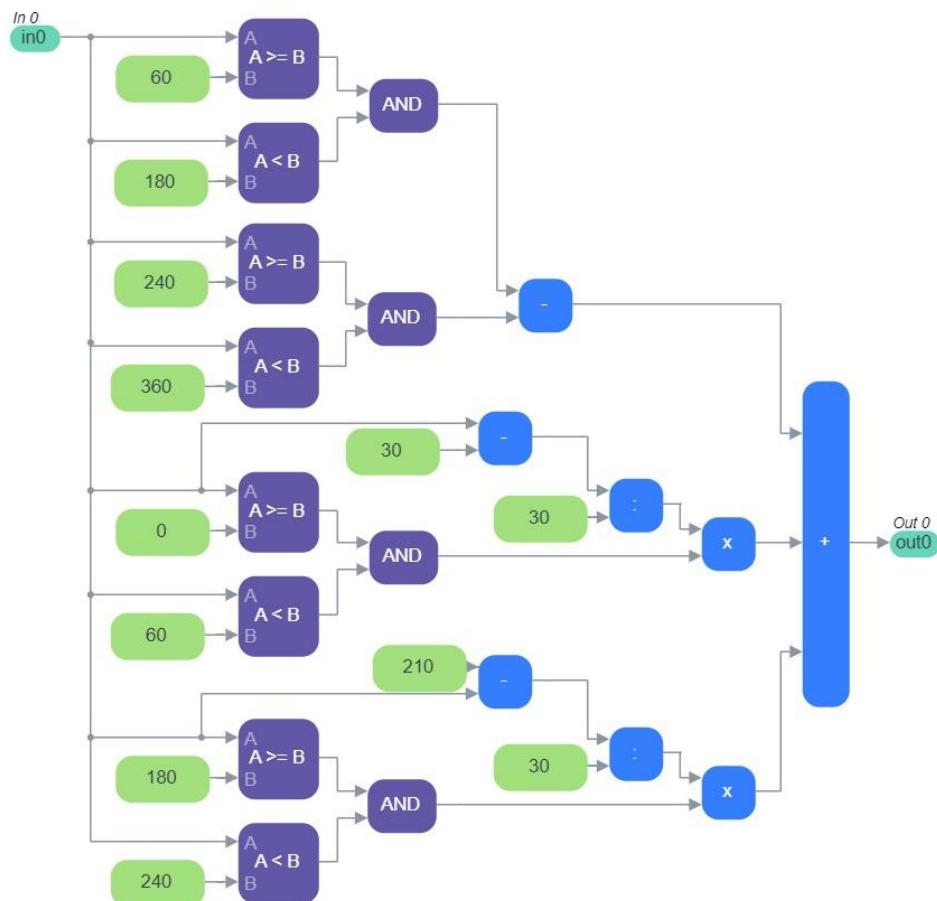


Рисунок 30 – Функция-генератор противоэдс фазы А

EMF-form_2

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют



Рисунок 31 – Функция-генератор противоэдс фазы В

EMF-form_3

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют

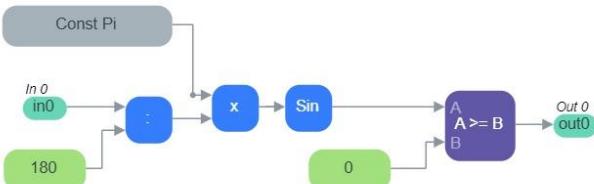


Рисунок 32 – Функция-генератор противоэдс фазы С

Hall_1

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют

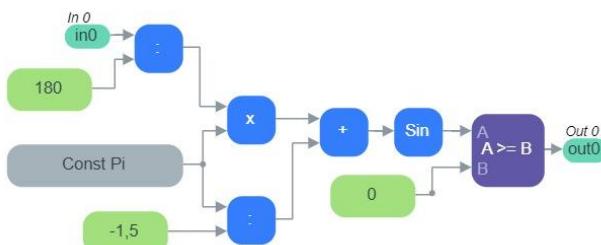


Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Const Pi	число Pi	Скаляр	Конст.		1:1	Double	metric	3.141596535

Hall 2

Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют

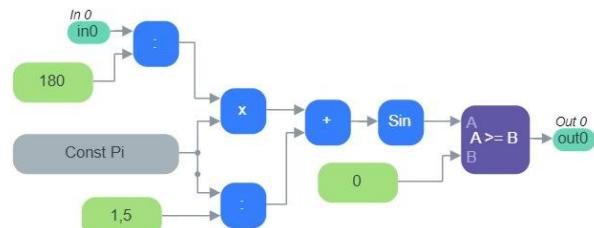


Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Const Pi	число Pi	Скаляр	Конст.		1:1	Double	metric	3.141596535

Hall 3

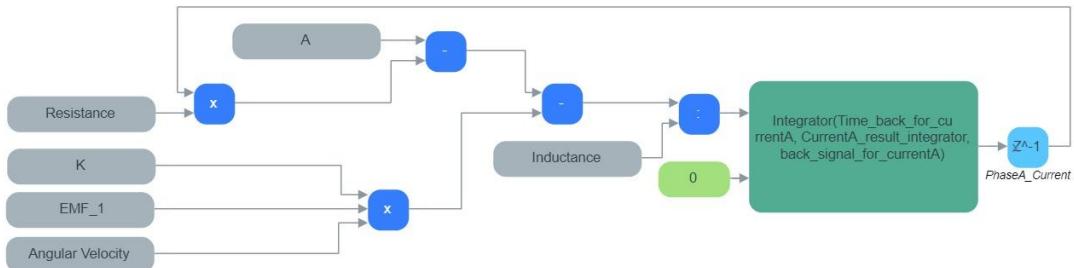
Входы: отсутствуют

Выходы: отсутствуют



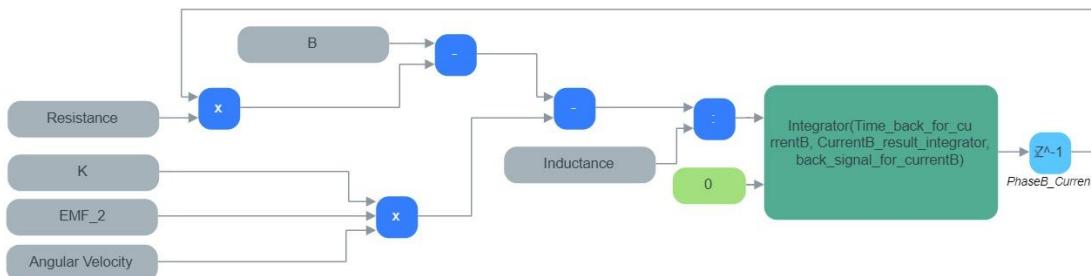
Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Const Pi	число Pi	Скаляр	Конст.		1:1	Double	metric	3.141596535

Рисунок 33 – Функции-генераторы сигналов датчика Холла



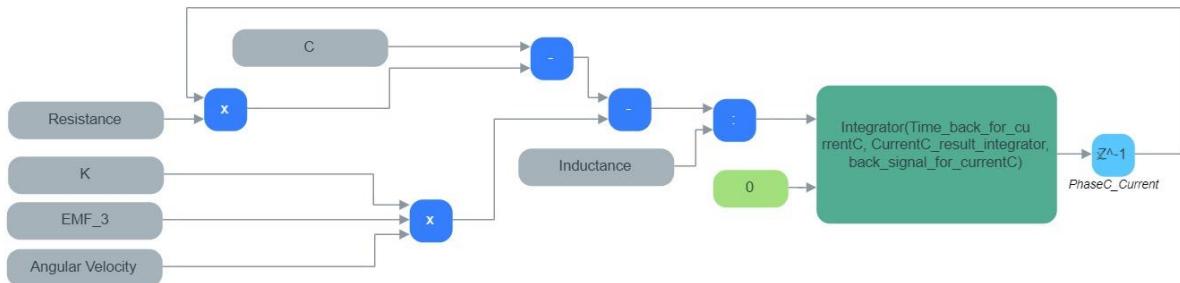
Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
<u>A</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>Angular Velocity</u>	Угловая скорость	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>CurrentA_result_integrator</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>EMF_1</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>Inductance</u>	Индуктивность	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.000113
<u>K</u>	Коэффициент противо-ЭДС	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.01025
<u>PhaseA_Current</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>Resistance</u>	Сопротивление	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.695
<u>Time_back_for_currentA</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>back_signal_for_currentA</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0

Функция	Описание	Входы	Выходы
<u>Integrator</u>	Интеграл		



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
<u>Angular Velocity</u>	Угловая скорость	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>B</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>CurrentB_result_integrator</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>EMF_2</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>Inductance</u>	Индуктивность	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.000113
<u>K</u>	Коэффициент противо-ЭДС	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.01025
<u>PhaseB_Current</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>Resistance</u>	Сопротивление	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.695
<u>Time_back_for_currentB</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
<u>back_signal_for_currentB</u>		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0

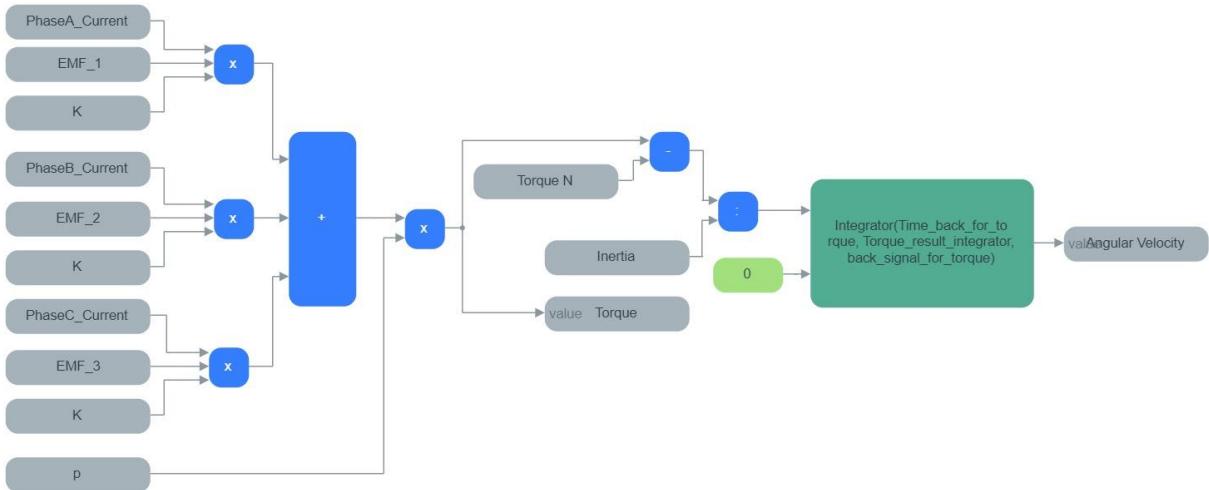
Функция	Описание	Входы	Выходы
<u>Integrator</u>	Интеграл		



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Angular_Velocity	Угловая скорость	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
C		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
CurrentC_result_integrator		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
EMF_3		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Inductance	Индуктивность	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.000113
K	Коэффициент противо-ЭДС	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.01025
PhaseC_Current		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Resistance	Сопротивление	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.695
Time_back_for_currentC		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
back_signal_for_currentC		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0

Функция	Описание	Входы	Выходы
Integrator	Интеграл		

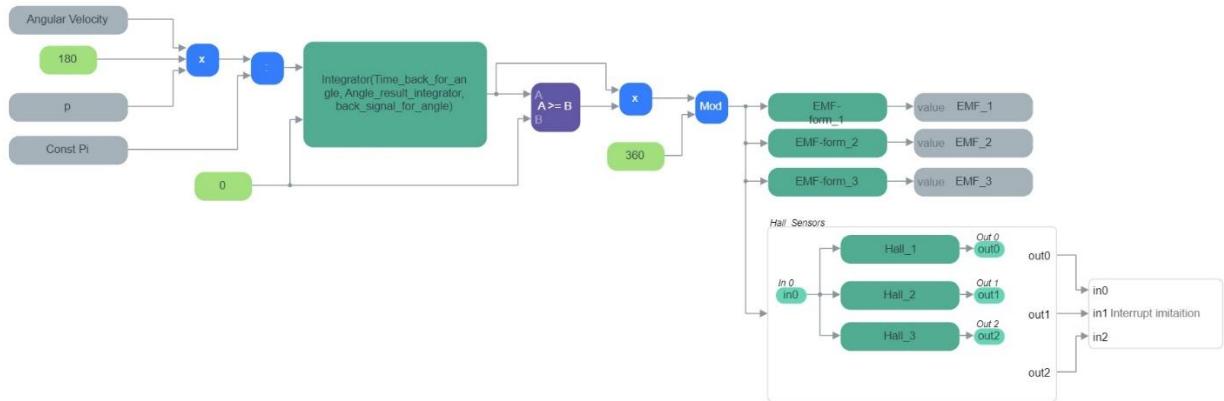
Рисунок 34 – Расчет фазных токов



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Angular Velocity	Угловая скорость	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
EMF_1		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
EMF_2		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
EMF_3		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Inertia	Момент инерции ротора	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.000002
K	Коэффициент противо-ЭДС	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0.01025
PhaseA_Current		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
PhaseB_Current		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
PhaseC_Current		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Time_back_for_torque		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Torque	Момент	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Torque_N	Момент нагрузки	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Torque_result_integrator		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
back_signal_for_torque		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
p	Количество пар полюсов	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	1

Функция	Описание	Входы	Выходы
Integrator	Интеграл		

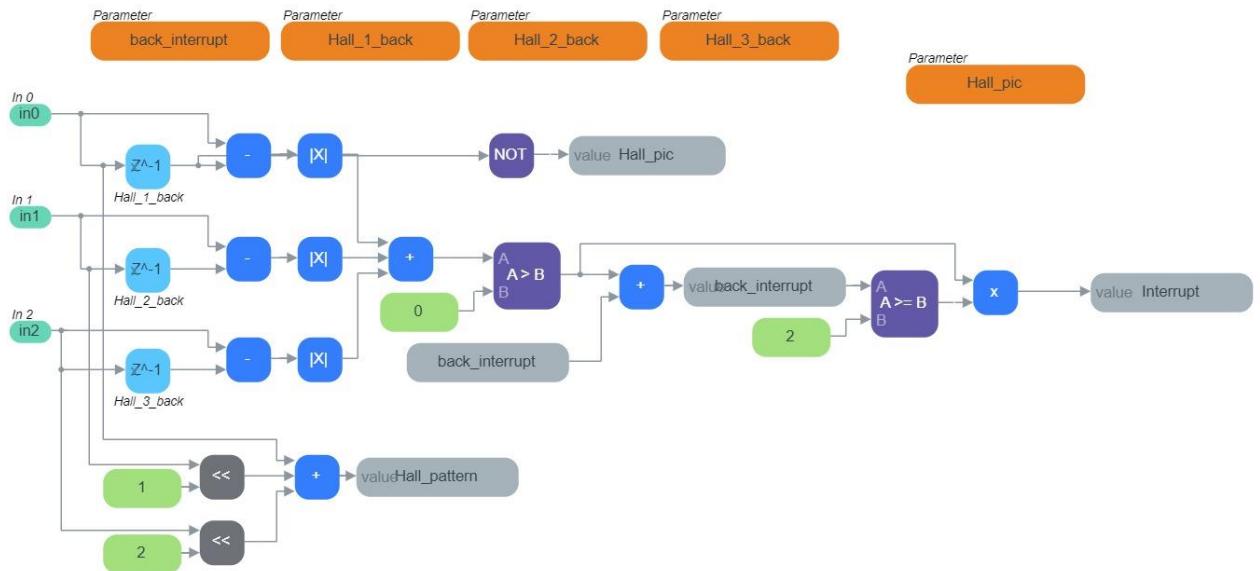
Рисунок 35 – Расчет угловой скорости



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Angle_result_integrator		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Angular Velocity	Угловая скорость	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Const Pi	число Pi	Скаляр	Конст.		1:1	Double	metric	3.141596535
EMF_1		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
EMF_2		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
EMF_3		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Time_back_for_angle		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
back_signal_for_angle		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
p	Количество пар полюсов	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	1

Функция	Описание	Входы	Выходы
EMF-form_1			
EMF-form_2			
EMF-form_3			
Hall_1			
Hall_2			
Hall_3			
Integrator	Интеграл		

Рисунок 36 – Расчет угла поворота ротора, противоэдс, сигналов датчика Холла и напряжений



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
Hall_1_back		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Hall_2_back		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Hall_3_back		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Hall_pattern	pattern hall sensor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Hall_pic		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Interrupt	correct hall event	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
back_interrupt		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0

Рисунок 37 – Имитация сигнала прерывания

Интегрируя полученную на рисунке 35 угловую скорость вращения ротора, получим угол поворота ротора, необходимый для генерации сигналов датчика Холла и противоэдс обмоток (Рисунок 36).

Так как алгоритм управления использует сигнал прерывания контроллера, то для отладки его также необходимо имитировать (Рисунок 37).

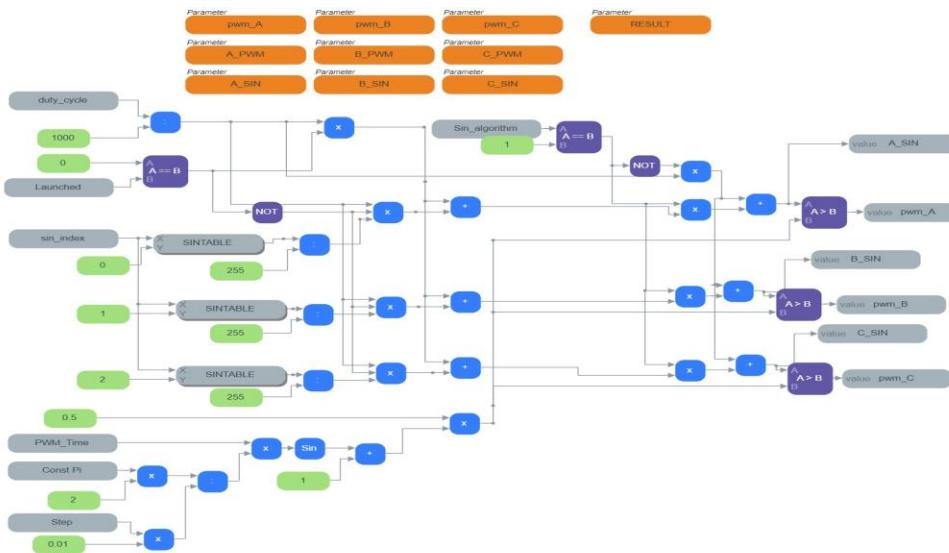


Рисунок 38 – Имитация ШИМ сигнала

Имитация ШИМ сигнала основана сравнении требуемого коэффициента заполнения со значением синусоиды необходимой частоты (Рисунок 38).

Test_C_for pictures/Motor model/Invertor/

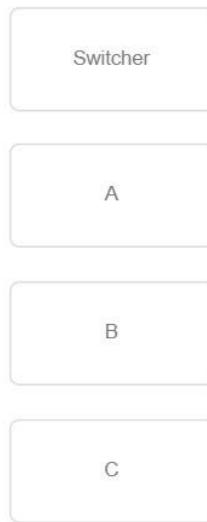
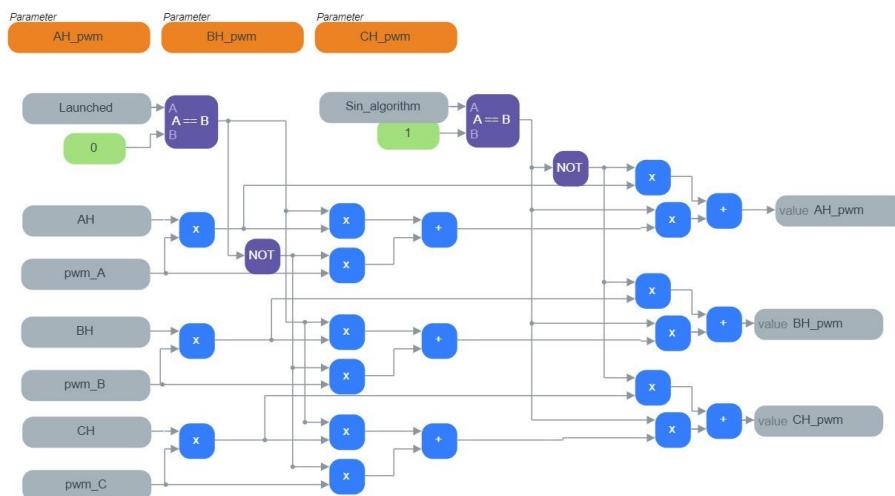
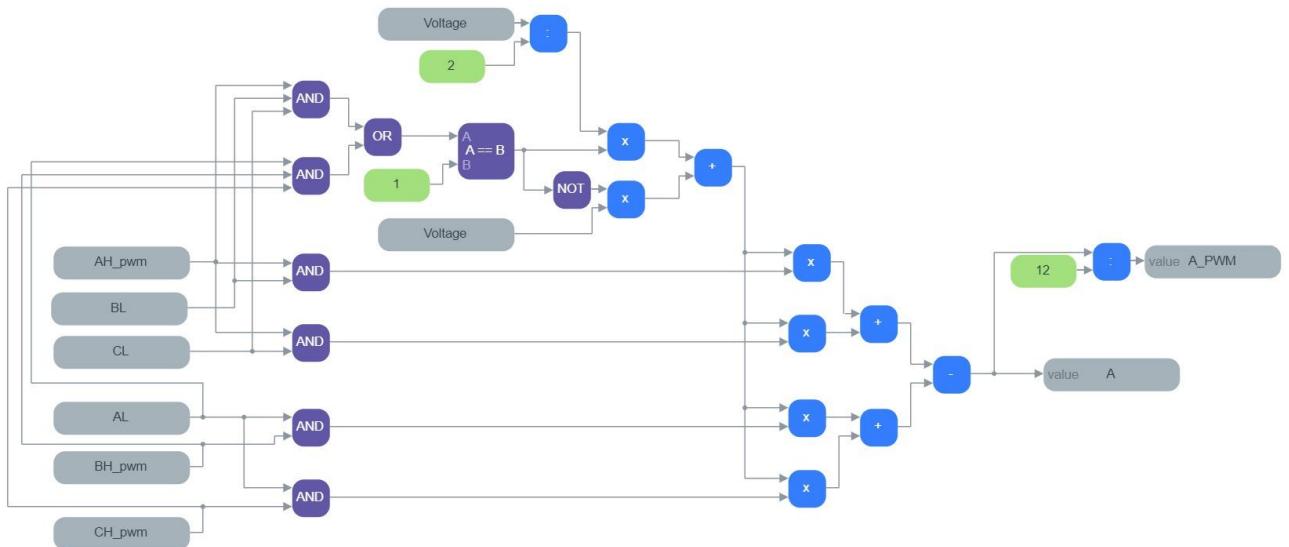


Рисунок 39 – Имитация инвертора

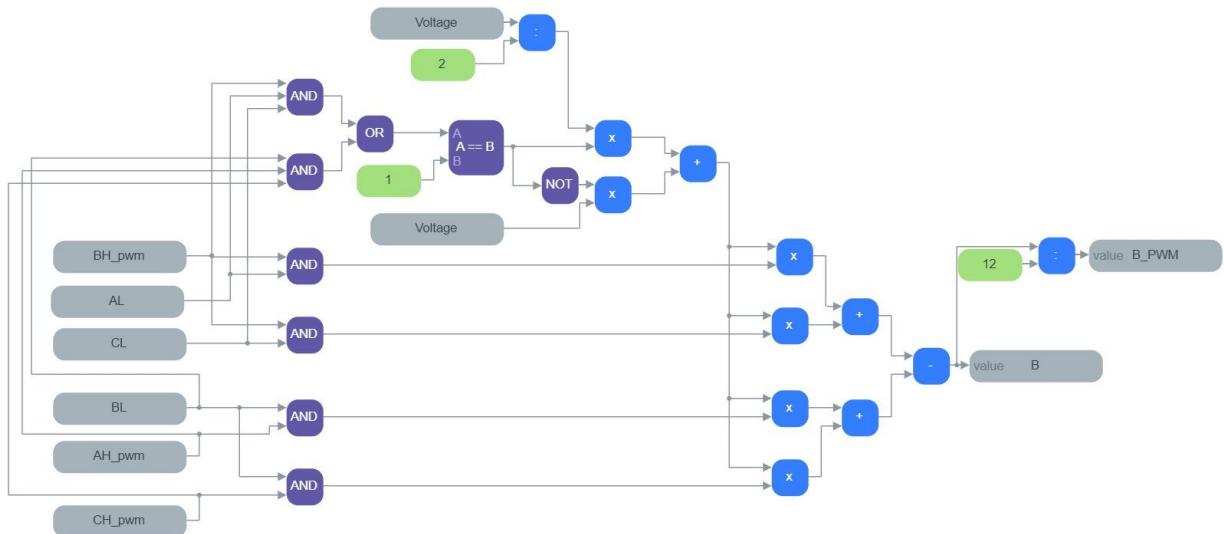


Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
AH	High key phase A	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
AH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
BH	High key phase B	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
BH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
CH	High key phase C	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
CH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
Launched	Launch rotor	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Sin_algorithm	1 us SimTimer	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	ms	1
pwm_A		Скаляр	ОЗУ		1:1			0
pwm_B		Скаляр	ОЗУ		1:1			0
pwm_C		Скаляр	ОЗУ		1:1			0

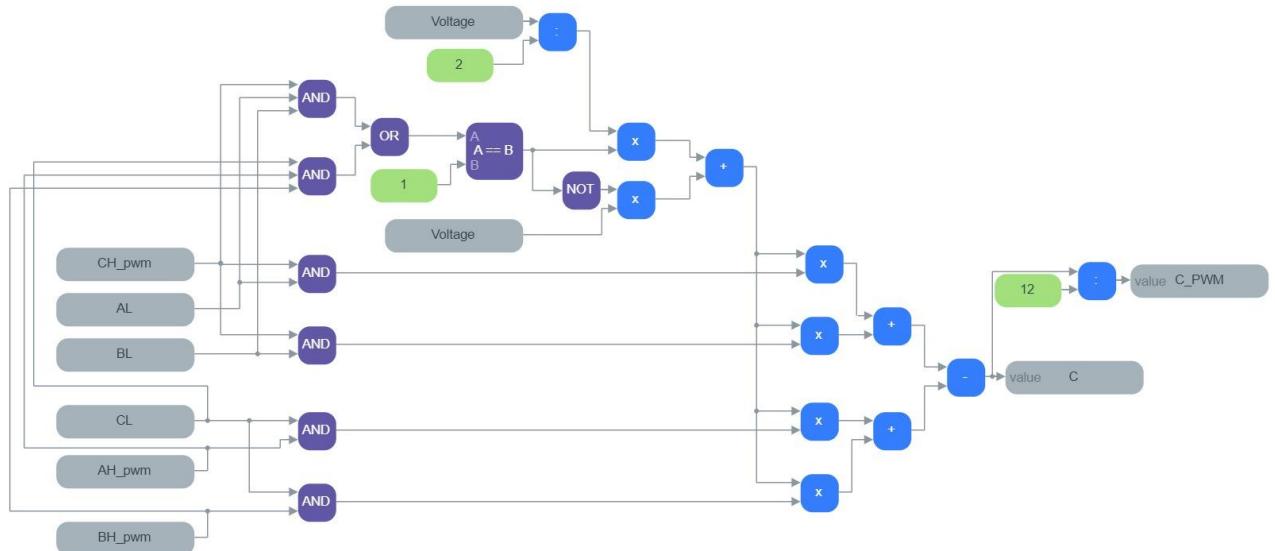
Рисунок 40 – Переключение стартового и основного алгоритма



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
A		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
AH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
AL	Low key phase A	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
A_PWM		Скаляр	ОЗУ		1:1			0
BH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
BL	Low key phase B	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
CH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
CL	Low key phase C	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Voltage	Напряжение питания	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	12



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
AH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
AL	Low key phase A	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
B		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
BH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
BL	Low key phase B	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
B_PWM		Скаляр	ОЗУ		1:1			0
CH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
CL	Low key phase C	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
Voltage	Напряжение питания	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	12



Параметр	Описание	Тип	Тип памяти	Min/Max	Размерность	Размер памяти	Метрика	Значение
AH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
AL	Low key phase A	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
BH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
BL	Low key phase B	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
C		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
CH_pwm		Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	0
CL	Low key phase C	Скаляр	ОЗУ		1:1	Uint8	mUbyte	0
C_PWM		Скаляр	ОЗУ		1:1			0
Voltage	Напряжение питания	Скаляр	ОЗУ		1:1	Double	metric	12

Рисунок 41 – Имитация выходного напряжения инвертора

Результаты моделирования

Для симуляции был взят мотор со следующими параметрами:

$$L = 0.113 \text{ мГн}, R = 0.695 \Omega, U = 24 \text{ В}, J = 2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}, K_e = 10.25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{с}}{\text{В}\cdot\text{рад}}, p=1.$$

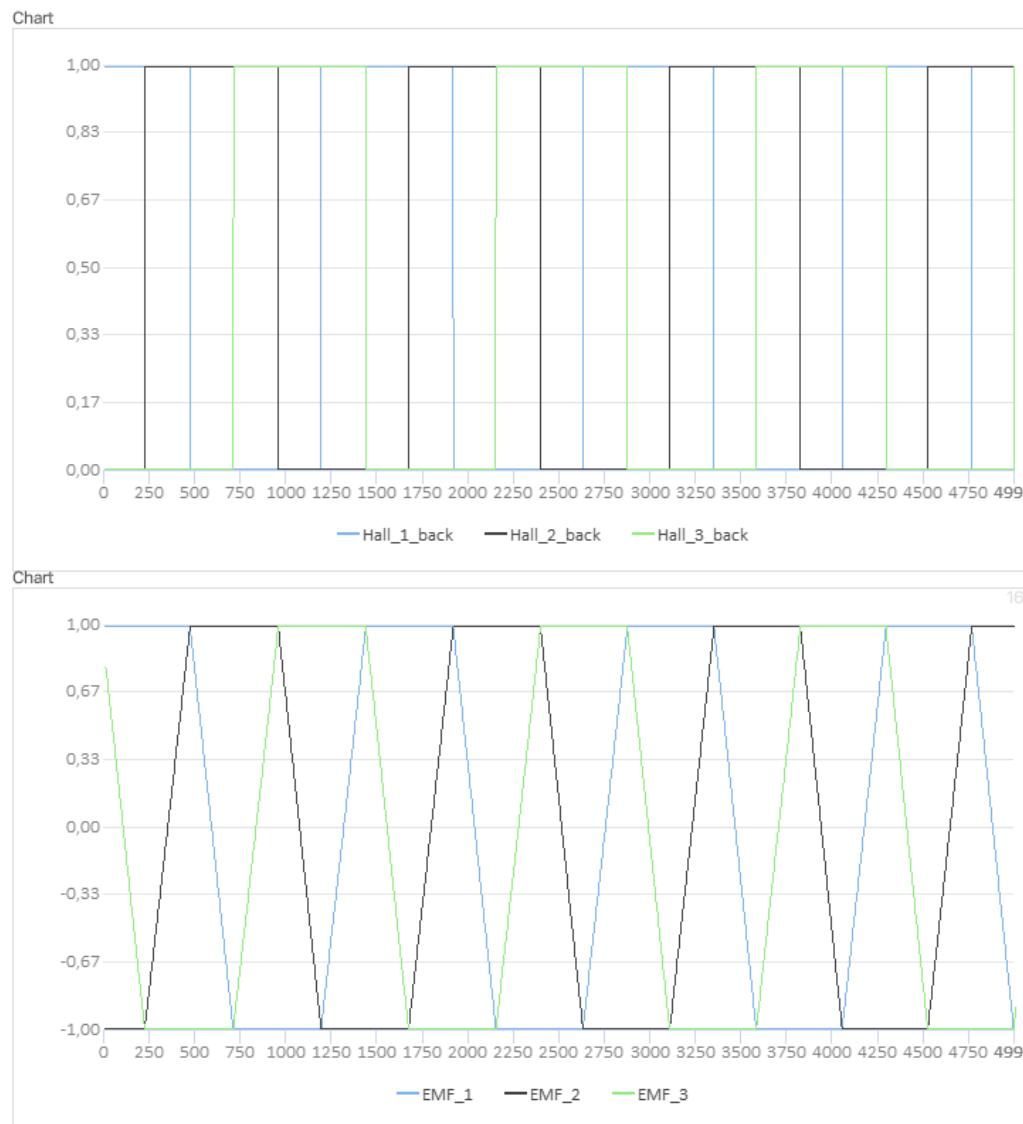


Рисунок 42 – Сигналы датчика Холла и противоэдс

На рисунке 43 показаны сигналы симуляции в установившемся режиме, а на рисунке 44 – фазные токи. Те же сигналы при переходе со стартового трапециoidalного режима на псевдовекторный продемонстрированы на рисунках 45-46.



Рисунок 43 – Сигналы симуляции: синий – величина коэффициента
заполнения; черный – датчик Холла; зеленый – относительное
напряжение

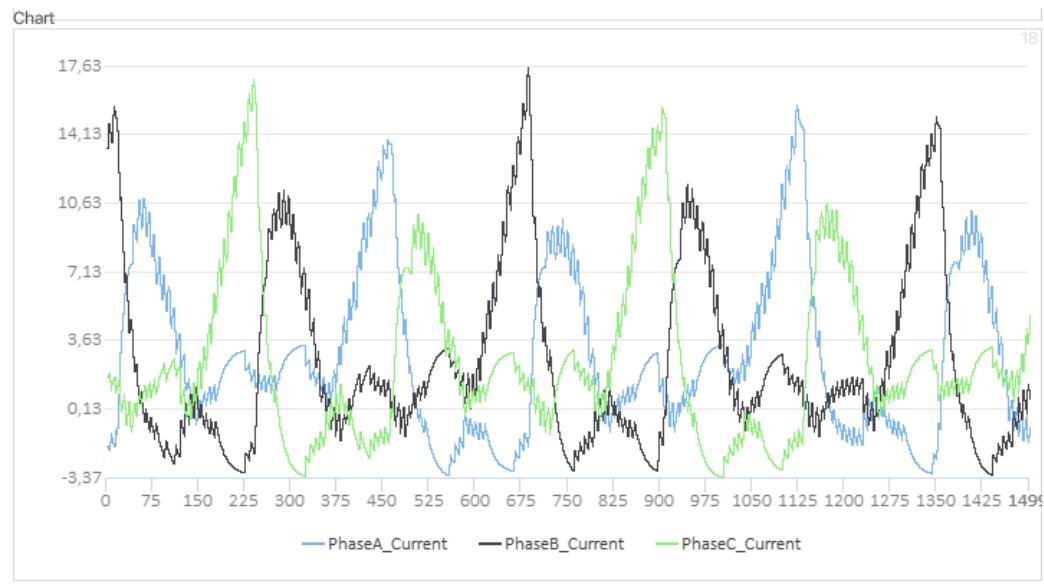
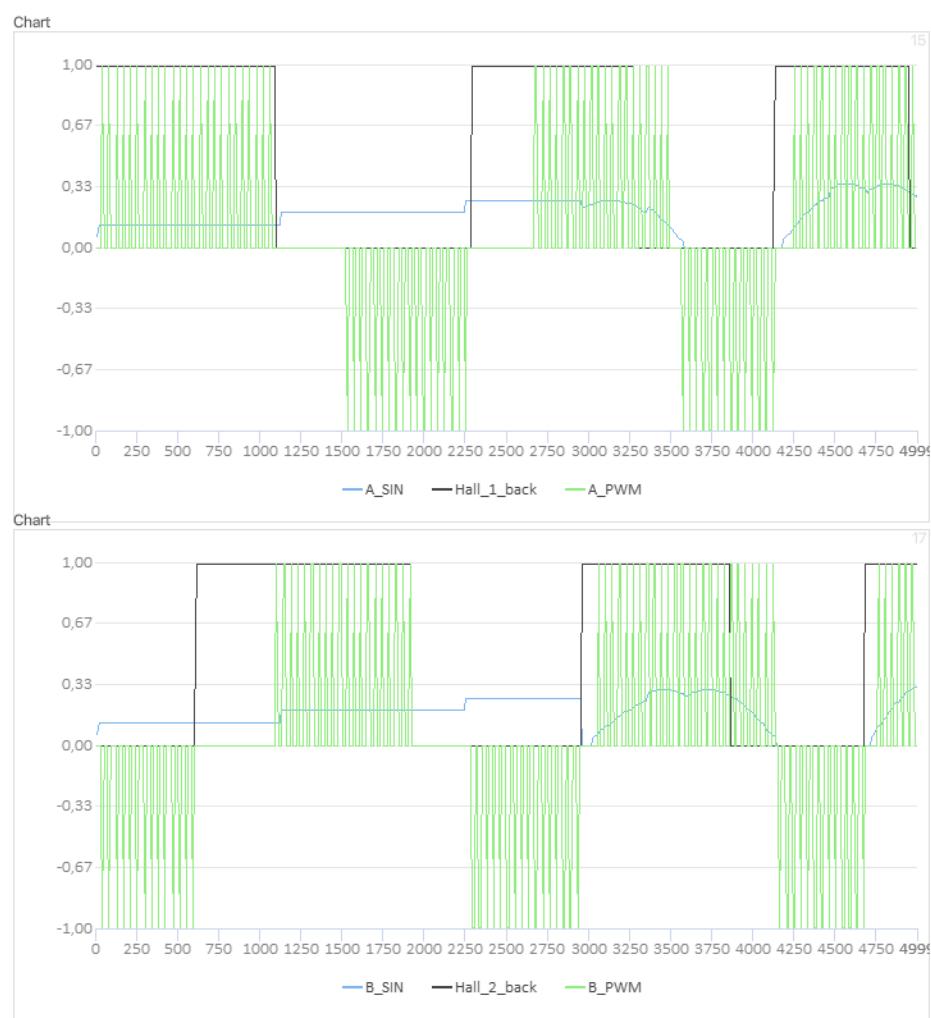


Рисунок 44 – Фазные токи



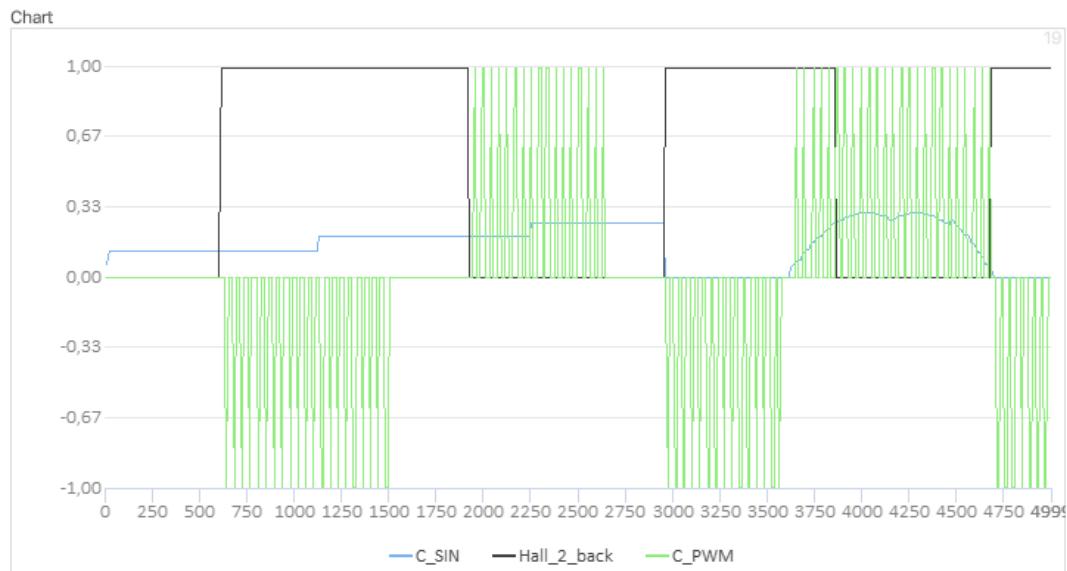


Рисунок 45 – Сигналы симуляции: синий – величина коэффициента заполнения; черный – датчик Холла; зеленый – относительное напряжение

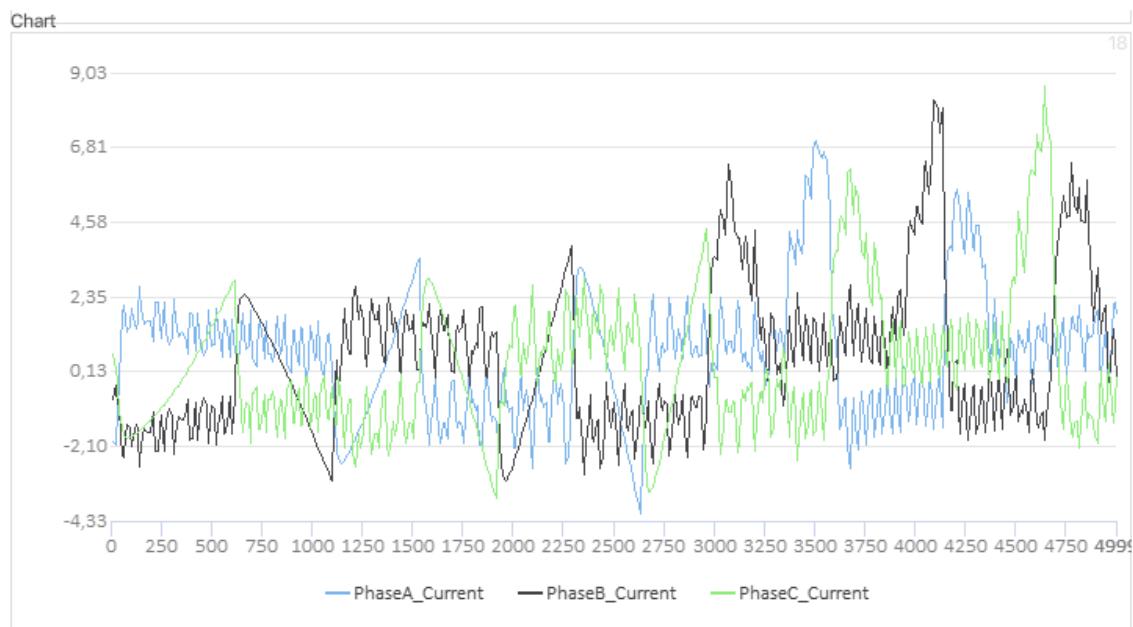


Рисунок 46 – Фазные токи

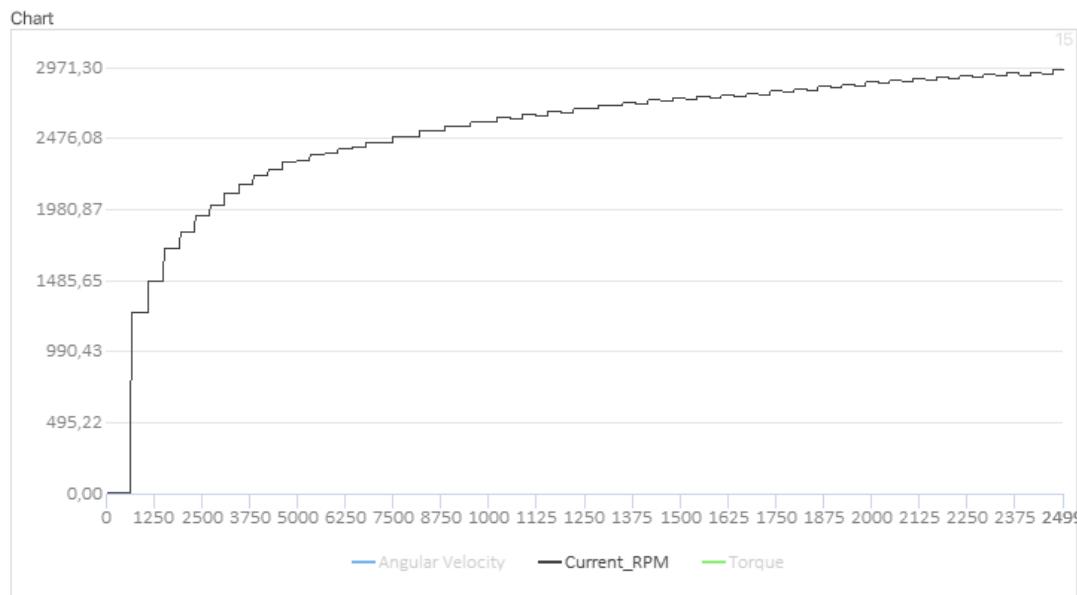


Рисунок 47 – Переходный процесс по скорости. Заданная скорость 3000

По результатам моделирования использование вышеописанного метода управления бесколлекторным двигателем постоянного тока позволяет увеличить до 1.5 раз момент, создаваемый мотором, за счет полного использования ресурса источника постоянного тока, а также можно уменьшить пульсации момента до 50% в зависимости от дискретизации таблицы синусоиды.

История изменений документа

Автор изменений	Дата изменений	Комментарий
Мусатов Антон	17.05.2022	Создание документа

Autogramma

