

Система управления статическим компенсатором реактивной мощности с использованием преобразования Blondеля для линейных напряжений

А. Н. Прокшин

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина);
Санкт-Петербургский
государственный университет
anprokshin@etu.ru

Г. А. Карпов

Санкт-Петербургский
государственный университет
g.a.karpov@spbu.ru

А. В. Трофимов

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
avtrofimov@etu.ru

П. В. Ж. М. Найага

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
м. В.И. Ульянова (Ленина)
mosesnayaab@gmail.com

Н. И. Татаринцев

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
nitatarintsev@etu.ru

А. К. Пожидаев

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
akpozhideev@etu.ru

Аннотация. В системах управления статическим компенсатором реактивной мощности (СТАТКОМ) в трехфазных сетях без нулевого провода используются измеренные линейные напряжения. В трехфазных инверторах напряжения при векторной широтно-импульсной модуляции скважности открытия ключей пропорциональны линейному напряжению. Поэтому преобразование Blondеля для линейных напряжений оказывается эффективнее, чем преобразование Blondеля для фазных напряжений. При переходе во вращающуюся систему координат и из нее используется преобразование Blondеля для линейных напряжений.

Приведен метод измерения реактивной мощности, оперирующий линейными напряжениями.

Ключевые слова: преобразование Blondеля; метод Аарона двух ваттметров для реактивной мощности; векторная широтно-импульсная модуляция

I. МОДЕЛЬ СТАТИЧЕСКОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Рассматриваем систему управления СТАТКОМ с помощью инвертора напряжения. СТАТКОМ подключен к трехфазной сети без нулевого провода параллельно трехфазной активно-индуктивной нагрузке. Нагрузка подключена в звезду.

За основу взята схема компенсатора реактивной мощности, приведенная на сайте Matlab [1].

Действующее линейное напряжение сети $V_{AB} = 415\text{В}$ с частотой $f = 50\text{Гц}$. Нагрузка с активной мощностью 150 кВт и реактивной мощностью 75 кВАр. Инвертор соединен с сетью трехфазным дросселем с индуктивностью каждой фазы 1 мГн. На стороне постоянного тока инвертора установлена индуктивность 5600 мкФ и сопротивление 10^{-3}Ом . В установившемся режиме напряжение звена постоянного тока $U_d = 800\text{В}$. Частота коммутации ключей 10 кГц. Сигнал на включение ключей реализован с помощью таймера пилообразной формы с симметричными возрастающим и спадающим фронтами.

Схема компенсатора реактивной мощности с изменениями приведена на рис. 1. Вместо синусоидальной ШИМ на рис. 1 используется векторная ШИМ (svpwm). Для сравнения алгоритмов использовалась синусоидальная ШИМ.

II. ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПЕРЕХОДА ОТ АЛГОРИТМОВ С ФАЗНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ К АЛГОРИТМАМ С ЛИНЕЙНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

В системах управления СТАТКОМ в трехфазных сетях без нулевого провода используются измеренные линейные напряжения. Не всегда возможно получить доступ к нулевой шине трансформатора. При подключении нагрузки в звезду часто нет доступа к средней точке, чтобы измерить фазные напряжения.

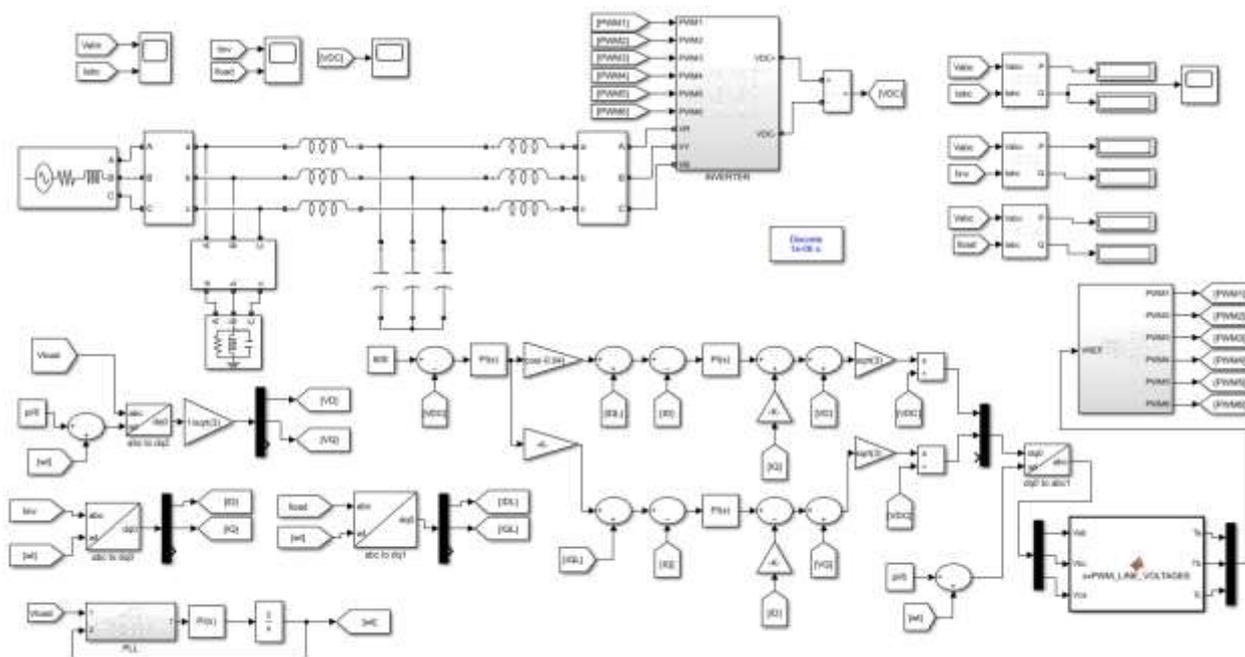


Рис. 1. Система управления СТАТКОМ, использующая преобразования Блонделя для линейных напряжений

При симметричной широтно-импульсной модуляции две скважности из трех для ключей полумостов инвертора равны нормированным линейным напряжениям $\max(|v_{\text{линейное}}|) = 1$ [2],[3],[4]. Здесь и далее маленькими буквами обозначены нормализованные мгновенные значения. Если фаза ωt изображающего вектора напряжения \vec{v} лежит в первом $0 < \omega t < \pi/3$ либо в четвертом $\pi < \omega t < 4\pi/3$ сегменте рис. 2, то скважности T_A, T_C проводимости верхних ключей полумостов равны с точностью до знака нормированному на 1 линейному напряжению. $-1 < T_A < 1$. Нижние ключи полумостов проводят, когда верхние ключи не проводят.

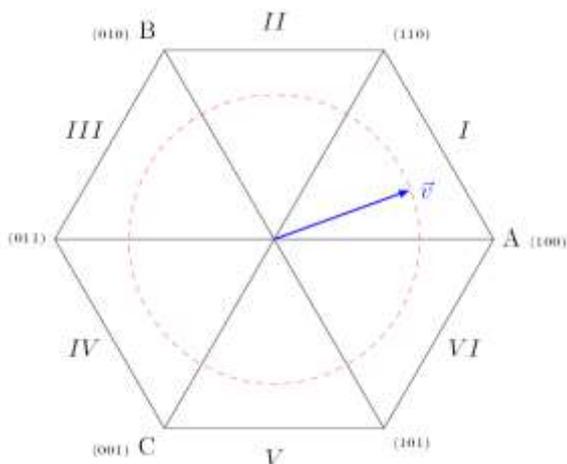


Рис. 2. Изображающий вектор напряжения \vec{v} в инверторе напряжения

$$\begin{aligned} T_A &= v_{AC} \\ T_B &= v_{BC} - v_{AB} \\ T_C &= -v_{AC} \end{aligned}$$

Скважность T_B равна $v_{BC} - v_{AB} = \sqrt{3} \cdot v_B$.

Прямая пропорциональность скважностей T_A, T_B, T_C фазным напряжениям v_A, v_B, v_C наблюдается при синусоидальной модуляции, в этом случае амплитуда вектора фазного напряжения равна $U_D/2$, где U_D – напряжение на стороне постоянного тока.

Наличие на входе измеряемых линейных напряжений и на выходе задания для ключей полумостов пропорциональных линейным напряжениям обуславливает использование преобразований с линейными, а не фазными напряжениями.

III. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ БЛОНДЕЛЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При переходе из вращающейся с частотой ω системы dq в неподвижную стационарную систему с использованием линейных напряжений можно воспользоваться преобразованием [4],[8].

$$\begin{pmatrix} v_{AC} \\ v_{BC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t - \frac{\pi}{6}) & -\sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} \quad (1)$$

Здесь u_{AC} – нормированное линейное напряжение:

$$v_{AC} = \frac{V_{AC}}{U_D}$$

В преобразовании (1) в момент времени $t = 0$ ось q вращающейся системы совпадает с осью линейного напряжения V_{BC} .

Преобразование из стационарной системы линейных напряжений v_{AC} и v_{BC} во вращающуюся систему dq:

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{\pi}{6}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{AC} \\ V_{BC} \end{pmatrix} \quad (2)$$

При моделировании в Matlab воспользуемся преобразованиями Блонделя (3) для фазных величин в сети без нулевого провода [5], [6]:

$$\frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} \quad (3)$$

Формулу (2) можно получить из формулы (3):

$$\begin{aligned} V_d &= \cos(\omega t)V_A + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)V_B + \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)V_C = \\ &= \cos(\omega t)V_A + \left(\cos(\omega t)\cos\frac{2\pi}{3} + \sin(\omega t)\sin\frac{2\pi}{3}\right)V_B + \\ &\left(\cos(\omega t)\cos\frac{2\pi}{3} - \sin(\omega t)\sin\frac{2\pi}{3}\right)V_C = \\ &= \frac{1}{2}\cos\omega t \cdot V_{AC} + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\omega t \cdot V_{BC} + \frac{1}{2}\cos\omega t \cdot V_{AB} = \\ &= \cos\omega t \cdot V_{AC} + \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)V_{BC} \end{aligned}$$

Здесь учтено равенство для линейных напряжений для трехфазных систем без нулевого провода:

$$V_{AB} = V_{AC} - V_{BC}.$$

$$\begin{aligned} V_q &= -\sin(\omega t)V_A - \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)V_B - \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)V_C = \\ &= -\sin(\omega t)V_A - \left(\sin(\omega t)\cos\frac{2\pi}{3} - \cos(\omega t)\sin\frac{2\pi}{3}\right)V_B - \\ &\left(\sin(\omega t)\cos\frac{2\pi}{3} + \cos(\omega t)\sin\frac{2\pi}{3}\right)V_C = \\ &= -\frac{1}{2}\sin\omega t \cdot V_{AC} + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\omega t \cdot V_{BC} - \frac{1}{2}\sin\omega t \cdot V_{AB} = \\ &= -\sin\omega t \cdot V_{AC} + \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)V_{BC} \end{aligned}$$

Обратное преобразование Блонделя для фазных величин

$$\begin{pmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix}$$

Преобразование Блонделя для линейных напряжений получим, заменив $\omega t \Rightarrow \omega t + \frac{\pi}{6}$. В начальный момент времени ось d совмещена с фазой A и имеет начальный угол $\pi/6$ относительно направления линейного напряжения v_{AB} . Преобразование Блонделя для нормированных линейных напряжений:

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\omega t + \frac{\pi}{6}) & \cos(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) & -\sin(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_{AB} \\ v_{BC} \\ v_{CA} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} \quad (4)$$

Преобразование Блонделя (4) использует три нормированных линейных напряжения, в отличие от преобразования (2), которое использует только два линейных напряжения без нормирования.

Обратное преобразование Блонделя для нормированных линейных напряжений:

$$\begin{pmatrix} v_{AB} \\ v_{BC} \\ v_{CA} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t + \frac{\pi}{6}) & -\sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \\ \cos(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix}$$

В Matlab Simulink, чтобы получить из преобразования "abc to dq" преобразование для линейных напряжений, нужно на вход блока вместо фазных напряжений подать линейные напряжения и вместо ωt подать $\omega t + \pi/6$. Для нормировки линейных напряжений умножить результат на $1/\sqrt{3}$.

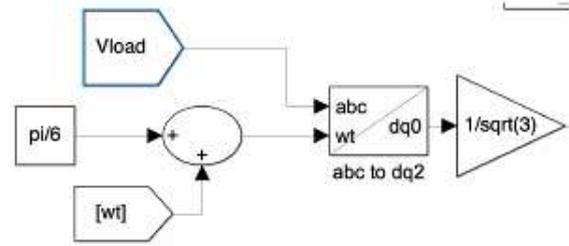


Рис. 3. Преобразование Блонделя при переходе из стационарной системы линейных напряжений к вращающейся системе координат dq

При использовании преобразования "dq to abc" для линейных напряжений вместо ωt подать $\omega t + \frac{\pi}{6}$. На выходе из блока получим нормированные $\max(|v_{\text{линейное}}|) = 1$ линейные напряжения.

Нормированные линейные напряжения подаются на вход блока svpwm:

Содержимое блока svPWM_Line_Voltages представлено на рис 4:

```
function [Ta, Tb, Tc] = svPWM_LINE_VOLTAGES(Vab, Vbc, Vca)
    if ( ( Vab>0 ) == ( Vbc>0 ) ) % sectors 1 and 4
        Ta = - Vca;
        Tb = Vbc-Vab;
        Tc = Vca;
    elseif ( ( Vab<-Vbc ) == ( Vab>0 ) ) % sectors 2 and 5
        Tb = Vbc;
        Ta = Vab - Vca;
        Tc = - Vbc;
    else % sectors 3 and 6
        Tb = - Vab;
        Tc = Vca - Vbc;
        Ta = Vab;
    end
end
```

Рис. 4. Код блока svPWM_Line_Voltages

IV. БЛОК АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Коды блока автоподстройки частоты с использованием линейных напряжений приведены на рис. 5, 6. Параметры PI-регулятора аналогичны исходной модели СТАТКОМ [1]: $P=10$, $I=50000$. Все преобразования, использующие напряжения, производятся с линейными напряжениями. Преобразования, использующие токи, производятся с фазными токами.

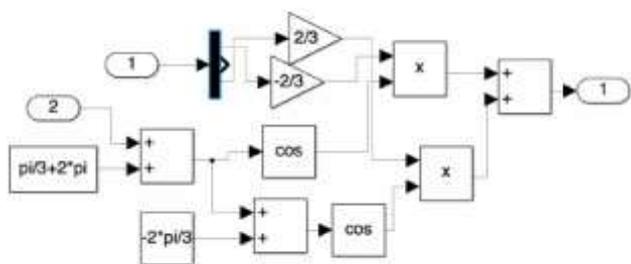


Рис. 5. Код блока PLL

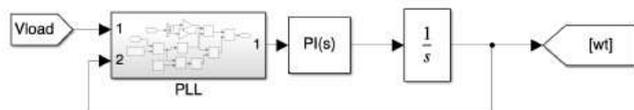


Рис. 6. Полная схема блока PLL

V. ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В сети без нулевого провода известен метод Аарона измерения реактивной мощности с помощью двух ваттметров [7]. Этот метод использует два фазных напряжения. Для их измерения необходимо создать виртуальный «нулевой провод». Возможно использовать два линейных напряжения для измерения реактивной мощности при симметричной нагрузке. Для этого 2 ваттметра подключить, как показано на рис. 7.

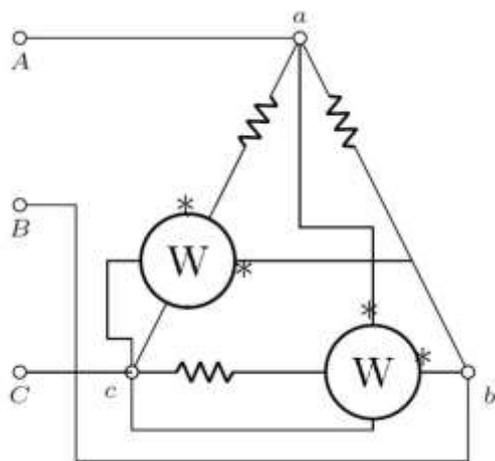


Рис. 7. Схема подключения двух ваттметров для измерения реактивной мощности при симметричной нагрузке с использованием двух линейных напряжений

Реактивная мощность для симметричной нагрузки, выраженная через линейные напряжения (здесь маленькая буква означает мгновенное значение):

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (i^{AC} v^{BC} - i^{BC} v^{AC})$$

При этом используются токи:

$$i^{AC} = i_A - i_C$$

VI. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЛИНЕЙНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, И ПРЕОБРАЗОВАНИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ФАЗНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Все используемые в модели напряжения являются линейными, и преобразования напряжений используют на входе и выходе линейные напряжения. Те алгоритмы, которые используют фазные напряжения, переводят линейные напряжения в фазные, а затем делают обратное преобразование. Алгоритмы, которые работают с линейными напряжениями и не делают преобразований в фазные напряжения и обратно, соответственно будут работать быстрее алгоритмов, которые используют фазные напряжения.

Для сравнения скорости выполнения алгоритмов рассмотрим часть системы управления, генерирующую векторную широтно-импульсную модуляцию. Времена выполнения алгоритмов svpwm в секундах для 30000×65535 циклов для разных углов изображающего вектора на компьютере с частотой 2 ГГц в программе на языке C, компилятор gcc 13.3.0. приведены в табл. I.

ТАБЛИЦА I. ВРЕМЕНА ВЫПОЛНЕНИЯ В СЕКУНДАХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ 30000×65535 ЦИКЛОВ

угол	STM	Our1	Our2	MexBIOS	TI
15°	11.792	6.439	6.898	15.948	12.921
45°	12.670	6.861	7.239	17.079	12.806
75°	12.170	8.165	8.405	16.688	14.243
105°	12.330	8.185	8.502	16.666	14.226
135°	12.887	8.028	9.897	16.824	13.851
165°	11.946	7.594	9.421	16.409	13.804
195°	11.761	6.425	6.858	15.297	12.490
225°	11.740	6.443	6.826	15.336	12.483
255°	11.400	7.653	7.891	16.567	13.985
285°	11.392	7.660	7.919	16.576	13.929
315°	11.969	7.614	9.212	15.408	14.255
345°	12.032	7.600	9.192	15.403	15.127

STM – алгоритм STMicroelectronics; Our1 – алгоритм из статьи [8]; Our2 – алгоритм из блока SVPWM рис. 4; MexBIOS – алгоритм НПФ Мехатроника-Про [11]; TI – алгоритм Texas Instruments [10]

Алгоритмы Our1 и Our2 используют линейные напряжения. Остальные алгоритмы используют фазные напряжения. Из табл. I следует, что алгоритмы, использующие линейные напряжения, выполняются практически в 2 раза быстрее алгоритмов, использующих фазные напряжения.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активная и реактивные мощности в переходном и установившемся режиме при использовании преобразований Blondela для линейных напряжений совпадают с соответствующими значениями

преобразований для фазных напряжений. Преобразование Блонделя для линейных напряжений со следующим за ним блоком `svpwm` для линейных напряжений выполняется практически вдвое быстрее аналогичного набора для фазных напряжений.

Преобразования Блонделя для линейных напряжений совпадают с преобразованиями (1) и (2), полученными при рассмотрении систем управления электрическими машинами в косоугольной системе координат. Преобразования Блонделя требуют три линейных напряжения, в то время как преобразования (1) и (2) требуют два линейных напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ashenafi Tesfaye (2025). Reactive power compensation by using STATCOM <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/135697-reactive-power-compensation-by-using-statcom>, MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 20, 2025.
- [2] Романенко Д.В. Алгоритмы управления компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ // Вторая научно-техническая конференция молодых специалистов электроэнергетики - 2003, Москва, 15-19 сент. 2003 г.: сб. докл. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2003.
- [3] Olorunfemi Ojo. The Generalized Discontinuous PWM Scheme for Three-Phase Voltage Source Inverters // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, No. 6, December 2004, DOI: 10.1109/TIE.2004.837919.
- [4] S. Al Moustafa, B. Ahmed, B.S. Bala, A.V. Domnin, P.N. Primachenko, A.N. Prokshin. Modification of the Space Vector Pulse-Width Modulation Algorithm for a Three-Phase Inverter Using an Oblique Coordinate System, // XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), (2023-05-24) S. 90-93. DOI: 10.1109/SCM58628.2023.10159042
- [5] Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины Л.-М., Госэнергоиздат, 1950. 551 с.
- [6] Алябьев М.И. Теория пространственных векторов описывающих фазные токи в электрических машинах // Труды ВМАКВ им. А.И. Крылова. Вып. XXI, 1959.
- [7] Инж. Скирль В. Измерения мощности переменного тока. Энергетическое изд-во, 1932.
- [8] A.N. Prokshin, Nikolaj I. Tatarintsev, Gennadij A. Karpov, Aleksandr V. Trofimov. Modification of PWM Algorithms in Continuous and Discontinuous Modes for a Three-Phase Inverter in an Oblique Coordinate System // 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). Saint-Petersburg, Russia. DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554156
- [9] STM32 Motor Control Software Development Kit Rev 5 STMicroelectronics, 2019 \url{file:///pwm_curr_fdbk.c}
- [10] The Digital Motor Control Software Library <http://www.ti.com/lit/ug/spru485a/spru485a.pdf>
- [11] iqSVGEN_DQ Генератор пространственного вектора ШИМ https://mechatronica-pro.com/sites/default/files/content/product/35/iqsvgen_dq_rus.pdf