



УДК 621.3

## МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДЛЯ ДВУХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### MODEL OF FREQUENCY CONVERTER WITH SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION FOR TWO-PHASE ELECTRIC DRIVE

**Белоусов Алексей Сергеевич**студент,  
Липецкий государственный технический университет**Мещеряков Виктор Николаевич**доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой электропривода,  
Липецкий государственный технический университет  
011bas962@gmail.com**Belousov Aleksei Sergeevich**Student,  
Lipetsk State Technical University**Meshcheryakov Victor Nikolayevich**Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the electric drive department,  
Lipetsk State Technical University  
011bas962@gmail.com

**Аннотация.** Данная статья посвящена разработке модели пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ПВШИМ) двухфазного электропривода в программной среде Matlab Simulink. Структура данной модели основана на устройстве стандартного блока ПВШИМ преобразователя частоты для трехфазного двигателя из библиотеки SimPowerSystem, но предназначена для трехплечевого инвертора двухфазного преобразователя частоты.

**Ключевые слова:** пространственно-векторная широтно-импульсная модуляция, двухфазный электропривод, Matlab Simulink, трехплечевой инвертор.

**Annotation.** This article is devoted to the development of the model of frequency converter with Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) for two-phase electric drive at the program Matlab Simulink. The model structure is based on conformation of standard block SVPWM of frequency converter for three-phase motor from SimPowerSystem library, but this model is designed for three-leg inverter in two-phase frequency converter.

**Keywords:** Space Vector Pulse Width Modulation, two-phase electric drive, Matlab Simulink, three-leg inverter.

Двухфазный асинхронный электродвигатель по сравнению с привычным трехфазным имеет одно яркое достоинство: способность запускаться под повышенной нагрузкой и поддерживать постоянный момент на низких скоростях [1]. Такое свойство может найти применение в тяжелой, например, транспортной, нефтегазовой или горнодобывающей промышленности [2], в тяговых электроприводах. Но данный вид двигателей мало изучен и не выпускается в промышленных масштабах. Одной из причин этого является сложность реализации преобразователей частоты, преобразующих трехфазную сеть в регулируемую двухфазную.

В настоящее время двухфазную сеть создают из двух однофазных, включенных по схеме Скотта, при этом по сравнению с трехфазной сетью увеличивается количество проводов и вспомогательного оборудования. Другой способ подключения двухфазного двигателя к промышленной сети заключается в смещении фаз относительно друг друга с помощью конденсатора, то есть, по сути использовании однофазного двигателя со вспомогательной обмоткой с конденсаторным пуском [1]. Но в этом случае привод предстает нерегулируемым и подходит для маломощных бытовых приборов, где активно используется.

Проектирование двухфазных преобразователей частоты и их систем управления начало развиваться с 1990-х гг. Основные тенденции описаны в [3]: разработка систем ШИМ, с прямым управлением моментом, независимых преобразователей частоты. Ранее автором были опубликованы работы, затрагивающие системы управления двухфазным преобразователем с релейным регулятором тока [4].

Самым популярным направлением является разработка и совершенствование системы управления с ПВШИМ, однако структура модели данной системы в Matlab Simulink в подобных статьях не расписывается. Цель данной работы – разработка модели преобразователя частоты с ПВШИМ для двухфазного двигателя, относительно которой можно осуществлять описанные усовершенствования и разрабатывать новые алгоритмы управления.

Отличие ПВШИМ заключается в том, что модуляции вычисляются не мгновенные значения напряжений, прикладываемые в данный момент к обмоткам, а моменты подключения обмоток к звену постоянного тока с целью формирования вектора напряжения. Для трехфазного электропривода возможны восемь таких векторов, шесть из которых образуют равносторонний шестиугольник, а два – нулевые. Каждый вектор напряжения реализуется собственной комбинацией ключей инвертора. Для двухфазного электропривода с трехплечевым инвертором шестиугольник ненулевых векторов напряжения перестает быть равносторонним и принимает форму, показанную в [5].



Система управления с ПВШИМ должна определять текущий сектор шестиугольника векторов и рассчитывать время приложения напряжения к каждой обмотке в каждом из секторов. В рассчитанный момент времени, в зависимости от текущего сектора должна подаваться определенная комбинация импульсов на ключи инвертора, наводящая соответствующий вектор напряжения.

Разработка модель ПВШИМ двухфазного электропривода осуществлялась на основе структуры блока SVPWM Generator библиотеки SimPowerSystem, реализующего ПВШИМ трехфазной системы, но в связи с изменением числа обмоток и неравенством углов секторов векторного шестиугольника внутренние подсистемы были изменены. Структура модели ПВШИМ и блока Amendment представлены на рисунке 1.

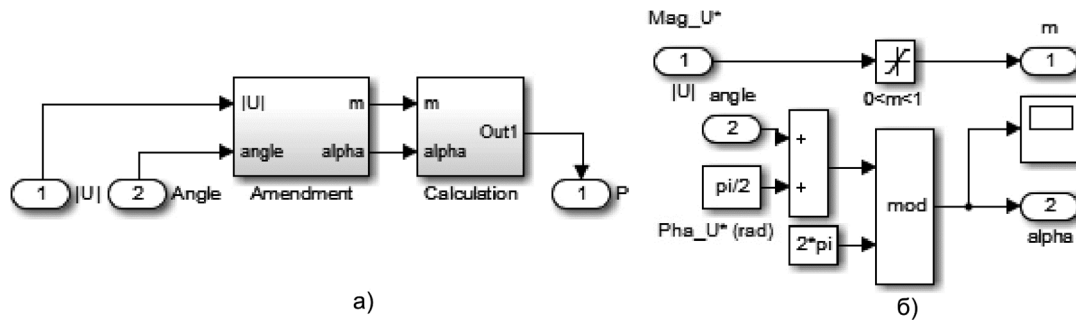


Рисунок 1 – Структуры блока ПВШИМ (а), подсистемы Amendment (б)

На вход ПВШИМ подаются модуль действующего напряжения и угол его отклонения от горизонтальной оси системы неподвижных координат  $\alpha\beta$ . Так как в Matlab оси  $\alpha\beta$  связаны с токами, а не с напряжениями, то к углу прибавляется  $90^\circ$ , что согласует системы отсчета.

Блок остатка от целочисленного деления mod обеспечивает обнуление угла при совершении вектором напряжения полного оборота. Структура подсистемы Calculation представлена на рисунке 2.

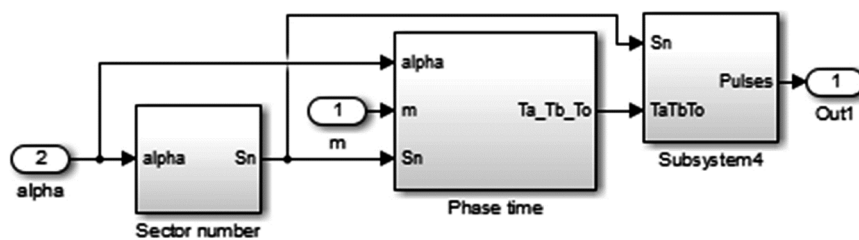


Рисунок 2 – Структура подсистемы Calculation

Каждая подсистема последовательно реализует определение текущего сектора (Sector number), расчет времени приложения векторов напряжений каждой фазы и нулевого вектора (Phase time), синтез управляющих импульсов в зависимости от сектора и требуемого вектора (Subsystem4). В «Sector number» угол сравнивается с верхней границей каждого сектора, при переходе в следующий сектор текущий номер увеличивается на единицу (рис. 3). В модели ПВШИМ трехфазной системы данный блок был устроен проще за счет равенства величин углов каждого сектора. Номер сектора подается на входы следующих подсистем.

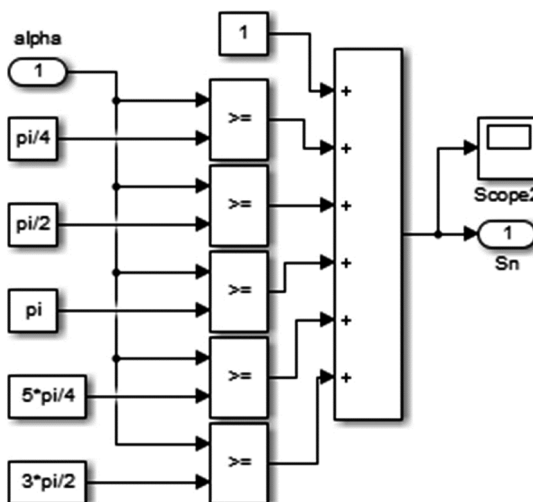


Рисунок 3 – Структура подсистемы Sector number



Длительность времени приложения векторов напряжений для трехфазной и для двухфазной систем определяется по-разному. В [6] приводится таблица 1 и формулы определения этого времени.

**Таблица 1** – Секторы шестиугольника векторов напряжения

Sector	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	θ <sub>1</sub>	θ <sub>2</sub>
1	U <sub>100</sub>	U <sub>101</sub>	1	√2	0	45
2	U <sub>001</sub>	U <sub>101</sub>	1	√2	90	45
3	U <sub>001</sub>	U <sub>011</sub>	1	1	90	180
4	U <sub>010</sub>	U <sub>011</sub>	√2	1	225	180
5	U <sub>010</sub>	U <sub>110</sub>	√2	1	225	270
6	U <sub>100</sub>	U <sub>110</sub>	1	1	0	270

Данная таблица описывает комбинации ключей для реализации требуемых векторов в каждом секторе, отношение величин подаваемых напряжений и углы начала и конца сектора. Формулы расчета времени:

$$T_1 = T_s \cdot \frac{V}{V_1} \cdot \frac{\sin(\theta_2 - \theta)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)};$$

$$T_2 = T_s \cdot \frac{V}{V_2} \cdot \frac{\sin(\theta - \theta_1)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}, \tag{1}$$

где  $T_1, T_2$  – длительности времени приложения первого и второго векторов напряжения;  $V$  – модуль напряжения;  $V_1, V_2$  – поправочные коэффициенты напряжения;  $\theta$  – текущий угол вектора напряжения;  $\theta_1, \theta_2$  – углы начальной и конечной границ текущего сектора.

Получаем переменные  $T_1, T_2$  для каждого сектора.

Первый сектор:  $T_1 = T_s \cdot V \cdot (\cos\theta - \sin\theta)$ ,  $T_2 = T_s \cdot V \cdot \sin\theta$ .

Второй сектор:  $T_1 = -T_s \cdot V \cdot (\cos\theta - \sin\theta)$ ,  $T_2 = T_s \cdot V \cdot \cos\theta$ .

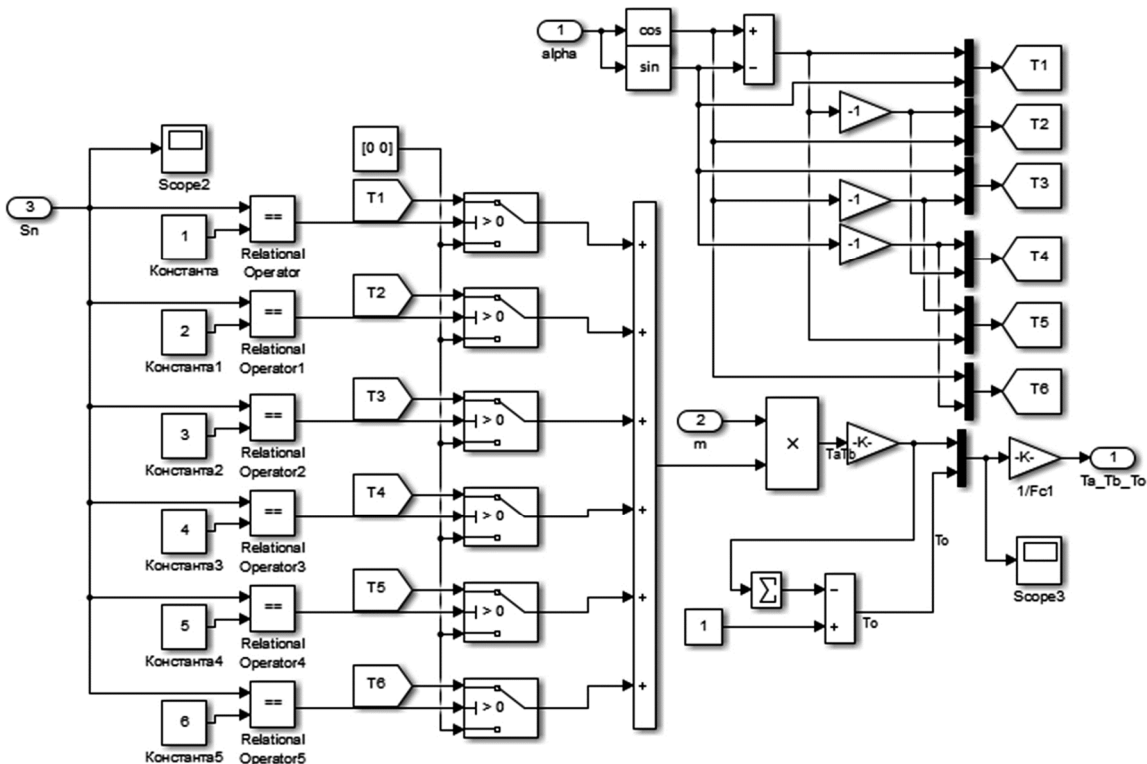
Третий сектор:  $T_1 = T_s \cdot V \cdot \sin\theta$ ,  $T_2 = -T_s \cdot V \cdot \cos\theta$ .

Четвертый сектор:  $T_1 = -T_s \cdot V \cdot \sin\theta$ ,  $T_2 = -T_s \cdot V \cdot (\cos\theta - \sin\theta)$ .

Пятый сектор:  $T_1 = -T_s \cdot V \cdot \cos\theta$ ,  $T_2 = T_s \cdot V \cdot (\cos\theta - \sin\theta)$ .

Шестой сектор:  $T_1 = T_s \cdot V \cdot \cos\theta$ ,  $T_2 = -T_s \cdot V \cdot \sin\theta$ .

На основе рассчитанных величин была составлена подсистема Phase time расчета величин времени, представленная на рисунке 4.



**Рисунок 4** – Подсистема Phase time



В зависимости от номера текущего сектора один из двухпозиционных переключателей пересылает рассчитанные значения величин  $T_1, T_2$ , а остальные – нули. Затем эти значения умножаются на действующее напряжение, и определяется время действия нулевого вектора  $T_0 = 1 - (T_1 + T_2)$ . Временные величины делятся на опорную частоту (4 кГц) и пересылаются в следующую систему. Подсистема (Subsystem4) расчета импульсов представлена на рисунке 5.

На основе сигналов  $T_1, T_2, T_0$  определяются границы участков за один период ШИМ, что представлено в подсистеме Timing (рис. 6, а). Опорный пилообразный сигнал сравнивается с таймингом (рис. 6, б), в результате чего определяется номер участка.

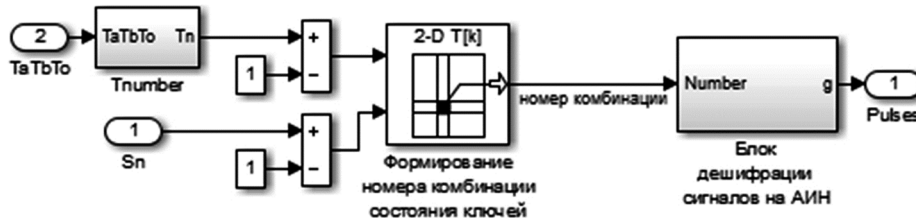


Рисунок 5 – Структура подсистемы Subsystem4

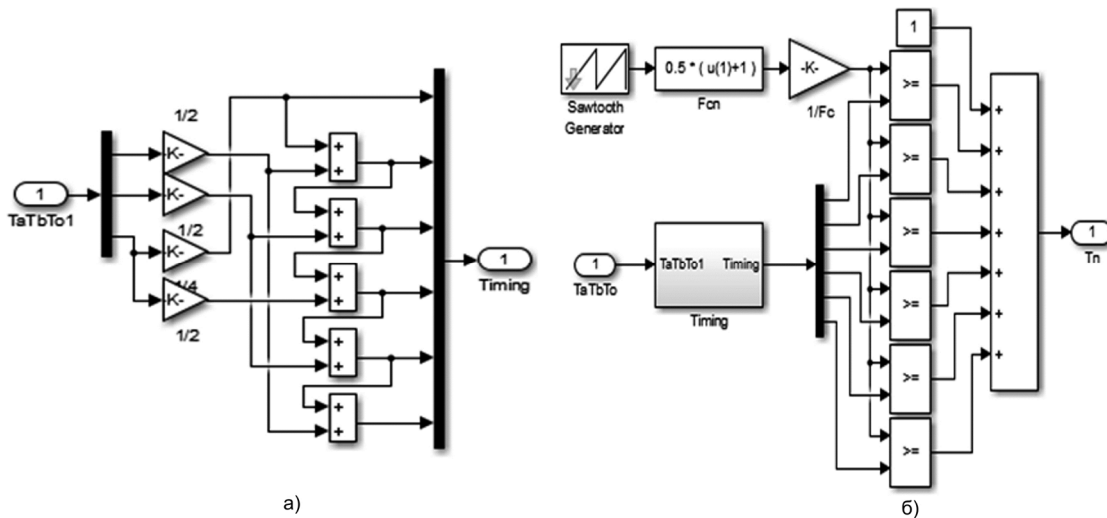


Рисунок 6 – Структура блока Timing одного периода ШИМ (а), структура блока Tnumber

На основе номеров секторов и номеров участков одного периода в блоке 2-D (рис. 5) определяется номер комбинации состояния ключей. Возможны 8 комбинаций, которые дешифрации сигналов (рис. 7) преобразуются в управляющие импульсы инвертора.

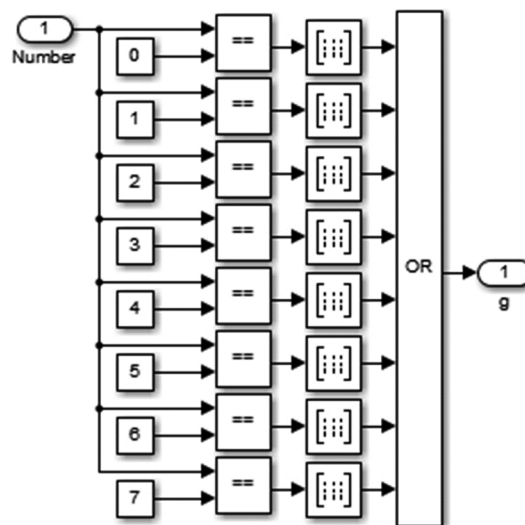


Рисунок 7 – Структура блока дешифрации сигналов инвертора



Модель двухфазного электропривода с ПВШИМ представлена на рисунке 8. При моделировании были получены графики токов и напряжений (рис. 9) и скорости с моментом (рис. 10).

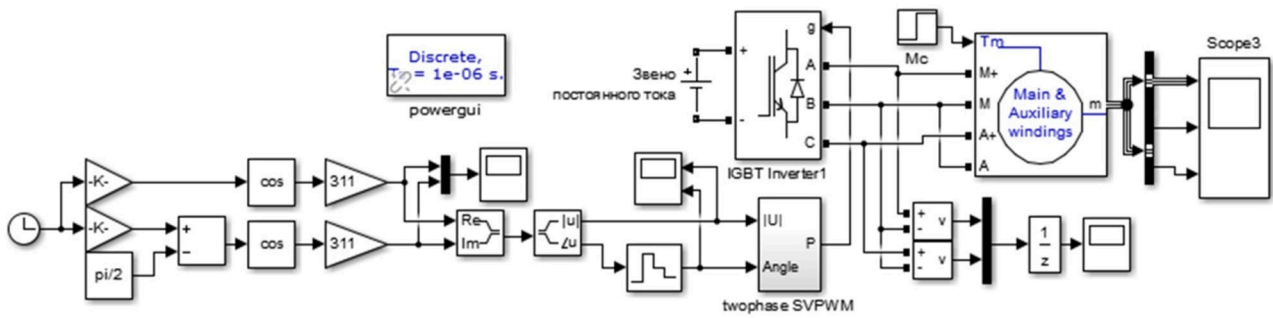


Рисунок 8 – Модель двухфазного электропривода с ПВШИМ

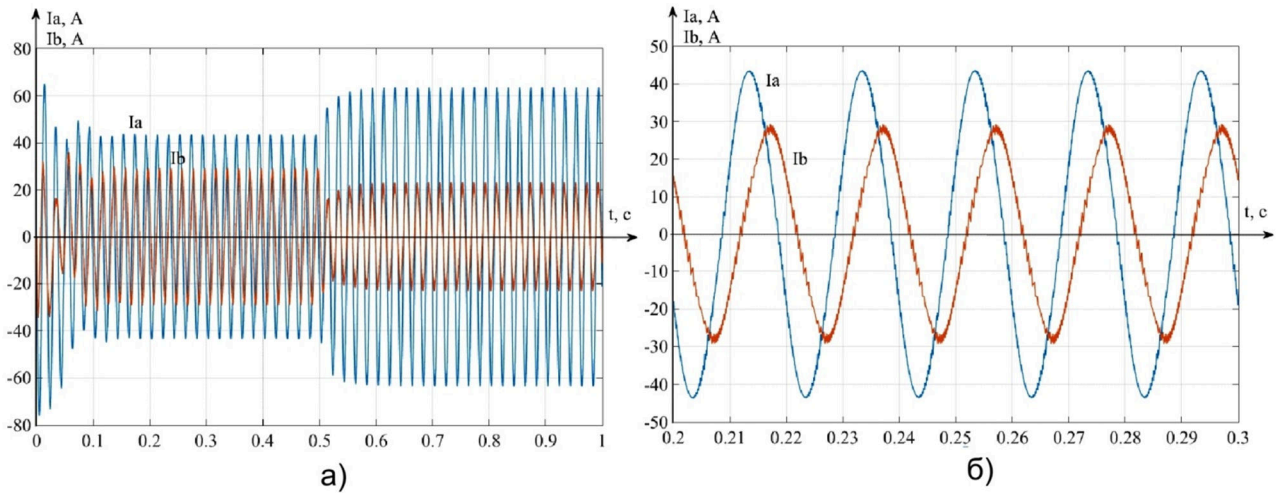


Рисунок 9 – Токи двухфазного электропривода с системой управления с ПВШИМ (а), токи подробно (б)

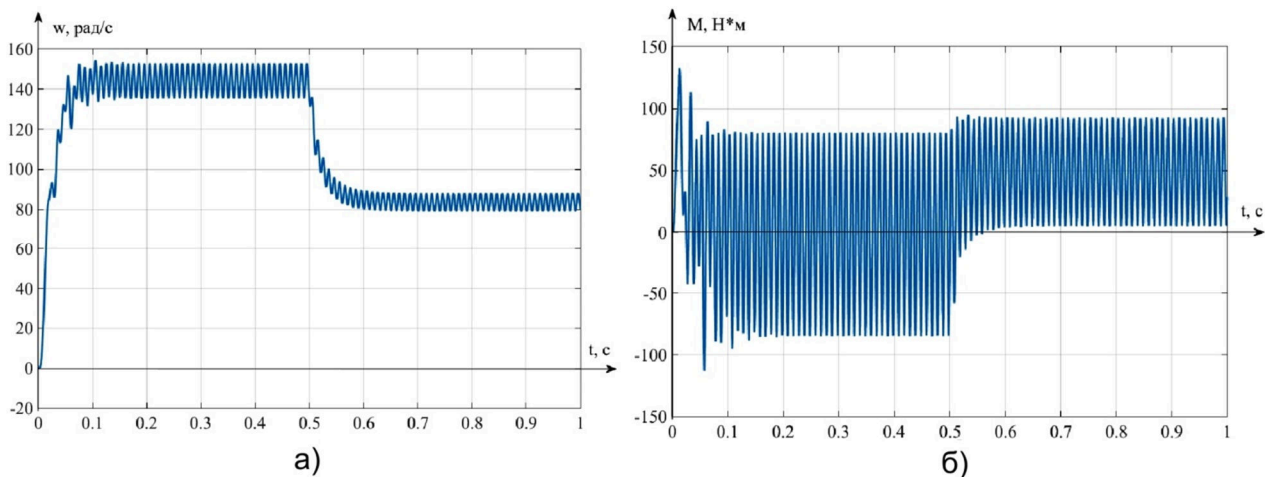


Рисунок 10 – Скорость двухфазного электропривода с ПВШИМ (а), электромагнитный момент (б)

Форма токов при пространственно-векторной ШИМ практически совпадает с идеальной синусоидальной, но сдвиг фаз составляет  $85^\circ$ , а не  $90^\circ$ , при приложении нагрузки фазы токов совпадают. В данной модели двухфазный электропривод выполняет свое основное достоинство – поддерживает нагрузку, значительно большую номинальной. Двигатель быстро разгоняется, однако скорость и момента имеют значительные колебания. Исправить этот недостаток возможно путем корректировки момента во внешнем контуре скорости. В данной же работе для упрощения моделирования электропривод был выполнен нерегулируемым и управлялся по заданию напряжения.

Модель самой ПВШИМ можно считать удовлетворительной, так как основная цель – наведение двухфазного тока на выходе инвертора в составе преобразователя частоты была выполнена. Модель



подходит для дальнейших исследований двухфазного электропривода, описанных в [5], [6], и разработки новых систем управления. А усовершенствованная система управления двухфазным электроприводом, в свою очередь, найдет применение в тяжелой промышленности.

#### Литература:

1. Blalock T.J. The first polyphase system: a look back at two-phase power for AC distribution // IEEE Power and Energy Magazine. – 2004. – V. 2. – № 2. – С. 63–66.
2. Беспалов В.Я., Качалина Е.В. Сравнительные характеристики асинхронных двигателей с трехфазными и двухфазными обмотками для частотно-регулируемого электропривода // Электричество. – 2010. – № 7. – С. 45–48.
3. Белоусов А.С. Анализ исследования систем управления двухфазным электроприводом // Актуальные вопросы взаимодействия образования, науки и бизнеса: сборник статей Международной научно-практической конференции. – М. : Импульс, 2018. – С. 399–404.
4. Белоусов А.С., Кокорев А.В., Муравьев А.А. Алгоритм управления инвертором двухфазного тока // Современные сложные системы управления: HTCS'2017 Материалы XII междунар. науч.-практ. конф., 25–27 октября 2017 г. В 2 ч. Ч. 2. – Липецк : Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2017. – С. 91–96.
5. Jang D.H. PWM methods for two-phase inverters // IEEE industry Applications magazine. – 2007. – V. 13. – № 2. – С. 50–61.
6. Martins D.C. et al. Drive for a symmetrical two-phase induction machine using vector modulation // IEEEJ Transactions on Industry Applications. – 2006. – V. 126. – № 7. – С. 835–840.

#### References:

1. Blalock T.J. The first polyphase system: a look back at two-phase power for AC distribution // IEEE Power and Energy Magazine. – 2004. – V. 2. – № 2. – С. 63–66.
2. Bepalov V.Ya., Kachalina E.V. Comparative characteristics of asynchronous engines with three-phase and two-phase windings for the frequency and adjustable electric drive // Electricity. – 2010. – № 7. – P. 45–48.
3. Belousov A.S. Analysis of a research of control systems of the two-phase electric drive // Topical issues of interaction of education, science and business: collection of articles of the International scientific and practical conference. – M. : Impulse, 2018. – P. 399–404.
4. Belousov A.S., Kokorev AV., Muraviev A.A. Control algorithm of the inverter of two-phase current // Modern difficult control systems: HTCS'2017 Materials XII of the international scientific and practical conference, on October 25–27, 2017. In 2 part. P. 2. – Lipetsk : Publishing house of the Lipetsk state technical university, 2017. – P. 91–96.
5. Jang D.H. PWM methods for two-phase inverters // IEEE industry Applications magazine. – 2007. – V. 13. – № 2. – С. 50–61.
6. Martins D.C. et al. Drive for a symmetrical two-phase induction machine using vector modulation // IEEEJ Transactions on Industry Applications. – 2006. – V. 126. – № 7. – С. 835–840.