

ния ФКУ и увеличивает уровень заряда конденсаторов. В дальнейшем, при прекращении импульсов, за счет достаточно большого напряжения на конденсаторах, происходит принудительное прерывание тока якоря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об электромагнитной совместимости тиристорных электроприводов экскаватора ЭКГ-10 с питающей сетью /

А.Я. Микитченко, А.Н. Шевченко, Д.Р. Шевченко, Э.Л. Греков, С.И. Филимонов // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: всерос. науч.-технич. конф. (Оренбург, сентябрь 2010г.). Оренбург: изд-во ОГУ, 2010. С.238-243.

2. Греков Э.Л., Шевченко А.Н., Филимонов С.И Исследование методов управления экскаваторным фильтрокомпенсирующим устройством // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. №1. С.196-203.

INFORMATION IN ENGLISH

EFFECT OF FILTER-COMPENSATING DEVICES ON EMERGENCY MODES OF THYRISTOR CONVERTER IN MINING ELECTRICAL EXCAVATORS

Grekov E.L., Filimonov S.I.

The article describes processes taking place in the system thyristor converter – DC motor during power supply disconnection. It is shown that the presence of filter-compensating devices leads to the interruption of armature current in the inverter mode of work. Extending of gate impulses generating after power supply disconnection increases the voltage on the capacitors and improves forced commutation.

**Keywords:** electric drive, mining excavator, «thyristor converter – motor» system.

REFERENCES

1. Mikitchenko A.Ya., Shevchenko A.N., Shevchenko D.R., Grekov E.L., Filimonov S.I. Ob elektromagnitnoi

sovmestimosti tiristornyh elektroprivodov ekskavatora EKG-10 s pitayuschei setyu [Electromagnetic compatibility of EKG-10 excavator thyristor electric drives with power supply line]. *Energetika: sostoyanie, problem, perspektivi* [Power engineering: state, problems, development prospects]. All-Russia scientific and technical conference. (Orenburg, September 2010), Orenburg: Publishing house of OGU, 2010, pp. 238-243.

2. Grekov E.N., Shevchenko A.N., Filimonov S.I. Issledovaniye metodov upravleniya ekskavatornym filtrokompensiruyuschim ustroystvom [Methods of excavator filter-compensating device control]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova* [Bulletin of Shukhov BGTU], 2014, no.1, pp.196-203.

УДК 621.313.3

Лицин К.В., Басков С.Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ ПРИ ВЕКТОРНО-ИМПУЛЬСНОМ ПУСКЕ ДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В данной статье рассматривается модель двухтрансформаторной схемы, которая может быть использована в устройствах векторно-импульсного пуска электродвигателей переменного тока. Представлена схема реального объекта. Рассмотрена модель, созданная в программе *Simulink*. Произведен расчет параметров промежуточных трансформаторов. Осуществлен анализ адекватности разработанной модели. Подведены выводы по работе, согласно которым не наблюдается фазового сдвига между синусоидами фазного напряжения, полученными в результате проведения эксперимента и на модели. При этом максимальное расхождение между значениями в один и тот же момент времени составляет 4,7%. В итоге, разработанная модель отражает все свойства реального объекта и может быть использована для модели системы векторно-импульсного пуска электродвигателя.

**Ключевые слова:** векторно-импульсный пуск, промежуточный трансформатор, модель, частота модуляции.

ВВЕДЕНИЕ

Для удешевления схемы векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя за счет уменьшения стоимости полупроводниковых компонентов возможно использование трансформатора, который так же позволит добиться экономии электроэнергии, увеличения срока службы электродвигателя и приводного механизма за счет оптимизации его работы в широком диапазоне изменения нагрузок и увеличения срока службы пускозащитной аппаратуры [1].

В случае векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя трансформатор выступает как промежуточное звено между ним и сетью, поэтому необходимо провести исследование его поведения при несинусоидальном воздействии, возникающем из-за наличия в схеме *IGBT* транзистора [2].

В связи со спецификой задачи использования трансформатора в схеме векторно-импульсного пуска необходимо рассмотреть потери, вызываемые несинусоидальным напряжением, которые окажут влияние на снижение общего КПД системы пуска.

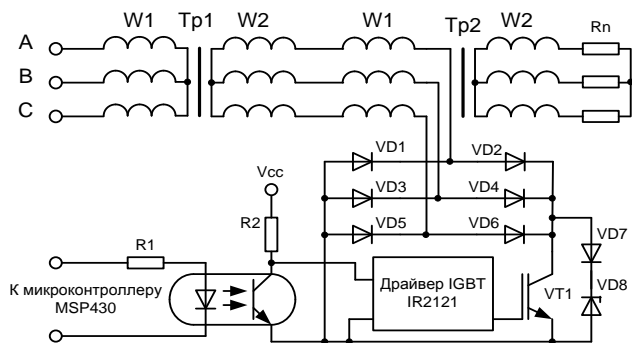
Преимущества двухтрансформаторной схемы заключаются в следующем [3]:

- низкая цена в сравнении с высоковольтными ПЧ;
- трансформаторы могут находиться на расстоянии от ПЧ;
- гальваническая изоляция системы благодаря наличию трансформаторов;
- предельная гибкость в выборе напряжения питания двигателя;
- возможность использования недорогих ключей на *IGBT* транзисторах с максимальным напряжением кол-

лктор-эмиттер 600-1200 В для коммутации высоковольтных двигателей с номинальным напряжением статора 6-10 кВ [4].

Целью данной статьи является создание модели двухтрансформаторной схемы в программе *Simulink* и сравнение результатов моделирования с данными, полученными на физической модели.

В статье [5] анализируется схема, представленная на **рис. 1**.

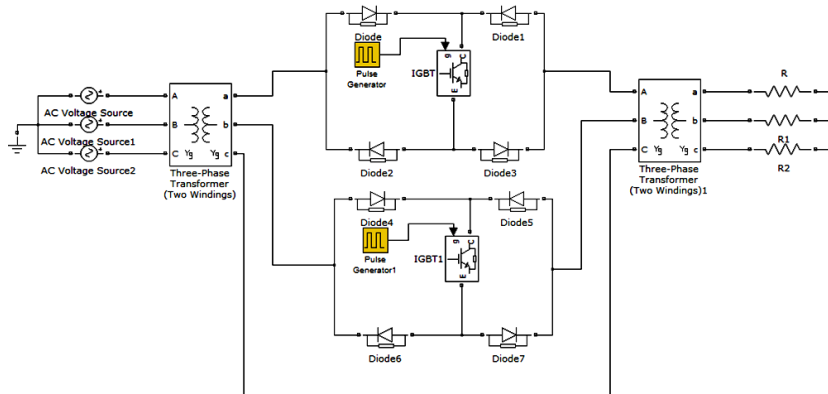


**Рис. 1.** Двухтрансформаторная схема

Исследуемая схема содержит в себе:

- два трехфазных трансформатора (понижающий и повышающий) ТСЗИ-1,6 380-220/220-127 В;
- диодный мост на основе диодов *HFA15TB60*;
- *IGBT*-транзистор *BUP-213*;
- микроконтроллер *MSP 430* для формирования последовательности прямоугольных импульсов разной частоты.

На **рис. 2** представлена аналогичная схема, собранная в программе *Matlab Simulink*.



**Рис. 2.** Модель двухтрансформаторной схемы в программе *Matlab Simulink*

Проведем расчет необходимых параметров модели трехфазного трансформатора (Three-Phase Transformer) согласно [6]. Для расчета воспользуемся паспортными данными трансформатора, представленными в **табл.**

**Паспортные данные трансформатора**

Тип трансформатора	$S_H$ , кВА	$U_{K3}$ , %	$P_{K3}$ , Вт	$P_0$ , Вт	$I_0$ , %
ТСЗИ-1,6 380-220/220-127 В	1,6	4,5	65	25	7

Полное базовое сопротивление

$$Z_B = U_{IH}^2 / S_H ; \quad (1)$$

$$Z_B = 380^2 / 1600 = 90,25 \text{ Ом.}$$

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора

$$I_H = S_H / U_{IH} ; \quad (2)$$

$$I_{IH} = 1600 / 380 = 4,21 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности при коротком замыкании

$$\cos \varphi_K = P_{K3} / (U_{K3} \cdot I_{IH}) . \quad (3)$$

Учитывая, что

$$U_{K3} = (U_{K3}(\%) \cdot U_{IH}) / 100 , \quad (4)$$

из (3) и (4) следует

$$\cos \varphi_K = 65 / (17,1 \cdot 4,21) = 0,9 .$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_{K3} = U_{K3} / I_{IH} . \quad (5)$$

Согласно (5)

$$Z_{K3} = 17,1 / 4,21 = 3,66 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_{K3} = Z_{K3} \cdot \cos \varphi_R . \quad (6)$$

Из (6) имеем

$$r_{K3} = 4,06 \cdot 0,9 = 3,67 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания

$$x_{K3} = Z_{K3} \cdot \sin \varphi_R . \quad (7)$$

Подставляя значения в (7), получим

$$x_{K3} = 4,06 \cdot 0,43 = 1,75 \text{ Ом.}$$

Относительное сопротивление первичной и вторичной обмоток

$$R_1 (pu) = R_2 (pu) = \frac{r_{K3}}{2 \cdot Z_B} . \quad (8)$$

Согласно (7)

$$R_1 (pu) = R_2 (pu) = \frac{3,67}{2 \cdot 90,25} = 0,02 \text{ Ом.}$$

Относительные индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток

$$L_1 (pu) = L_2 (pu) = \frac{x_{K3}}{2 \cdot Z_B} . \quad (9)$$

Согласно (9)

$$L_1 (pu) = L_2 (pu) = \frac{1,75}{2 \cdot 90,25} = 0,0097 \text{ Гн.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (U_{1H} \cdot I_0). \quad (10)$$

Ток холостого хода

$$I_0 = \frac{I_0(\%) \cdot I_{1H}}{100}. \quad (11)$$

Тогда на основе (10) и (11)

$$\cos \varphi_0 = \frac{25}{380 \cdot 0,29} = 0,22.$$

Полное сопротивление холостого хода

$$z_0 = U_{1H} / I_0. \quad (12)$$

Подставляя данные в (12)

$$z_0 = 380 / 0,29 = 1289,29 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление холостого хода

$$r_0 = z_0 / \cos \varphi_0. \quad (13)$$

Из (13)

$$r_0 = 1289,29 / 0,22 = 5776 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление холостого хода

$$x_0 = z_0 / \sin \varphi_0. \quad (14)$$

Тогда из (14)

$$x_0 = 1289,29 / 0,97 = 1322,66 \text{ Ом.}$$

Относительное сопротивление ветви намагничивания

$$R(pu) = r_0 / Z_B. \quad (15)$$

Согласно (15)

$$R(pu) = 5776 / 90,25 = 64 \text{ Ом.}$$

Относительная индуктивность ветви намагничивания

$$L(pu) = x_0 / Z_B. \quad (16)$$

Из (16)

$$L(pu) = 1322,66 / 90,25 = 14,66 \text{ Гн.}$$

Произведем сравнение результатов, осуществив анализ напряжения на вторичной обмотке повышающего трансформатора при подаче на базу IGBT частоты 4000 Гц. Обоснованность выбора данной частоты представлена в [5]. Полученный результат приведен на **рис. 3**.

Из **рис. 3** очевидно, что не наблюдается фазового сдвига между синусоидами фазного напряжения, полученными в результате проведения эксперимента и на модели. При этом максимальное расхождение между значениями в один и тот же момент времени составляет 4,7%.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, результаты исследования позволяют заключить, что разработанная модель двухтрансформаторной схемы в программе *Simulink Matlab* адекватна поведению реальной двухтрансформаторной схемы и может быть использована при моделировании системы векторно-импульсного пуска синхронного двигателя.

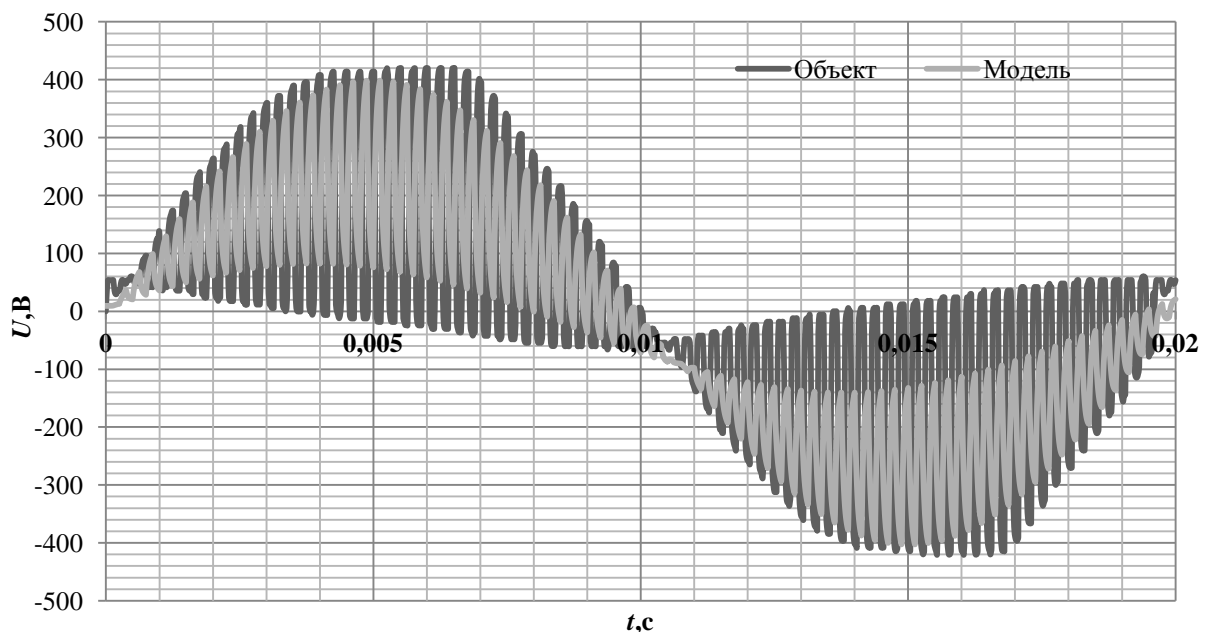


Рис. 3. Графики напряжения на вторичной обмотке повышающего трансформатора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Univolts. Режим доступа: <http://univolts.ru/trademap/electric/invertors/highvoltage/2trans>.
2. Басков С.Н., Лицин К.В. Принцип векторно-импульсного управления электродвигателями переменного тока // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Сер. «Энергетика». 2013. Т.13. №1. С. 92-95.
3. Вечеркин М.В., Петушков М.Ю., Сарваров А.С. Возможности трансформаторно-тиристорной структуры как пускового устройства высоковольтных асинхронных двигателей // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 1. С. 88-91.
4. Исследование положения вектора потокоцепления ротора при векторно-импульсном пуске / С.Н. Басков, К.В. Лицин, А.С. Коньков, Т.В. Черкас // Вестник Южно-

- уральского государственного университета. Сер. «Энергетика». 2012. Вып.18. №37(296). С. 68-72.
5. Басков С.Н., Лицин К.В., Хайлова И.А. Определение потерь в промежуточном трансформаторе при векторно-импульсном пуске двигателей переменного тока // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 77-81.
6. Герман-Галкин С.Г. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.:КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
7. Бурдасов Б.К., Нестеров С.А. Многоуровневые и каскадные преобразователи частоты для высоковольтных электроприводов переменного тока // ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева». Саранск, 2009. 10 с.

INFORMATION IN ENGLISH

MODELING OF SCHEMES WITH INTERMEDIATE TRANSFORMERS FOR VECTOR-PULSE START OF HIGH VOLTAGE AC MOTORS

Litsin K.V., Baskov S.N.

We consider a model of two-transformer circuit, which can be used in devices of vector pulse-start for AC motors. The scheme of the real object is presented. The model created in Simulink is considered. The intermediate transformer parameters were calculated. The adequacy analysis of the developed model was carried out. It was concluded that there was no phase shift between the phase voltage sine curves obtained as a result of the experiment and the developed model. The maximum difference between the values at the same time is 4.7%. As a result, the developed model reflects all the properties of the real object and can be used to model the system in vector pulse-start electric motors.

**Keywords:** vector-pulse start, intermediate transformer, model, frequency modulation.

REFERENCES

1. Univolts. Mode of access: <http://univolts.ru/trademap/electric/invertors/highvoltage/2trans>.
2. Baskov S.N., Litsin K.V. Printsip vektorno-impulsnogo upravleniya electrodvigatelyami peremennogo toka [Vector-pulse principle of AC motors control *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetica* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»], 2013, vol. 13. no. 1, pp. 92-95.
3. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Petushkov M.Ju.

Vozmozhnosti transformatorno-tiristornoj struktury kak puskovogo ustrojstva vysokovoltnyh asinhronnyh dvigatelej [Opportunities of transformer-thyristor structure as the starter for high-voltage induction motors]. *Vestnik IGEU* [Bulletin of ISPU], 2013, no.1, pp. 88-91.

4. Baskov S.N., Konkov A.S., Cherkas T.V., Litsin K.V. Issledovanie polozhenija vektora potokoscepleniya rotora pri vektorno-impulsnom puske [Study of rotor flux linkage vector in vector-pulse start]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetica* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»], 2012, vol. 18, no. 37, pp. 68-72.

5. Litsin K.V., Baskov S.N., Khailova I.A. Opredelenie poter v promezhutochnom transformatore pri vektorno-impulsnom puske dvigatelej peremennogo toka [Determination of losses in intermediate transformer with vector-pulse starting of AC motors]. *Mashinostroenie* [Electronic Journal «Engineering»], 2014, no. 1, pp.77-81.

6. German-Galkin S.G. *Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK* [Design of mechatronic systems on PC]. Saint Petersburg: KORONA-Vek, 2008. 368 p.

7. Burdasov B.K., Nesterov S.A. *Mnogourovnevye i kaskadnye preobrazovateli chastoty dlya vysokovoltnyh elektroprivodov peremennogo toka* [Stacked and cascading converters for high-voltage AC drives]. Mordovia State University, 2009, 10 p.