

## Направления разработки эффективной системы управления электроприводом насосной станции

Н.О. Иванов<sup>1</sup>, Е.Ю. Пузина<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉lena-rus05@mail.ru

### Резюме

В системах электроснабжения потребителей постоянного тока достаточно часто используются выпрямительные установки. При этом могут возникать такие проблемы, как увеличенное сечение токоведущих частей в случае отсутствия стабилизации напряжения, искажение качества электрической энергии, сопровождающееся дополнительными ее потерями из-за появления высших гармоник. Также следует учитывать, что современные двигатели постоянного тока остро реагируют на искажение формы кривой питающего напряжения. Актуальной задачей является разработка выпрямительного устройства, которое способно подвести к электроприемникам электрическую энергию необходимого качества при соблюдении требований по надежности работы электрооборудования. В статье предложено использовать для управления электроприводом постоянного тока трехконтурную систему регулирования, включающую датчики положения ротора. Сигналы, снимаемые с указанного датчика, непосредственно поступают в систему управления данных двигателей. При этом основным предложенным техническим решением является регулируемое выпрямительное устройство на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем. С целью исследования процессов, происходящих в устройстве, рекомендовано применение метода математического моделирования с уравнениями, составленными на основе теории электрических цепей с взаимной индуктивностью. Произведен расчет переходных процессов, происходящих при коммутации нагрузки и при различных видах несимметрии питающего напряжения. Полученные результаты расчета подтвердили эффективность использования трансформатора с вращающимся магнитным полем и датчика положения ротора для создания рабочей системы управления электроприводом постоянного тока.

### Ключевые слова

цифровое моделирование, математическое моделирование, магнитопроводы, бесконтактные двигатели

### Для цитирования

Иванов Н.О. Направления разработки эффективной системы управления электроприводом насосной станции / Н.О. Иванов, Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4(80). С. 8–16. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).8-16.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 05.12.2023 г.; поступила после рецензирования: 08.12.2023 г.; принята к публикации: 11.12.2023 г.

## Directions for the development of an effective control system for a pumping station electric drive

N.O. Ivanov<sup>1</sup>, E.Yu. Puzina<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lena-rus05@mail.ru

### Abstract

In power supply systems for direct current consumers rectifier installations are often used. In such cases, problems such as an increased cross-section of current-carrying parts in the absence of voltage stabilization, distortion of the quality of electrical energy, accompanied by additional losses of electricity due to the appearance of higher harmonics, may arise. It should also be borne in mind that modern DC motors are acutely sensitive to distortion of the shape of the supply voltage curve. Therefore, an urgent task is to develop a rectifier device that is able to supply electrical energy of the required quality to electric receivers while meeting the requirements for the reliability of electrical equipment. In this paper, it is proposed to use a three-circuit control system for controlling a DC electric drive, including rotor position sensors. The signals taken from the above sensor are directly fed into the control system of these engines. At the same time, the main technical solution proposed in the article is an adjustable rectifier device based on a transformer with a rotating magnetic field. In order to study the processes occurring in the proposed device, the use of mathematical modeling method is suggested using equations based on the theory of electric circuits with mutual inductance. The calculation of transients occurring during load switching and under various types of asymmetry of the supply voltage is performed. The obtained calculation results confirmed the effectiveness of using a transformer with a rotating magnetic field and a rotor position sensor to create an effective control system for a DC electric drive.

**Keywords**

digital modeling, mathematical modeling, magnetic circuits, contactless motors

**For citation**

Ivanov N.O., Puzina E.Yu. Napravleniya razrabotki effektivnoi sistemy upravleniya elektroprivodom nasosnoi stantsii [Directions for the development of an effective control system for a pumping station electric drive]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 8–16. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).8-16.

**Article Info**

Received: December 5, 2023; Revised: December 8, 2023; Accepted: December 11, 2023.

**Введение**

Потребность в совершенствовании систем электроснабжения (СЭС) вызвана непрерывным увеличением числа и мощности приемников электрической энергии, расширением и усложнением решаемых ими задач. От надежности работы систем электроснабжения во многом зависят качество подводимой электроэнергии и надежность работы потребителей электрической энергии [1–6]. Из-за нестабильности параметров электроэнергии имеют место до 20 % сбоев и отказов в работе систем различного оборудования [7–14].

В СЭС современных энергоустановок, где источником питания являются выпрямительные устройства (ВУ), стабилизация их выходного напряжения нередко отсутствует [15, 16]. Данный факт приводит к необходимости выбора сечения токоведущих частей в системах электроснабжения с учетом минимально возможного значения нестабилизированного напряжения, соответственно приходится принимать завышенное сечение, что удорожает электрические сети. Процесс работы ВУ, состоящей из дискретного количества полупроводниковых приборов, поочередно проводящих ток, приводит к искажению кривой питающего переменного напряжения, что отрицательно влияет на качество электрической энергии, получаемой потребителями в этих сетях.

Для приводов механизмов насосных станций применяются электродвигатели постоянного тока, поставляемые с необходимым оборудованием.

Если рассмотреть регулируемый электропривод с электродвигателями постоянного тока, то стоит отметить, что одним из их слабых узлов является щеточно-коллекторный аппарат, поскольку практика эксплуатации подобных двигателей подтвердила его относительную ненадежность. В связи с этим, например, в СЭС насосного оборудования к настоя-

щему времени произошло вытеснение двигателей постоянного тока с щеточно-коллекторным узлом на бесконтактные двигатели постоянного тока.

В рамках данного исследования поставлена цель разработки системы управления электроприводом постоянного тока, поэтому на начальном этапе рассмотрим общие принципы его работы и основы организации систем его управления.

**Постановка задачи исследования**

В основе принципа действия электродвигателя постоянного тока лежит закон Ампера, который, согласно [17], устанавливает зависимость силы  $F$ , действующей на проводник с током, в магнитном поле, от значения магнитной индукции данного поля  $B$ , величины тока в проводнике  $i$ , длины проводника  $l$ , а также угла  $\alpha$  между направлениями тока и магнитной индукции:

$$F = i \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha.$$

Направление данной силы  $F$  определяют согласно правилу левой руки.

При дальнейшем рассмотрении материала будем учитывать определенные допущения. В частности, примем, что в статоре исследуемого электродвигателя магнитное поле между полюсами остается однородным и постоянным.

С целью управления двигателем постоянного тока (ДПТ) предлагается рассмотреть для использования трехконтурную систему регулирования положения вала двигателя (рис. 1).

При этом необходимо выполнить расчет параметров регулятора. Если вести речь о цифровых системах автоматического регулирования, то необходимо правильно выбрать метод расчета. Использование метода последовательной коррекции не оправдано, поскольку при применении ряда допущений, которые не позволяют учесть влияние ряда факторов на работу ДПТ, получаем результаты расчета с большой погрешностью.

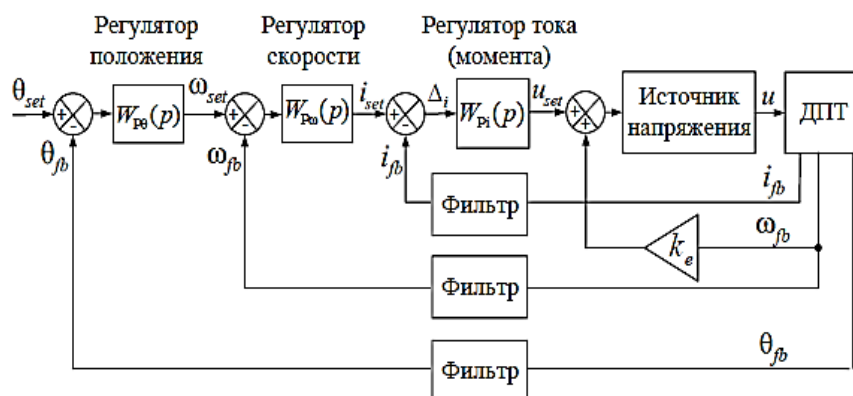


Рис. 1. Система трехконтурной системы регулирования:

$\theta_{set}$ ,  $\omega_{set}$ ,  $i_{set}$ ,  $\Delta_i$ ,  $u_{set}$  – регулируемые координаты;  $\theta_{fb}$ ,  $\omega_{fb}$ ,  $i_{fb}$  – возмущения; ДПТ – двигатель постоянного тока;  $k_e$  – коэффициент электродвижущей силы

Fig. 1. Three-circuit control system:

$\theta_{set}$ ,  $\omega_{set}$ ,  $i_{set}$ ,  $\Delta_i$ ,  $u_{set}$  – adjustable coordinates;  $\theta_{fb}$ ,  $\omega_{fb}$ ,  $i_{fb}$  – disturbances; ДПТ – DC motor;  $k_e$  – electromotive force coefficient

Метод численного моделирования создает условия для получения более точных результатов в области исследования режимов работы и взаимодействия контуров трехконтурной системы регулирования.

Процесс работы данной системы управления ДПТ должен строиться на принципе последовательной работы контуров: первым настраивается внутренний контур тока, далее контур скорости и только последним контур положения. Такой принцип подчиненного регулирования лежит в основе предлагаемой системы управления.

При разработке системы управления бесконтактными ДПТ необходимо решить такую актуальную задачу, которая связана с применением ВУ, а именно, предложить использовать такие ВУ, которые не должны вызывать суще-

ственных искажений кривой напряжения, подводимого к исследуемым двигателям, и соответствовать требованиям по надежности их электроснабжения. И также для бесконтактных двигателей постоянного тока: для улучшения их работы должны применяться датчики положения ротора определенной конструкции.

Отдельно стоит остановиться на датчике положения ротора (ДПР), используемом в так называемом «бесконтактном ДПТ» (рис. 2).

Данный датчик встраивается в двигатель. Он имеет три канала по числу фаз в статорной обмотке бесконтактного двигателя постоянного тока.

В каждом канале формируется форма выходного сигнала в виде меандра. При этом количество импульсов меандра напрямую зависит

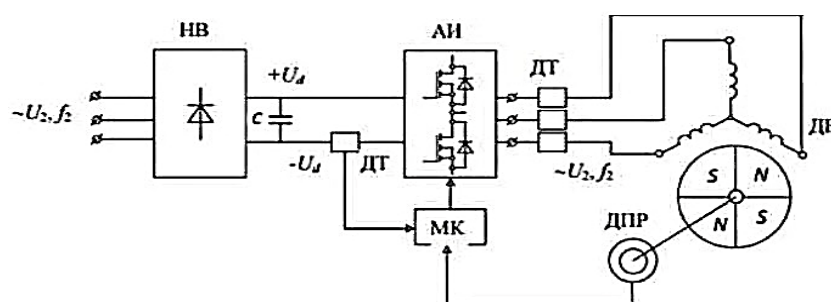


Рис. 2. Датчик положения ротора бесконтактного двигателя постоянного тока:

НВ – неуправляемый выпрямитель; ДТ – датчики тока; АИ – автономный инвертор напряжения; ДБ – синхронный электродвигатель с постоянными магнитами; ДПР – датчик положения ротора; МК – микроконтроллер

Fig. 2. Rotor position sensor of contactless DC motor:

НВ – uncontrolled rectifier; ДТ – current sensors; АИ – autonomous voltage inverter; ДБ – synchronous electric motor with permanent magnets; ДПР – rotor position sensor; МК – microcontroller

от числа пар полюсов ДПТ. Угловой сдвиг между импульсами в каналах составляет одну треть периода. Это связано с поворотом поля ротора на  $120^\circ$ . Логическая обработка данных сигналов позволяет выявить электрическое положение поля ротора с точностью до  $60^\circ$ .

Сигналы с датчика положения ротора непосредственно используются системой управления бесконтактного двигателя постоянного тока.

С целью формирования импульсов датчика положения ротора возможно использовать различные устройства, такие как зубчатые колеса с измерителями индуктивности или оптоволоконные пары.

В данной статье предлагается рассмотреть эту актуальную для отечественных систем электроснабжения проблему качественного управления электроприводом на базе бесконтактного двигателя постоянного тока, путем разработки регулируемого выпрямительного устройства, с применением трансформатора с вращающимся магнитным полем (ВМП).

### **Математическое описание процесса моделирования**

Рассмотрим процесс моделирования трансформатора с ВМП.

Одним из эффективных способов изучения объекта или процесса является математическое моделирование. Благодаря данному способу удается провести исследование свойств объекта, установить закономерности течения процессов, не вмешиваясь в работу объекта или системы. В нашем случае важно исследовать различные режимы работы трансформатора с ВМП [18], особенно с учетом влияния на них рабочих коммутационных процессов, аварийных режимов и режимов, связанных с несимметрией и несинусоидальностью напряжения питания.

Разработка математических моделей трансформатора с ВМП может быть выполнена с применением положений теории магнитного поля или теории электрических цепей [19, 20].

Рассматривая элементы электрической цепи, принято подразделять их на пассивные и активные. Активными называют элементы, имеющие в необходимом объеме источники электрической энергии. К их характеристикам относятся: номинальное напряжение источника электродвижущей силы, нагрузка номинального тока источника тока, значение сопротивления. Пассивными

называют элементы, в которых энергия электромагнитного поля только накапливается или рассеивается. К их наиболее важным характеристикам относят значения сопротивления или проводимости. Для моделирования активных и пассивных элементов используют их характеристики, описываемые алгебраическими или дифференциальными уравнениями.

Также применяют такую классификацию элементов электрической цепи, как их подразделение на линейные и нелинейные. В том случае, когда при изменении тока, протекающего по элементам, их параметры не изменяются, такие компоненты называют линейными. Если же параметры элементов зависят от протекающего по ним тока, то они относятся к нелинейным. Математическое моделирование линейных элементов подразумевает применение линейных дифференциальных или алгебраических уравнений. Моделирование нелинейных элементов сложнее. В этом случае используется алгоритмическое моделирование, представляемое в форме алгоритма, перерабатывающего заданный набор входных данных в заданный набор выходных. Как известно, такие виды моделей приходится использовать в ситуации, когда применение указанных выше аналитических моделей затруднено либо нецелесообразно.

В настоящее время, согласно [19, 20], в отдельных случаях применяются математические модели трансформаторов, основанные на теории магнитного поля, но, как показывает практика исследований, более распространенными являются модели, основанные на теории электрических цепей с учетом взаимной индуктивности. При этом важной задачей является правильный выбор системы координат для записи уравнений, используемых в математической модели. Так, если применять систему подвижных прямоугольных координат  $d, q, 0$ , то будет достаточно сложно исследовать режимы работы трансформатора с ВМП, характеризующиеся несимметрией и несинусоидальностью напряжения, в том числе и несимметричные аварийные режимы.

В случае же использования осей фазной неподвижной системы координат  $A, B, C, \dots, 0$  для описания процессов в трансформаторе с ВМП удастся, согласно [21], существенно проще описать и исследовать все виды несимметричных режимов работы данного трансформатора. При этом необходимо принять ряд допущений, которые позволят упростить модель, но не окажут

существенного влияния на ее точность:

- насыщение стали сердечника и потери в нем для трансформатора с ВМП не учитываем;
- обмотки моделируемого трансформатора обладают симметрией и их магнитные поля синусоидальны;
- сердечник трансформатора с ВМП имеет равномерные воздушные зазоры;
- обмотка подмагничивания шунта исследуемого трансформатора обладает неизменной индуктивностью;
- не учитываем наличие потокоцепления обмотки подмагничивания шунта с вращающимся магнитным полем.

С учетом полученных допущений сформирована схема замещения трансформатора с ВМП (рис. 3).

Схема содержит  $k$ -е количество фаз первичной обмотки,  $n$ -е – вторичной обмотки и обмотку подмагничивания шунта.

Процессы, происходящие в приведенной схеме исследуемого трансформатора описываются, согласно [21], следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_k = \frac{d\Psi_k}{dt} + r_1 i_k; \\ 0 = \frac{d\Psi_n}{dt} + (r_2 + r_n) i_n; \\ U_{оп} = \frac{d\Psi_{оп}}{dt} + r_{оп} i_{оп}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $u_k$  – значение фазного питающего напряже-

ния;  $i_k$  – мгновенное значение фазного тока первичной обмотки;  $r_1$  – активное сопротивление фазы первичной обмотки;  $r_2$  – активное сопротивление фазы вторичной обмотки;  $r_n$  – активное сопротивление нагрузки;  $i_n$  – мгновенное значение фазного тока вторичной обмотки;  $U_{оп}$  – напряжение обмотки подмагничивания шунта;  $i_{оп}$  – ток подмагничивания;  $r_{оп}$  – активное сопротивление обмотки подмагничивания;  $\Psi_k$  – потокоцепление фазы первичной обмотки, которое определяют по формуле:

$$\Psi_k = \sum_{i=1}^{k+n} M_i i_i \cos \alpha_i,$$

где  $\alpha_i$  – угол между осями фаз обмоток;  $\Psi_n$  – потокоцепление фазы вторичной обмотки, которое рассчитывают по формуле:

$$\Psi_n = \sum_{i=1}^{k+n} M^2 i_n \cos \alpha_i,$$

где  $\Psi_{оп}$  – потокоцепление обмотки подмагничивания, определяемое по формуле  $\Psi_{оп} = L_{оп} \cdot i_{оп}$ .

Общее количество дифференциальных уравнений в системе (1), относящейся к жестким, составляет  $n + k + 1$ . Считаем, что она адекватно описывает процессы в трансформаторе с ВМП.

Решение данной системы произведем в матричной форме:

$$U_m = L_m \frac{dI_m}{dt} + R_m I_m, \quad (2)$$

где  $U_m = [u_A, u_B, u_C, 0, \dots, 0, U_{оп}]^T$  – матрица-столбец напряжений;  $I_m = [i_A, i_B, i_C, i_a, \dots, i_n,$

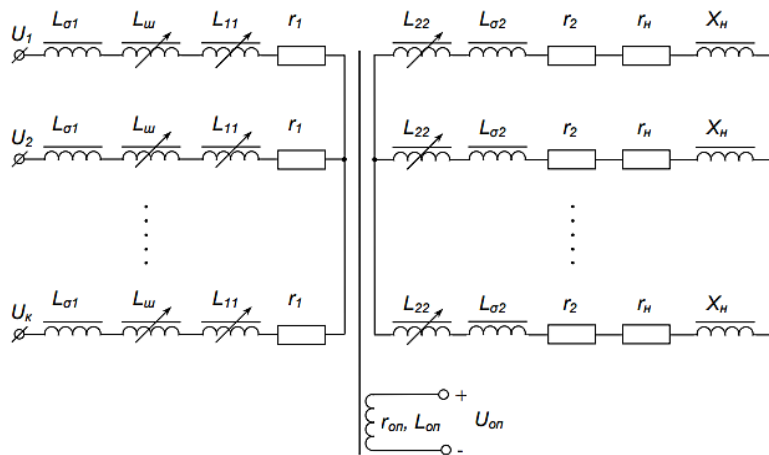


Рис. 3. Схема замещения трансформатора с вращающимся магнитным полем с учетом принятых допущений:

$L$  – индуктивный элемент;  $r$  – резистивный элемент

Fig. 3. Replacement scheme of a transformer with a rotating magnetic field, taking into account the accepted assumptions:

$L$  – inductive element;  $r$  – resistive element

$i_{\text{оп}}]^T$  – матрица-столбец токов;  
 $\frac{dI_m}{dt} = [i'_A, i'_B, i'_C, i'_a, \dots, i'_n, i'_{\text{оп}}]^T$  – матрица-столбец

производных от токов;  $L_m$  – квадратная матрица индуктивностей размера  $(k + n + 1)$ ;  $R_m = \text{diag} [r_1, r_1, r_1, r_2 + r_H, \dots, r_2 + r_H, r_{\text{оп}}]$  – диагональная матрица активных сопротивлений.

Представим формулу (2) в форме Коши для того, чтобы выполнить ее интегрирование:

$$\frac{dI_m}{dt} = L_m^{-1} U_m - L_m^{-1} R_m I_m,$$

где  $L_m^{-1}$  – матрица, обратная матрице  $L_m$ .

Материалы исследований, представленные в [20, 22], позволяют сделать вывод о целесообразности решения приведенных систем уравнений путем их численного интегрирования с применением относительных единиц. Такой подход обеспечивает сокращение временных затрат на проведение данных операций и, согласно [22], создает условия в соответствии с критериями подобия для интерпретирования результатов моделирования на трансформаторы с ВМП разной мощности.

Для применения системы относительных единиц, согласно [21], в описании процессов, происходящих в первичной обмотке исследуемого трансформатора, разделим каждый член уравнения на полное сопротивление фазы первичной обмотки  $Z_{61}$ :

$$Z_{61} = U_{1i}/I_{1i}.$$

Для вторичной обмотки трансформатора с ВМП используем деление каждого члена уравнения на полное сопротивление фазы вторичной обмотки  $Z_{62}$ :

$$Z_{62} = U_{2i}/I_{2i}. \quad (5)$$

Если же исследуемый трансформатор будет иметь разное число фаз первичной и вторичной обмоток, то требуется выразить полное сопротивление фазы вторичной обмотки  $Z_{62}$  через полное сопротивление фазы первичной обмотки  $Z_{61}$ . При этом за базовое значение сопротивления вторичной обмотки  $Z_{62}$  будет принят положительный корень квадратного уравнения:

$$A \cdot Z_{62}^2 + B \cdot Z_{62} + C = 0, \quad (6)$$

где

$$A = Z_{61}^2 \cdot K^2 \cdot I_{\text{ин}}^2 \cdot K_{\text{яи}}^2 - E_{11\text{H}}^2 \cdot K^2;$$

$$B = Z_{61}^2 \cdot K_{\text{яи}}^2 \cdot K \cdot n \cdot U_{2i} \cdot I_{\text{ин}} \cdot \cos \beta;$$

$$C = Z_{61}^2 \cdot K_{\text{яи}}^4 \cdot U_{2i}^2 \cdot n^2;$$

$$\beta = 90^\circ + \alpha,$$

где  $I_{\text{ин}}$  – значение номинального намагничивающего тока;  $E_{11\text{H}}$  – номинальная ЭДС взаимной индукции фазы первичной обмотки;  $K_{\text{яи}} = \Phi_{2i}/\Phi_{1i}$  – отношение номинального значения магнитного потока вторичного яра к потоку первичного яра;  $\beta$  – угол между векторами.

После выполнения всех необходимых преобразований матрицы  $R_m$ ,  $dI_m$ ,  $dt$  и  $I_m$  по своему виду не изменятся, матрица  $U_m$  запишется в виде:

$$U_m = [1, 1, 1, 0, \dots, 0, 0_n]^T. \quad (7)$$

Далее каждый элемент матрицы  $L_m$  умножим на угловую частоту  $2\pi f$ . Полученную по результатам всех действий матрицу  $L_m$  обозначим  $X_m$  – матрица индуктивных сопротивлений.

Весь ход преобразований привел к следующему виду системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в трансформаторе с ВМП:

$$\frac{dI_m}{d\tau} = X_m^{-1} U_m - X_m^{-1} R_m I_m, \quad (8)$$

где  $\tau = 2\pi f \cdot t$  – относительное время.

На рис. 4 приведены кривые напряжения вторичной обмотки трансформатора с ВМП, характерные для переходных процессов, возникающих при коммутации нагрузки (а) и при несимметрии по фазе и амплитуде (б). Данные кривые получены в процессе реализации предложенного алгоритма, согласно которому осуществлена замена математической модели трансформатора с ВМП, организованной в соответствии с уравнениями теории магнитного поля на математическую модель, базирующуюся на более простых уравнениях, в основе которых лежит теория электрических цепей с взаимной индуктивностью.

Стоит отметить также, что временные затраты, связанные с решением путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений трансформатора с ВМП с использованием фазной системы координат больше, чем при интегрировании уравнений аналогичной системы в осях  $d, q, 0$ . Этот факт относится к негативным характеристикам данного способа. Но его несомненным достоинством являются значительно более широкие возможности исследования несимметричных режимов работы трансформатора с ВМП.

При исследовании несимметричных режимов работы трансформатора с ВМП будем считать, что количество витков вторичных обмоток и первичных обмоток одинаково, т.е. коэффициент трансформации напряжения фазных

величин практически равен 1. Это не нарушает приведенные рассуждения, но позволяет создавать на первом этапе более простые модели.

Так как схема замещения трансформатора похожа для токов прямой и обратной последовательностей, то при анализе несимметричных режимов его работы можно не рассматривать отдельно напряжения и токи этих последовательностей, а брать их за основу [23]. Метод симметричных составляющих используется в основном для исследования несимметричных режимов работы трансформаторов с ВМП и электрических машин насосного оборудования, а также режимов, возникающих при коротком замыкании. При несимметрии пускового напряжения, характерной для электроприводов насосной станции, используется разделение этого напряжения на симметричные напряжения обратной и прямой последовательностей.

Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что при подключении обмоток трансформатора по схеме «звезда» с нейтралью токи нулевой последовательности могут протекать непосредственно во вторичной обмотке. Также следует учитывать основное отличие различных преобразователей от трансформаторов – это наличие повременного механического перемещения вращающихся относительно друг друга обмоток, а значит, и совместных индуктивностей, что позволяет проектировать преобразователи электрической энергии различных параметров в другие, при этом возможно изменение тока, напряжений и частоты одновременно.

В завершение хотелось бы отметить, что применение структурирования является наиболее

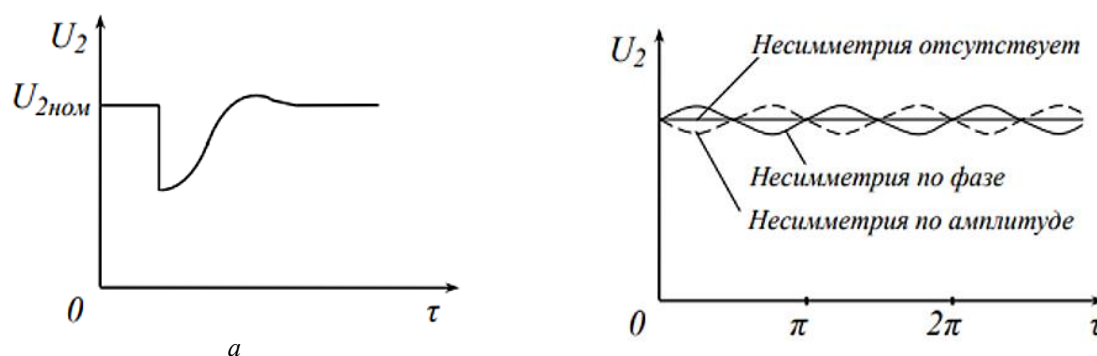
эффективным и экономически выгодным методом. Например, перераспределение или изменение всех однофазных нагрузок насосного оборудования на насосной станции равномерно между всеми фазами может существенно уменьшить несимметрию параметров режима работы. Кроме того, можно снизить несимметрию режима работы трансформатора с ВМП, организовав ступени соединения между трансформаторами с ВМП.

### Заключение

Таким образом, используя трансформатор с ВМП для обеспечения качественного электрического поля, которое не имеет высших гармонических составляющих, влияющих на работу электрической машины привода, а также применяя трехконтурную систему регулирования положения вала двигателя, можно добиться эффективного управления электроприводами насосных станций.

При этом предложено рассмотреть для использования в трехконтурной системе регулирования положения вала двигателя современных датчиков положения ротора электрической машины, сигналы с которых непосредственно используются системой управления бесконтактного двигателя постоянного тока.

Применение предложенного алгоритма исследования несимметричных режимов работы трансформаторов с ВМП позволяет наиболее эффективно разработать конструктивные и массогабаритные параметры базовой машины привода, предложить наиболее оптимальный вариант структуры системы его управления.



**Рис. 4.** Кривые напряжения вторичной обмотки трансформатора с вращающимся магнитным полем, характерные для переходных процессов:

*a* – при коммутации нагрузки; *b* – несимметрия по фазе и амплитуде

**Fig. 4.** Voltage curves of the secondary winding of a rotating transformer magnetic field, characteristic for transient processes:  
*a* – when switching the load; *b* – asymmetry in phase and amplitude

## Список литературы

1. Пузина Е.Ю., Худоногов И.А. Выявление факторов разрыва транзита электроэнергии в системе внешнего электроснабжения и ее подпитки через контактную сеть // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2023. № 2 (58). С. 67–76.
2. Селезнёв А.С., Кондрат С.А., Третьяков А.Н. Об эффективности применения фильтров при нормализации несинусоидальных режимов // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2015. № 8 (103). С. 177–183.
3. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташов, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. М. : МЭИ, 2006. 319 с.
4. Третьяков Е.А. Управление качеством электрической энергии в распределительных сетях железных дорог. Омск : ОмГУПС, 2013. 191 с.
5. Овечкин И.С., Пузина Е.Ю. Снижение несимметрии напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2023. № 4 (60). С. 84–95.
6. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018. P. 1–5. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
7. Shamanov V.I., Pulyakov A.V., Trofimov Yu.A. Main electromagnetic jammer sources with impact on the railroad automation systems // Journal of Physics: International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020). 2020. Vol. 1661. Is. 1. DOI 10.1088/1742-6596/1661/1/012012.
8. Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Попов М.О. Инновационные методы анализа основных компонент для оценки и диагностики состояния контактной сети // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2023. С. 50–53.
9. Рыжова Е.Л. Инновационные технологии определения состояния изоляции тяговых электрических машин // Интеллектуальная электротехника. 2022. № 1 (17). С. 116–127.
10. Сулейманов Р.Я., Падерина И.Б. Особенности ускорения подвижного состава // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 1 (45). С. 75–81.
11. Определение современных показателей надежности устройств релейной защиты и автоматики / А.В. Виноградов, А.А. Лансберг, Ю.Д. Волчков и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 2. С. 58–70.
12. Reliability analysis of power equipment of traction rolling stock within the Eastern region / А.М. Khudonogov, I.A. Khudonogov, E.Yu. Dul'skiy et al. // International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2019). Moscow, 2019. Vol. 760. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012018.
13. Плотников И.И. Обнаружение неисправностей в системе тягового электроснабжения // Железнодорожный транспорт. 2023. № 8. С. 45–47.
14. Усовершенствование схемы блока управления электродвигателя малогабаритного стрелочного универсального / К.В. Менакер, А.В. Пульпяков, М.В. Востриков и др. // Автоматика на транспорте. 2023. № 4. Т. 9. С. 313–323.
15. Пузина Е.Ю. Регулируемые тяговые преобразователи в системе электроснабжения постоянного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1998. 24 с.
16. Овечкин И.С., Поляков М.М. Изменение сигнала на выходе линейного колебательного контура при приближении частоты к резонансной // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 372–382. URL : [https://mnv.irkgups.ru/sites/default/files/articles\\_pdf\\_files/ovechkin\\_polyakov.pdf](https://mnv.irkgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/ovechkin_polyakov.pdf) (Дата обращения 18.11.2023).
17. Основы электротехники, микроэлектроники и управления. Теория и расчет. В 2 т. / Ю.А. Комиссаров, Л.С. Гордеев, Д.П. Вент и др. Т. 1. М. : Химия, 2007. 451 с.
18. Красношапка М.М., Коваленко Г.А., Красношапка Д.М. Плавно регулируемые трансформаторы и автотрансформаторы с вращающимся магнитным полем. Киев : ИЭД, 1986. 49 с.
19. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М. : Высш. шк., 1987. 248 с.
20. Страхов С.В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1960. 247 с.
21. Мишин С.В., Мишина И.В. Математическое моделирование управляемого трансформатора с вращающимся магнитным полем // Науч. вестн. Москов. гос. техн. ун-та граждан. авиации. 2008. № 126. С. 87–91.
22. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). М. : Высш. шк., 1984. 438 с.
23. Петров Г.Н. Трансформаторы. Т. 1. Основы теории. М.-Л. : Энергоиздат, 1934. 446 с.

## References

1. Puzina E.Yu., Khudonogov I.A. Vyyavlenie faktorov razryva tranzita elektroenergii v sisteme vneshnego elektrosnabzheniya i ee podpitki cherez kontaktnuyu set' [Identification of factors that disrupt the transit of electricity in the external power supply system and its replenishment through the contact network]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2023, no. 2 (58), pp. 67–76.
2. Seleznev A.S., Kondrat S.A., Tret'yakov A.N. Ob effektivnosti primeneniya fil'trov pri normalizatsii nesinusoidal'nykh rezhimov [On the effectiveness of using filters when normalizing non-sinusoidal modes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2015, no. 8 (103), pp. 177–183.
3. Kartashov I.I., Tul'skii V.N., Shamonov R.G., Sharov Yu.V., Vorob'ev A.Yu. Upravlenie kachestvom elektroenergii [Electricity quality management]. Moscow: MEI Publ., 2006. 319 p.
4. Tret'yakov E.A. Upravlenie kachestvom elektricheskoi energii v raspredelitel'nykh setyakh zheleznykh dorog [Electrical energy quality management in railway distribution networks]. Omsk: OmGUPS Publ., 2013. 191 p.
5. Ovechkin I.S., Puzina E.Yu. Snizhenie nesimmetrii napryazheniya vozduzhnykh linii, pitayushchikh ustroystva avtoblokirovki [Reducing the voltage asymmetry of overhead lines supplying automatic blocking devices]. *Vestnik Ural'skogo gosudar-*



*svennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2023, no. 4 (60), pp. 84–95.

6. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation. *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, 2018, pp. 1–5.

7. Shamanov V.I., Pulyakov A.V., Trofimov Yu.A. Main electromagnetic jammer sources with impact on the railroad automation systems. *Journal of Physics: International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020)*, 2020, vol. 1661, is. 1. DOI 10.1088/1742-6596/1661/1/012012.

8. Bykadorov A.L., Zarutskaya T.A., Popov M.O. Innovatsionnye metody analiza osnovnykh komponent dlya otsenki i diagnostiki sostoyaniya kontaktnoi seti [Innovative methods of analysis of the main components for assessing and diagnosing the state of the contact network]. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Energetika transporta. Aktual'nye problemy i zadachi»* [Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference «Energy of transport. Current problems and challenges»]. Rostov-on-Don, 2023, pp. 50–53.

9. Ryzhova E.L. Innovatsionnye tekhnologii opredeleniya sostoyaniya izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin [Innovative technologies for determining the insulation state of traction electrical machines]. *Intellektual'naya elektrotehnika* [Intelligent electrical engineering], 2022, no. 1 (17), pp. 116–127.

10. Suleimanov R.Ya., Paderina I.B. Osobennosti uskoreniya podvizhnogo sostava [Features of rolling stock acceleration]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2020, no. 1 (45), pp. 75–81.

11. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Volchkov Yu.D., Vinogradova A.V. Opredelenie sovremennykh pokazatelei nadezhnosti ustroystv releinoi zashchity i avtomatiki [Determination of modern indicators of reliability of relay protection and automation devices]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki* [Bulletins of higher educational organizations. Energy problems], 2023, vol. 25, no. 2, pp. 58–70.

12. Khudonogov A.M., Khudonogov I.A., Dul'skii E.Y., Ivanov P.Y., Lobytsin I.O., Khamnaeva A.A. Reliability analysis of power equipment of traction rolling stock within the Eastern region. *International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2019)*. Moscow, 2019, vol. 760. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012018.

13. Plotnikov I.I. Obnaruzhenie neispravnosti v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya [Detection of faults in the traction power supply system]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no. 8, pp. 45–47.

14. Menaker K.V., Pul'tyakov A.V., Vostrikov M.V., Orlov A.V. Uovershenstvovanie skhemy bloka upravleniya elektrodvigatelya malogabaritnogo strochnogo universal'nogo [Improvement of the circuit of the control unit of the electric motor of a small-sized universal switch]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2023, vol. 9, no. 4, pp. 313–323.

15. Puzina E.Yu. Reguliruyemye tyagovye preobrazovateli v sisteme ehlektrosnabzheniya postoyannogo toka [Adjustable traction converters in a DC power supply system]. Ph.D.'s thesis. Saint Petersburg, 1998. 24 p.

16. Ovechkin I.S., Polyakov M.M. Izmenenie signala na vykhode lineinogo kolebatel'nogo kontura pri priblizhenii chastoty k rezonansnoi [Change in the signal at the output of a linear oscillating circuit as the frequency approaches the resonant one]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 2 (12), pp. 372–382.

17. Komissarov Yu.A., Gordeev L.S., Vent D.P., Babokin G.I. Osnovy elektrotehniki, mikroelektroniki i upravleniya. Teoriya i raschet (v 2 t) [Fundamentals of electrical engineering, microelectronics and control. Theory and calculation (In 2 vol.)]. Vol. 1. Moscow: Khimiya Publ., 2007. 451 p.

18. Krasnoshapka M.M., Kovalenko G.A., Krasnoshapka D.M. Plavno reguliruyemye transformatory i avtotransformatory s vrashchayushchimsya magnitnym polem [Continuously controlled transformers and autotransformers with a rotating magnetic field]. Kyiv: IED Publ., 1986. 49 p.

19. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow: Vysshya Shkola Publ., 1987. 248 p.

20. Strakhov S.V. Perekhodnye protsessy v elektricheskikh tsepyakh, sodержashchikh mashiny peremennogo toka [Transient processes in electrical circuits containing alternating current machines]. Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1960. 247 p.

21. Mishin S.V., Mishina I.V. Matematicheskoe modelirovanie upravlyаемого transformatora s vrashchayushchimsya magnitnym polem [Mathematical modeling of a controlled transformer with a rotating magnetic field]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii* [Scientific bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation], 2008, no. 126, pp. 87–91.

22. Venikov V.A., Venigov G.V. Teoriya podobiya i modelirovaniya (primeritel'no k zadacham elektroenergetiki) [Theory of similarity and modeling (in relation to the tasks of the electric power industry)]. Moscow: Vysshya Shkola Publ., 1984. 438 p.

23. Petrov G.N. Transformatory. T. 1. Osnovy teorii [Transformers. Vol. 1. General problems of theory]. Moscow–Leningrad: Energoizdat Publ., 1934. 446 p.

### Информация об авторах

**Иванов Николай Олегович**, кафедра электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: ivanov\_no@baikalenergy.com.

**Пузина Елена Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

### Information about the authors

**Nikolai O. Ivanov**, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: ivanov\_no@baikalenergy.com.

**Elena Yu. Puzina**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.