

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.313

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-92-101

## ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Васильев<sup>1</sup> Д.А., Пантелеева<sup>1</sup> Л.А., Грачева<sup>2</sup> Е.И.

<sup>1</sup>Ижевская государственная сельскохозяйственная академия,  
г. Ижевск, Россия

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
<https://orcid.org/0000-0003-0914-4097>, [79128747827@yandex.ru](mailto:79128747827@yandex.ru)

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Представленная работа ставит перед собой цель оптимизации режима работы асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором. Для реализации энергоэффективных режимов работы АД, работающих в системах автоматизированного электропривода, необходимо определить числовые значения параметров схемы замещения АД, токов протекающих по элементам схемы. При этом нет возможности непосредственного определения токов короткозамкнутого ротора, в соответствии с этим возникает необходимость идентификации токов короткозамкнутого ротора, которая должна решаться одновременно определением параметров схемы замещения АД. МЕТОДЫ. Для анализа работы АД в технической и учебной литературе используют схемы замещения, которые представляют собой цепи с последовательным и параллельным соединением активных и индуктивных сопротивлений. Выполнено преобразование схемы замещения АД состоящей из последовательного и параллельного соединения активных и индуктивных сопротивлений, в схему состоящую из проводимостей. При преобразовании схемы замещения АД не вводились дополнительные зависимости и коэффициенты, и все допущения, которые принимаются для схем замещения АД, относятся к рассматриваемой схеме. РЕЗУЛЬТАТЫ. Для исследования режимов работы АД, в работе предложена схема замещения, состоящая из проводимостей, что позволяет непосредственно определять активные и реактивные составляющие тока статора и ротора, соответствующие им мощности. Оценка эффективности работы двигателя, для предложенной схемы замещения, определяется отношением произведения активных проводимостей цепи ротора и суммарной активной проводимости фазы к квадрату полной проводимости фазы АД, что соответствует минимальным активным потерям в обмотках двигателя. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В результате решения задачи оптимизации потерь в АД, по предложенному отношению проводимостей, получена зависимость частоты питающей сети, на базе двигателя АИР100S4, от скольжения, по условию минимума потерь в обмотках статора и ротора. Исследуемый АД АИР100S4 будет работать с минимальными потерями, если изменять амплитуду питающего напряжения питания так, чтобы скольжение АД было равно расчетному значению  $s_{\xi}=0,061$  при частоте 50 Гц. Предложенный в работе способ позволяет уменьшить потери активной мощности на 3-5% в обмотках двигателя.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель; проводимость цепи; составляющие тока; схема замещения; ток статора; ток ротора; электропривод.

**Для цитирования:** Васильев Д.А., Пантелеева Л.А., Грачева Е.И. Оптимизации режима работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Проблемы энергетики. 2022.Т.24. № 6. С. 92-101. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-92-101.

## OPTIMIZATION OF THE OPERATING MODE OF A SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR

Vasiliev<sup>1</sup> D.A., Panteleeva<sup>1</sup> L.A., Gracheva<sup>2</sup> E.I.

<sup>1</sup>Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia

<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
<https://orcid.org/0000-0003-0914-4097>, 79128747827@yandex.ru

**Abstract:** *THE PURPOSE.* The presented work aims to optimize the operating mode of an asynchronous motor (AM) with a short-circuited rotor. To implement energy-efficient modes of operation of AM, operating in the resources of a rational electric drive, it is necessary to determine the numerical values of the parameters of the AM equivalent circuit, the currents flowing through the circuit element. There is no significance to this important definition of squirrel-cage currents, in accordance with the identification of the allocation of squirrel-cage rotor currents, which requires a solution along with the determination of the parameters of the IM equivalent circuit. *METHODS.* To analyze the work of AM in technical and educational formulations, equivalent circuits are presented, which turn into circuits with serial and analytical connections of active and inductive connections. For the established and transient operating modes of AM, it is important to determine the stator and rotor currents, their active and reactive components. In this regard, it is proposed to present the IM equivalent circuit in the form of conductivities connected in parallel, which will allow determining the components of IM currents without complex mathematical models. The replacement circuit of AM consisting of a series and parallel connection of active and inductive resistances has been converted into a circuit consisting of conductances. When converting the AM equivalent circuit, no additional dependencies and coefficients were introduced, and all assumptions that are accepted for IM equivalent circuits refer to the circuit under consideration. *RESULTS.* It was decided to use the equivalent circuit of one phase of AM, expressed in terms of the conductivities of the stator and rotor. According to the found dependences of conductivities, for the proposed equivalent circuit, the corresponding currents and powers of the AM phase are determined. Formulate the basic principle of optimal frequency control of AM, according to the criterion of energy saving. As an indicator of the efficiency of AM operation in steady-state operating modes, the minimum value of the total losses of the engine, the value of which is determined by the ratio of the product of the active conductivity of the rotor circuit  $q_{2s}$  and the active conductivity of the phase  $q$  to the square of total conductivity  $y$ . *CONCLUSION.* Based on the results of the analysis of the characteristics of an asynchronous motor, the following conclusion was drawn: the motor will operate with minimal losses if the amplitude of the supply voltage is changed so that the slip of the asynchronous motor is equal to the critical value  $s_{\xi}$  for a given frequency. For the investigated engine AIR100S4, the critical value is  $s_{\xi}=0.0613$  at a network frequency of 50 Hz. The method proposed in the work allows to reduce the loss of active power by 3-5% in the motor windings.

**Key words:** asynchronous motor; circuit conductivity; current components; equivalent circuit; stator current; rotor current; electric drive.

**For citation:** Optimization of the operating mode of a squirrel-cage induction motor. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):92-101. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-92-101.

### **Введение**

Для оценки энергетической эффективности работы частотно-регулируемого асинхронного электропривода используются энергетические показатели, которые можно разделить на две группы. К первой группе относятся показатели, которые характеризуют работу асинхронного двигателя (АД), как потребителя электрической энергии, к ним можно отнести полную, активную и реактивную мощности. Ко второй группе относятся показатели, которые характеризуют работу двигателя, как преобразователя энергии, к ним следует отнести: коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, мощность потерь. Рассматривая перечисленные показатели, как функции регулирования выходных параметров (амплитуды и частоты), можно говорить о существовании точек минимума или максимума этих функции, которые являются показателем качества работы АД. Из списка перечисленных показателей качества работы частотно-регулируемого асинхронного электропривода можно выделить необходимые целевые функции, а также при необходимости вводить новые показатели для решения поставленных задач оптимизации. Цель работы: сформулировать основной принцип оптимального частотно-токового управления АД, по критерию энергосбережения. Для достижения поставленной цели необходимо определить способ управления АД, применение которого позволит оптимизировать режим работы двигателя по критерию минимума потерь. Полученные в ходе исследования зависимости активных и реактивных составляющих токов фазы АД, в функции скольжения, могут быть использованы проектными организациями для выбора закона частотного управления при проектировании асинхронного электропривода.

### Литературный обзор

В работах Костенко М.П. был сформулирован основной закон частотного управления, который положили начало частотному управлению. Последующие работы А.А. Булгакова, И.Я. Браславского, А.Б. Виноградова, Ю.А. Сабина, А.С. Сандлера, Р.С. Сарбатова, В. Н. Полякова и других исследователей в области частотного управления, на основе все более полного учета свойств АД, основные результаты которых изложены и обобщены в монографиях [1-6], расширили область знаний в области частотного управления электроприводом. На принципах полученных в этих исследованиях, широкое распространение получили системы управления, основанные на непосредственной реализации законов регулирования напряжения в функции момента нагрузки  $U_1 = U(f_1, M)$  или частоты  $U_1 = U(f_1)$ .

Оценка энергетической эффективности законов частотного управления АД может быть выполнена при решении задач, критерием оптимизации может быть принято минимальное значение потребляемой мощности или минимальное значение токов двигателя [2,7,8,9]. При этом нет возможности непосредственного определения токов короткозамкнутого ротора, в соответствии с этим возникает необходимость идентификации токов короткозамкнутого ротора, которая должна решаться одновременно с задачей определению параметров эквивалентной схемы замещения АД [10,11].

Для оценки режимов работы АД и составления баланса мощности в качестве формализованного описания АД используется его схема замещения. Рассмотрим эквивалентные схемы замещения АД, приводимые в технической и учебной литературе.

В [Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. 1981. 576 с., стр. 75] рассматривается упрощенная или Г-образная схема замещения АД, приведенная на рисунке 1.

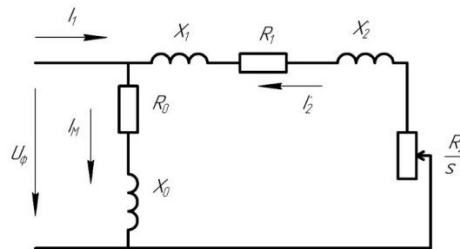


Рис. 1. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

Fig. 1. Simplified equivalent circuit of an asynchronous motor

В соответствии с приведенной схемой замещения рисунок 1, можно получить уравнения баланса напряжения и ЭДС в цепях:

статора

$$\dot{U}_\phi = (-\dot{E}_s) + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1;$$

ротора

$$0 = \dot{E}_r - j \frac{R_2'}{s} \dot{I}_2 + jX_2' \dot{I}_2;$$

контура намагничивания

$$\dot{U}_\phi = R_0 \dot{I}_M + jX_0 \dot{I}_M.$$

Схема замещения, приводимая в [12, стр. 139], имеет ряд отличий и показана на рисунке 2.

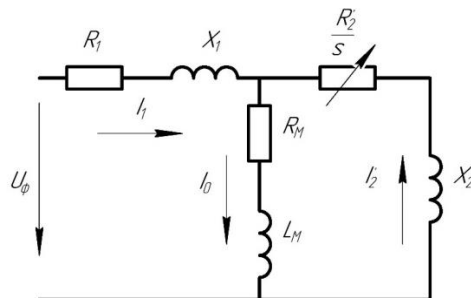


Рис. 2. Детализированная схема замещения асинхронного двигателя

Fig. 2. Detailed equivalent circuit of an asynchronous motor, in the diagram

В [Радин, В.И. Электрические машины: Асинхронные машины: 1988. 328 с., стр. 55] приведена Т - образная схема замещения асинхронного двигателя при вращающемся

роторе, рисунок 3.

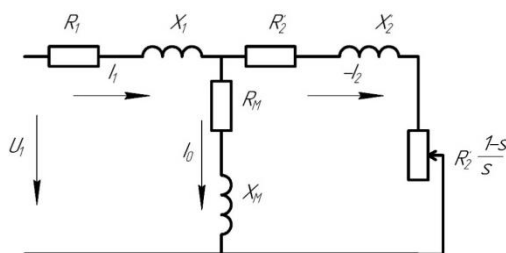


Рис. 3. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Fig. 3. T-shaped equivalent circuit of an induction motor

При анализе частотного регулирования скорости электродвигателей, в [1, стр. 15] используется схема замещения одной фазы асинхронного двигателя, приведенная на рисунке 4:

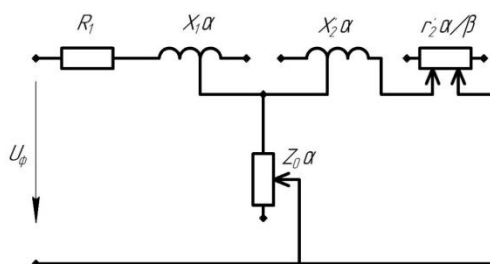


Рис. 4. Модель асинхронного двигателя с учётом частоты питания

Fig. 4. Model of an asynchronous motor, taking into account the power frequency

Параметры схемы замещения на рисунке 4 определяются при номинальных значениях напряжения и частоты сети. При отклонениях параметров сети от номинальных выполняется пересчет сопротивлений, где  $\alpha = f_1/f_{1ном}$  – относительная частота статора.

Решение задач оптимизации режимов работы АД с короткозамкнутым ротором выполняется на различных схемах замещения, важную роль при этом имеет состав переменных, зависимость между которыми определяется законом управления. Из литературного обзора, можно сделать вывод, что для анализа работы АД в литературе используют схемы замещения, которые представляют собой цепи с последовательным и параллельным соединением активных и индуктивных сопротивлений.

#### Материалы и методы

Для решения задачи по оптимизации режимов работы АД, предложен подход, в котором АД представляется схемой замещения в виде параллельно соединённых проводимостей, что позволит без сложных математических моделей определять составляющие токов АД [13].

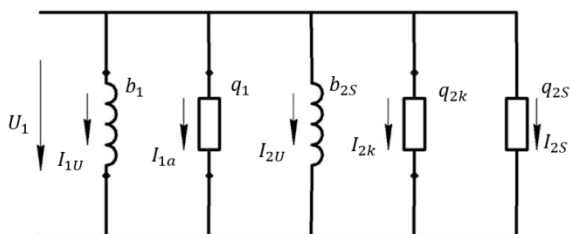


Рис. 5. Схема замещения асинхронного двигателя выраженная через проводимости статора и ротора

Fig. 5. Equivalent circuit of one phase of an asynchronous motor, expressed through the conductance of the stator and rotor

Из проведенных ранее исследований [14-16], можно сделать выводы, что схемы замещения фазы АД, выраженной через проводимости, рисунок 5, и упрощённая схема замещения асинхронного двигателя, рисунок 1, идентичны, что позволяет считать предложенную схему адекватной.

Для исследований выбран АД общего назначения АИР100S4, мощность номинальная 3 кВт, ток номинальный 7,3 А, частота вращения номинальная 1410 мин<sup>-1</sup>.

Параметры схемы замещения сведены в таблицу 1 [16].

Таблица 1.

Параметры схемы замещения электродвигателя АИР100S4

$R_1$	$L_1$	$X_1$	$R_2'$	$L_2'$	$X_2'$	$R_\mu$	$L_\mu$	$X_\mu$
Ом	Гн	Ом	Ом	Гн	Ом	Ом	Гн	Ом
2,55	0,00926	2,91	1,86	0,00926	2,91	4,76	0,229	71,92

На рисунке 6 показаны зависимости составляющих тока фазы АД АИР100S4 от скольжения, позволяющие количественно оценить значения составляющих тока фазы АД.

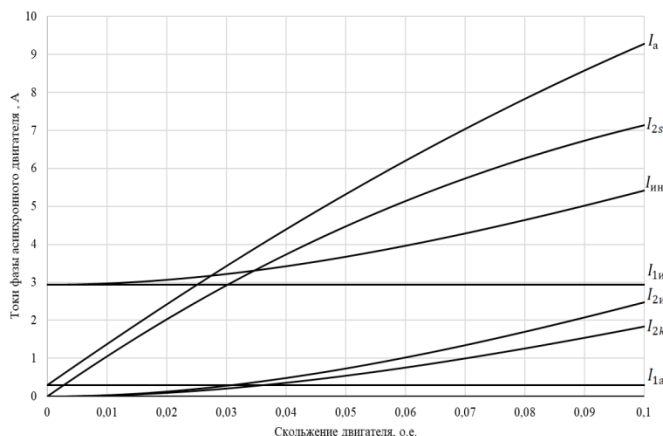


Рис. 6. Зависимости токов фазы двигателя АИР100S4 от скольжения

Fig. 6. Dependences of the phase currents of the AC100S4 asynchronous motor on slip

Анализ кривых составляющих токов фаз АД, рисунок 6, показал, что активная проводимость и соответствующий ей ток, кривая  $I_a$ , и индуктивная проводимость и ток, соответствующий этой проводимости, кривая  $I_{ин}$ , имеет разную степень зависимости от скольжения. В работах [13-16] доказано, что в АД можно изменять соотношение активной и индуктивной составляющей тока, посредством изменения соотношения между амплитудой и частотой питающего напряжения, что в свою очередь позволит скорректировать показатели энергетической эффективности работы АД.

Для решения задачи по оптимизации режимов частотно-регулируемого асинхронного электропривода, необходимо определить: целевую функцию, множество допустимых решений, критерий оптимизации. Асинхронный электропривод содержит в своем составе преобразователь частоты и асинхронный двигатель, в связи с этим, оптимизация может быть выполнена как по отношению двигателю, частотному преобразователю и электроприводу в целом.

КПД электропривода определяется отношением полезной механической мощности на валу  $P_{2s}$  к мощности, потребляемой из сети частотным преобразователем электропривода  $P_{ЭП}$ :

$$\eta_{ЭП} = \frac{P_{2s}}{P_{ЭП}} \cdot \#$$

КПД электропривода, содержащего в своем составе преобразователь частоты и АД, можно выразить как произведение двух составляющих: КПД преобразователя частоты  $\eta_{ПЧ}$  и КПД асинхронного двигателя  $\eta_{АД}$ .

$$\eta_{ЭП} = \eta_{ПЧ} \eta_{АД} \cdot \#$$

Одним из путей решения задачи снижения потребления электроэнергии асинхронным электроприводом является уменьшение потерь мощности в самом асинхронном электродвигателе. Так как в данной работе производится оценка эффективности работы АД, КПД частотного преобразователя принимается неизменным и в дальнейшем не анализируется.

$$\eta_{ЭП} = \eta_{АД} \cdot \#$$

С учетом вышесказанного, можно принять активную мощность которая потребляется электроприводом:

$$P_{ЭП} = \Delta P_{АД} + P_{2s}, \#$$

где  $\Delta P_{АД}$  – суммарные потери двигателя.

При  $\cos\varphi$ , для создания активной мощности на валу асинхронного двигателя,  $P_{2s}$  кВт, к активному току, будет добавляться реактивный ток, полный ток при этом:

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_a^2}, I = \frac{I_a}{\cos\varphi} \quad (1)$$

Реактивная составляющая тока:

$$I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2} = \sqrt{\left(\frac{I_a}{\cos\varphi}\right)^2 - I_a^2} = I_a \sqrt{\left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1}. \quad (2)$$

Оценим затраты активной мощности, в трехфазном асинхронном двигателе от протекания активной и реактивной составляющих тока:

$$P = 3I^2 R = 3(I_a^2 + I_p^2) R = 3(P_a + P_p), \quad (3)$$

где  $R$  – общее активное сопротивление фазы асинхронного двигателя, Ом.

Потери мощности на активном сопротивлении при протекании по нему реактивной составляющей тока, с учетом выражений (1-3), можно определить по выражению:

$$P_p = I_p^2 R = \left( I_a \sqrt{\left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1} \right)^2 R = P_a \left( \left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1 \right) \quad (3)$$

Тогда суммарные затраты активной мощности асинхронного двигателя:

$$P = P_a + P_p = P_a + P_a \left( \left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1 \right) = \frac{P_a}{\cos^2\varphi} = \frac{q U_\phi^2}{\cos^2\varphi}, \quad (4)$$

где  $q$  – суммарное значение активной проводимости фазы АД ( $q$ , 1/Ом).

КПД двигателя, для предложенной схемы замещения, определяется отношением активной проводимости цепи ротора ( $q_{2s}$ , 1/Ом), к суммарному значению активной проводимости одной фазы асинхронного двигателя ( $q$ , 1/Ом):

$$\eta = \frac{q_{2s}}{q}, \quad (5)$$

Суммарная активная мощность от протекания активной и реактивной составляющих тока составит, с учетом выражений (4) и (5):

$$P = \frac{q_{2s} U_\phi^2}{\cos^2\varphi \eta} = \frac{P_{2s}}{\cos^2\varphi \eta}.$$

Таким образом, целевая функцию оптимизации:

$$\xi = \cos^2\varphi \cdot \eta \Rightarrow \max. \quad (6)$$

В качестве показателя эффективности работы асинхронного электропривода предложено использовать минимальное значение активных потерь двигателя, значение которого определяется отношением произведения активной проводимости цепи ротора  $q_{2s}$  и полной активной проводимости фазы  $q$  к квадрату полной проводимости  $y$ , выражение (6).

#### Результаты и обсуждение

На основании схемы замещения фазы АД, рисунка 5, коэффициент мощности можно определить как отношение соответствующих проводимости:

$$\cos\varphi = \frac{q}{y} = \frac{q_1 + q_{2k} + q_{2s}}{\sqrt{(q_1 + q_{2k} + q_{2s})^2 + (b_1 + b_{2s})^2}} \quad (7)$$

Тогда с учетом формул (5-7) энергетический КПД АД можно записать в виде:

$$\xi = \frac{q_{2s} (q_1 + q_{2k} + q_{2s})}{(q_1 + q_{2k} + q_{2s})^2 + (b_1 + b_{2s})^2} \quad (8)$$

Запишем формулу (8), подставив значения проводимостей АД:

$$\xi = \frac{\frac{R_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} \left( \frac{R_0}{R_1^2 + X_0^2} + \frac{R_1 + R_2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} + \frac{R_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} \right)}{\left( \frac{R_0}{R_1^2 + X_0^2} + \frac{R_1 + R_2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} + \frac{R_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} \right)^2 + \left( \frac{X_0}{R_1^2 + X_0^2} + \frac{X_{2k}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} \right)^2}. \quad (9)$$

Далее рассмотрим задачу оптимизации целевой функции (9). Нахождение оптимальных условий работы для АД заключается в определении частоты сети и скольжения обеспечивающих экстремальное (максимальное) значение целевой функции  $\xi = f(f_i, s_i)$ . Определим значение скольжения ротора в экстремальных точках пользуясь аналитическим методом исследования функции, приравняв первую производную выражения (9) нулю:

$$\frac{d(\xi)}{ds} = 0. \#$$

Авторами определена зависимость критического скольжения энергетического КПД АД от частоты питающей сети и параметров схемы замещения:

$$s_{\xi} = \frac{R_2(-R_0 X_{2k} + R_1 X_0 + \sqrt{R_0^2 X_{2k}^2 + R_1^2 X_{2k} X_0 + X_0^3 X_{2k} + X_0^2 X_{2k}^2})}{2R_0 R_1 X_{2k} + (X_0 X_{2k} - R_1^2)(X_0 + X_{2k})}. \quad (10)$$

В результате решения задачи оптимизации потерь в АД получена зависимость частоты питающей сети на базе двигателя АИР100S4 от скольжения, при условии минимума потерь в обмотках статора и ротора, приведена на рисунке 7.

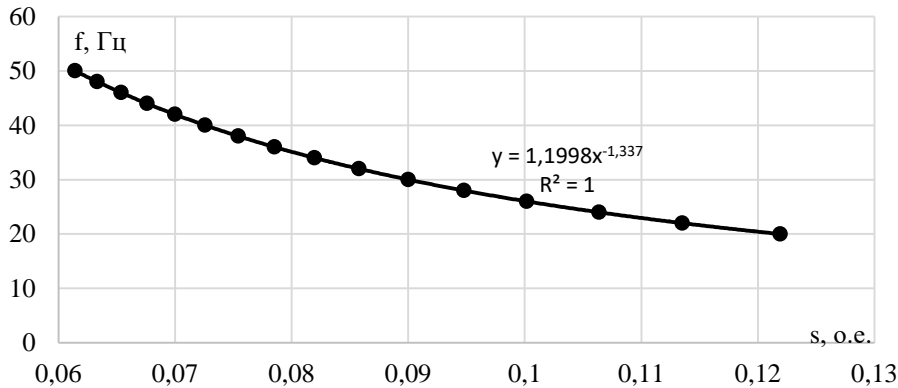


Рис.7.Зависимость частоты от скольжения для АД АИР100S4 при оптимизации режима по минимуму потерь

Fig. 7. Dependence of frequency on slip for AC100S4 when optimizing the mode by minimizing losses

Оптимизация режима работы АД с короткозамкнутым ротором по минимуму полных потерь, путем обеспечения экстремума функции энергетического КПД. К особенности рассмотренного способа оптимизации режимов работы АД следует отнести зависимость  $\xi(f_i, s_i)$ , к изменению параметров асинхронного двигателя и, прежде всего, к изменениям соотношения активного и реактивного тока, что непосредственно определяет изменения энергетических показатели асинхронного электропривода. Полученные в ходе исследования зависимости активных и реактивных составляющих токов фазы АД, в функции скольжения, могут быть использованы проектными организациями для выбора закона частотного управления при проектировании асинхронного электропривода.

Приведенная зависимость, рисунок 7, иллюстрирует следующий физический смысл: наилучшее значения показателя энергетической эффективности АД с короткозамкнутым ротором, наблюдается при оптимальном скольжении для расчетной частоты питания. Для АД АИР100S4 расчетное значение оптимального скольжения  $s_{\xi} =$

0,061 при частоте 50Гц при оптимизации режима по минимуму потерь.

### Выводы

1. Для решения задачи по оптимизации режимов работы АД с короткозамкнутым ротором определена целесообразность определения активных и реактивных составляющих тока фазы. В качестве решения, предложено использовать схему замещения фазы АД, выраженную через проводимости, что позволит идентифицировать активные и реактивные составляющие тока статора и ротора АД.

2. Оценка эффективности работы двигателя, для предложенной схеме замещения, определяется отношением произведения активных проводимостей цепи ротора и суммарной активной проводимости фазы к квадрату полной проводимости фазы АД, что соответствует минимальным активным потерям в обмотках двигателя.

3. Наилучшее значения показателя энергетической эффективности АД с короткозамкнутым ротором, наблюдается при оптимальном скольжении, найденному по выражению (10), для расчетной частоты питания. Для двигателя АИР100S4 расчетное значение скольжения  $s_{\xi} = 0,061$  при частоте 50Гц, из условия обеспечения максимального значения энергетического КПД АД. Предложенный в работе способ позволяет уменьшить потери активной мощности на 3-5% в обмотках двигателя.

### Литература

1. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.
2. Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. 256 с.
3. Сабинин Ю.А., Грузов В.Л. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 126 с.
4. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1974. 328 с.
5. Сандлер А.С. Частотное управление асинхронными двигателями / А. С Сандлер, Р. С. Сарбатов. М.: Энергия, 1966. 144 с.
6. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Экстремальное управление электрическими двигателями. Екатеринбург: УГТУ - УПИ, 2006. 420 с.
7. Макаров В. Г. Оптимальное управление токами трехфазного асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2011. – № 3-4. – С. 91-98.
8. Бурков А.Ф., Юрин В.Н., Аветисян В.Р. Исследование возможностей повышения энергоэффективности асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. No 9-10. С. 92-100.
9. Kosmodamianskii A. S., Vorobev V. I., Pugachev A. A. Induction motor drives with minimal power losses // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83. – No 12. – pp. 667-671.
10. Макаров В. Г., Яковлев Ю. А. Оценивание параметров трехфазного асинхронного двигателя // Вестник Казанского технологического университета. 2010. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenivanie-parametrov-trehfaznogo-asinhronnogo-dvigatelya> (дата обращения: 22.06.2022).
11. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Яковлев Ю.А., Ханнанова В.Н. Адаптивная система идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016;(1-2). С. 90-99.
12. Бойко Е.П., Ковалев Ю.М. и др. Асинхронные двигатели общего назначения / Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
13. Васильев Д.А., Дресвянникова Е.В., Пантелеева Л.А., Носков В.А. Разработка математической модели асинхронной машины по М-образной схеме замещения в пакете Simulink // Вестник НГИЭИ. 2018. № 4 (83). С. 38-54.
14. Vasiliev D. A., Panteleeva L. A., Lekomcev P. L. [et al. ]Improving the efficiency of a variable frequency asynchronous electric drive // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : The proceedings of the conference AgroCON-2019, Kurgan, 18–19 апреля 2019 года. – Kurgan: IOP Publishing Ltd, 2019. – P. 012120. – DOI 10.1088/1755-1315/341/1/012120.
15. Vasilyev D. A., Gavrilov R. I., Panteleeva L. A. Energy-efficient variable frequency asynchronous electric drive // Journal of Physics: Conference Series : International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021), Novorossiysk, 15–16 июня 2021 года / IOP Publishing. – Novorossiysk: IOP PUBLISHING LTD, TEMPLE CIRCUS, TEMPLE WAY, BRISTOL, ENGLAND, BS1 6BE, 2021. – P. 012053. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012053.
16. Васильев Д.А., Пантелеева Л.А. Энергосберегающий режим работы



асинхронного электропривода с частотным управлением // Сельский механизатор. – 2021. – № 7. – С. 19-21.

17. Васильев Д.А., Васильев Л.А., Пантелеева В.А., и др. Исследование частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в лабораторных условиях // В сборнике: Научно обоснованные технологии интенсификации сельскохозяйственного производства. Материалы Международной научно-практической конференции в 3-ех томах. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ижевская государственная сельскохозяйственная академия". 2017. - С. 235-237.

#### Авторы публикации

**Васильев Даниил Александрович** - старший преподаватель кафедры «Электротехники, электрооборудования и электроснабжения» Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

**Пантелеева Лариса Анатольевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехники, электрооборудования и электроснабжения» Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

**Грачева Елена Ивановна** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

#### References

1. Bulgakov AA. *Frequency control of asynchronous motors*. M.: Energoizdat, 1982. 216 p.
2. Braslavsky IYa, Ishmatov ZSh, Polyakov VN. *Energy-saving asynchronous electric drive*. M.: Academy, 2004. 256 p.
3. SabininYuA, Gruzov VL. *Frequency-controlled asynchronous electric drives*. Leningrad: Energoatomizdat, 1985. 126 p.
4. Sandler AS, Sarbatov RS. *Automatic frequency control of asynchronous motors*. M.: Energy, 1974. 328 p.
5. Sandler AS, Sarbatov RS. *Frequency control of asynchronous motors*. M.: Energy, 1966. 144 p.
6. Polyakov VN, Shreiner RT. *Extreme control of electric motors*. Ekaterinburg: USTU - UPI, 2006. 420 p.
7. Makarov V.G. *Optimal current control of a three-phase asynchronous motor*. *Energy problems*. 2011(3-4):91-98.
8. Burkov AF, Yurin VN, Avetisyan VR. Investigation of the possibilities of increasing the energy efficiency of asynchronous motors. *Izvestiya of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2018;20(9-10):92-100.
9. Kosmodamianskii AS, Vorobev VI, Pugachev AA. Induction motor drives with minimal power losses. *Russian Electrical Engineering*. 2012;83(12):667-671.
10. Makarov VG, Yakovlev Yu. A. Estimation of the parameters of a three-phase asynchronous motor. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2010. No. 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenivanie-parametrov-trehfaznogo-asinhronnogo-dvigatelya> (date of access: 06/22/2022).
11. AfanasievAYu, Makarov VG, Yakovlev YuA. Adaptive system for identification of parameters of a three-phase asynchronous motor. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2016;(1-2):90-99.
12. Boyko EP, KovalevYuM. et al. *General purpose asynchronous motors* / Ed. V.M. Petrov and A.E. Kravchik. M.: Energy, 1980. 488 p.
13. Vasil'ev DA, Dresvyannikova EV, Panteleeva LA, et al. Development of a mathematical model of an asynchronous machine according to the M-shaped equivalent circuit in the Simulink package. *Vestnik NGIEI*. 2018;4 (83):38-54.
14. Vasiliev DA, Panteleeva LA, Lekomcev PL, et al. *Improving the efficiency of a variable frequency asynchronous electric drive*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: The proceedings of the conference AgroCON-2019, Kurgan, April 18–19, 2019. Kurgan: IOP Publishing Ltd, 2019. P. 012120. - doi 10.1088/1755-1315/341/1/012120.
15. Vasilyev DA, Gavrilov RI, Panteleeva LA. Energy-efficient variable frequency asynchro-nous electric drive. *Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021)*, Novorossiysk, June 15–16, 2021 / IOP Publishing. Novorossiysk: IOP PUBLISHING LTD, TEMPLE CIRCUS, TEMPLE WAY,

BRISTOL, ENGLAND, BS1 6BE, 2021. P. 012053. doi 10.1088/1742-6596/2061/1/012053.

16. Vasiliev DA, Panteleeva LA. Energy-saving mode of operation of an asynchronous electric drive with frequency control. *Rural mechanic*. 2021;7:19-21.

17. Vasiliev DA, Vasiliev LA, Panteleeva VA. Noskov Study of frequency-controlled asynchronous electric drives in laboratory conditions. *In the collection: Science-based technologies for the intensification of agricultural production*. Materials of the International scientific-practical conference in 3 volumes. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Izhevsk State Agricultural Academy». 2017. pp. 235-237.

#### **Authors of the publication**

**Daniil A. Vasilyev** – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

**Larisa A. Panteleeva** – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia

**Elena I. Gracheva** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Получено**

**14.11.2022г.**

**Отредактировано**

**21.11.2022г.**

**Принято**

**28.11.2022г.**