

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОЛЬЦЕВЫМИ ОБМОТКАМИ

*Ольга Валерьевна Тихонова, olga\_tihonova\_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2666-7888>*

*Игорь Вячеславович Малыгин, mitrael\_1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9982-3178>*

*Анатолий Трофимович Пластун, a.t.plastun@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2186-1566>*

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия*

**Аннотация.** Асинхронный двигатель с кольцевыми обмотками (АДКО) предназначен для переработки ядерных отходов в условиях повышенной радиации и температуры. Для увеличения срока службы машины в тяжелых рабочих условиях катушки обмотки статора АДКО покрываются керамической изоляцией, обладающей повышенной устойчивостью к радиации, но при этом данный тип изоляции обладает высокой хрупкостью, что приводит к необходимости выполнять катушки обмотки статора концентрической формы, чтобы минимизировать угол сгиба катушки при изготовлении обмотки, в то время как обмотки статора классических машин выполняются в форме «лодочки». Статор АДКО также имеет специфическую конструкцию, отличную от конструкции статора классического асинхронного двигателя, состоящую из зубцовых наконечников, расположенных вокруг оси вращения, и зубцовых сердечников, размещенных поверх зубцовых наконечников по спирали. Первый опытный образец АДКО, изготовленный УрФУ совместно с ЗАО «Уралэлектромаш», выполнен на тех же диаметрах, что и асинхронный двигатель классической конструкции мощностью  $P = 2,2$  кВт, с синхронной скоростью вращения  $n = 1000$  об/мин. Одной из задач на данном этапе разработки АДКО является проверка возможности изготовления нового двигателя в тех же габаритах и с теми же параметрами, которые присущи серийному асинхронному двигателю серии АО2. Одним из способов оценки характеристик АДКО является определение параметров схемы замещения и электромагнитных моментов двигателя и сравнение полученных параметров с данными двигателя серии АО2. Принципиально новая конструкция якоря предполагает поиск новых решений для определения параметров машины: индуктивных сопротивлений, электромагнитных моментов. В статье рассматривается метод расчета параметров схемы замещения АДКО с помощью прикладного программного пакета ANSYS Maxwell в 3D-режиме. Для определения индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора используется статический анализ модели с вынутым ротором; взаимное индуктивное сопротивление определяется как разность между полным индуктивным сопротивлением фазы обмотки статора и индуктивным сопротивлением рассеяния. В работе проводится анализ параметров схемы замещения с помощью характеристик холостого хода и короткого замыкания АДКО, полученных в ANSYS Maxwell. Расчет механической характеристики двигателя типа АДКО проводится двумя способами: с помощью аналитического метода (АМ), предполагающего использование расчетных параметров схемы замещения, и методом конечных элементов (МКЭ). Использование МКЭ для расчета механической характеристики подразумевает анализ АДКО в динамическом режиме, что позволяет при заданной пользователем скорости вращения ротора определить электромагнитный момент. В заключение приводится сравнительный анализ параметров двигателя классического исполнения серии АО2 и АДКО, выполненных в одном габарите, проводится оценка возможности выполнения двигателя АДКО мощностью  $P = 2,2$  кВт в тех же габаритах, что и серийный двигатель АО2, даются рекомендации по дальнейшему улучшению конструкции двигателя типа АДКО.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, электромагнитный момент, схема замещения, индуктивные сопротивления, ANSYS Maxwell

**Для цитирования:** Тихонова О.В., Малыгин И.В., Пластун А.Т. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 1. С. 21–35. DOI: 10.14529/power220103

## THE EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS CALCULATION OF INDUCTION MOTORS WITH RING WINDINGS

*Ol'ga V. Tikhonova, olga\_tikhonova\_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2666-7888>*

*Igor' V. Malygin, mitrael\_1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9982-3178>*

*Anatoliy T. Plastun, a.t.plastun@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2186-1566>*

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia*

**Abstract.** Induction motors with ring windings (IMRW) are designed for the processing of nuclear waste. The stator winding coils are covered with ceramic insulation to allow for long-term operation in conditions of increased radiation. The stator coils are ring shaped, in order to reduce the bend angle. The stator has a specific design consisting of tooth tips located around the axis of rotation and tooth cores placed over the tooth tips in a spiral. The first IMRW prototype was manufactured by UrFU together with “Uralelectromash”. It was designed to the same diameters as an induction motor of a classical design with a power  $P = 2.2$  kW, with a synchronous rotation speed  $n = 1000$  rpm. The fundamentally new armature design involves the search for new solutions for determining machine parameters, such as inductances, electromagnetic torques. The article discusses a method of equivalent circuit parameter calculation for IMRW using the “ANSYS Maxwell” in 3D mode. In order to determine stator winding leakage inductances, a static analysis of the model with the rotor removed was used. Mutual inductance is defined as the difference between stator winding phase impedance and leakage inductance. The active resistance of the magnetizing circuit and the impedance of the motor can be determined using the IMRW no-load and short-circuit characteristics obtained in ANSYS Maxwell. The paper also provides an example of calculating the mechanical characteristics of a motor using the analytical method (AM). This involves the use of equivalent circuit parameters, and the finite element method (FEM). The use of FEM for calculating the mechanical characteristics implies the analysis of IMRW in a dynamic mode. This allows the electromagnetic torque to be determined at a user-specified rotor speed. In conclusion, a comparative analysis of the parameters of a classic engine and IMRW engine, of the same size, is given. Recommendations are given for further improvement of the design of IMRW engines.

**Keywords:** induction motor; electromagnetic torque; equivalent circuit; inductances; ANSYS Maxwell

**For citation:** Tikhonova O.V., Malygin I.V., Plastun A.T. The equivalent circuit parameters calculation of induction motors with ring windings. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering.* 2022;22(1):21–35. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220103

### Введение

Постоянное увеличение производства атомной энергии в современном мире вызывает рост количества ядерных отходов, которые необходимо утилизировать. Технология переработки радиоактивного топлива представляет собой процесс, происходящий в специальной радиационно-защитной камере, где одной из главных составных частей перерабатываемых устройств являются асинхронные двигатели малой и средней мощности, вынужденные работать в условиях высокой температуры и радиации. Это приводит к быстрому разрушению органической изоляции обмоток статора машины и, как следствие, необходимости осуществлять полную ее замену, так как двигатели данного типа не являются ремонтпригодными.

По данным [1–5] срок службы асинхронных двигателей с органической изоляцией, работающих в условиях повышенной радиации, не превышает 5 месяцев.

Для электрических двигателей малой мощности, предназначенных для работы на предприятиях по переработке радиоактивных отходов, в [6, 7] предложен принцип создания перемещающегося

вокруг оси вращения воображаемой цилиндрической поверхности разноименнополюсного магнитного поля путем размещения  $2m$  катушек кольцевого типа и чередования геометрии магнитных масс различной конфигурации. Катушки кольцевого типа выбраны с целью минимизации и типичности углов изгиба изоляции обмоточного провода, а также с целью получения возможности нанесения дополнительной изоляции на провод в любом месте витка в процессе изготовления катушки при применении неорганической, например, керамической изоляции.

Геометрические оси всех катушек кольцевого типа якорной многофазной обмотки совпадают между собой и осью вращения воображаемой поверхности, относительно которой создается перемещающееся разноименнополюсное магнитное поле. Магнитные массы охватывают каждую из катушек и имеют различную конфигурацию. На рис. 1а показаны геометрические формы магнитных масс статора, размещение в пространстве и порядок их сопряжения для случая, когда число пар полюсов равно единице –  $p = 1$ . На рис. 1б показано размещение катушек фаз кольцевого типа относительно

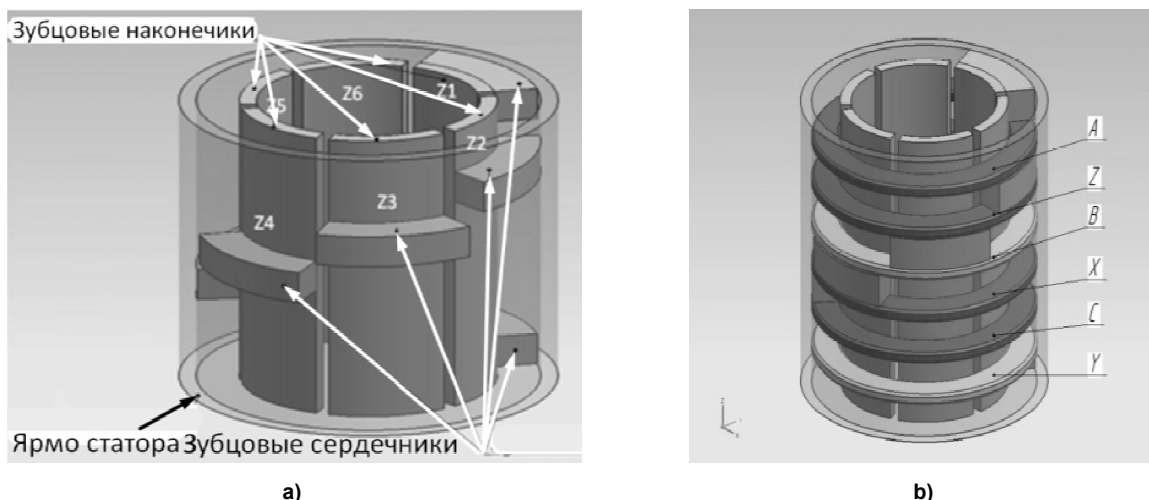


Рис. 1: а – геометрические формы магнитных масс в пространстве и порядок их сопряжения при  $p = 1$ ;  
б – размещение катушек фаз кольцевого типа относительно магнитных масс  
Fig. 1: a – geometric forms of magnetic masses in space and the order of their conjugation at  $p = 1$ ;  
b – placement of ring-type phase coils relative to magnetic masses

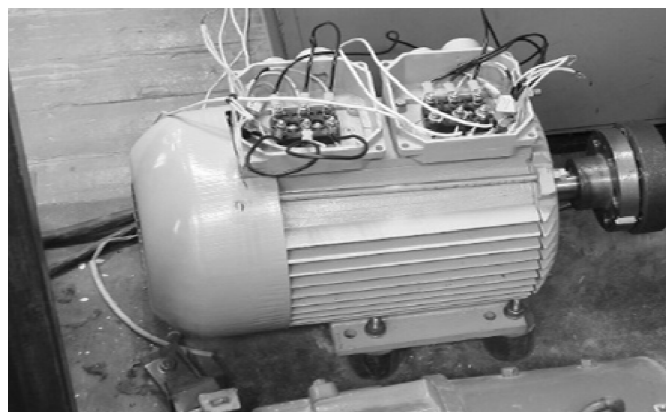


Рис. 2. Опытный образец АДКО  
Fig. 2. ADKO prototype

магнитных масс. Магнитная система ротора имеет классическое исполнение. На рис. 2 изображен опытный образец асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками (АДКО), разработанный на кафедре «Электротехника» УрФУ совместно с заводом «Уралэлектромаш» (г. Каменск-Уральский).

#### Постановка задачи

Опытный образец АДКО (см. рис. 2) выполнен в тех же габаритах, что и серийный двигатель классического исполнения АО2-32-6, для числа пар полюсов обмотки статора  $p = 3$  и представляет собой две последовательно соединенные в каскад машины, статоры которых сдвинуты друг относительно друга на 30 электрических градусов вокруг оси вращения; роторы двигателя имеют общую короткозамкнутую клетку.

Основной математической моделью АДКО с двумя статорами, описывающей процессы, происходящие в машине, является, как и в случае двигателя классического исполнения, схема замещения,

представленная на рис. 3. Определение параметров схемы замещения АДКО – одна из важных задач, так как именно с их помощью можно не только описать рабочий процесс в двигателе, но и определить его механическую характеристику, а значит, оценить технические параметры принципиально новой конструкции двигателя, такие как пусковой и максимальный моменты [8–13].

На рис. 3:

$R_{11}$  и  $R_{12}$  – активное сопротивление обмотки статора первой и второй машин соответственно;

$R'_{21}$  и  $R'_{22}$  – приведенное активное сопротивление обмотки ротора первой и второй машин соответственно;

$R_{m1}$  и  $R_{m2}$  – активное сопротивление контура намагничивания первой и второй машин соответственно;

$X_{m1}$  и  $X_{m2}$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания первой и второй машин соответственно;

$X'_{21}$  и  $X'_{22}$  – приведенное индуктивное со-

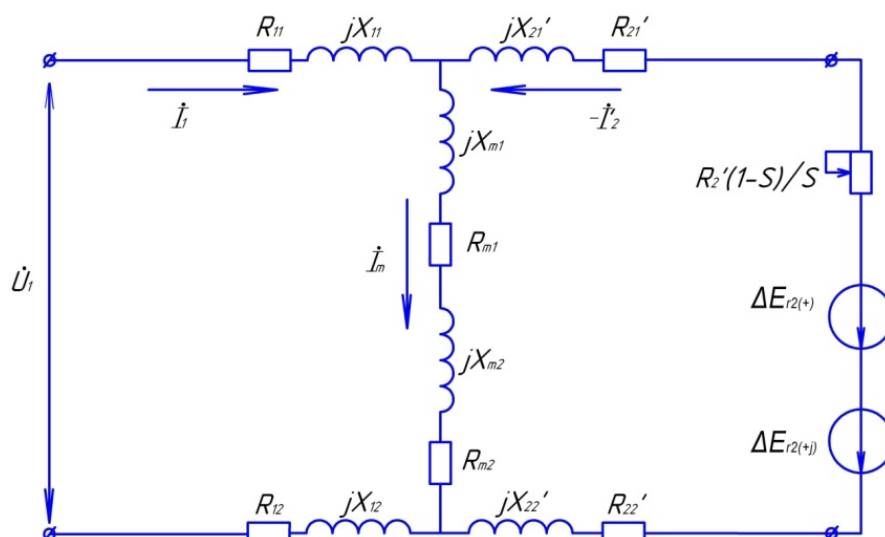


Рис. 3. Схема замещения АДКО с двумя статорами  
Fig. 3. The equivalent circuit of ADKO with two stators

противление обмотки ротора первой и второй машин соответственно;

$X_{11}$  и  $X_{12}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток статора и ротора первой и второй машин соответственно;

$\Delta \dot{E}_{r2(+)}$ ;  $\Delta \dot{E}_{r2(+j)}$  – векторы, учитывающие сдвиг в пространстве одной из половин двигателя.

В данной статье будет рассматриваться расчетная модель АДКО, для которой справедливо следующее:

- учет наличия пазов в зубцовом сердечнике статора (рис. 4);
- коэффициент заполнения магнитного ядра сталью принят равным единице  $K_{3,c} = 1$ ;
- в пазах ярма статора размещены магнитные вставки с целью уменьшения магнитного сопротивления для осевой составляющей магнитного потока;
- обмотка статора выполнена трехфазной;

– каждая фаза обмотки состоит из четырех последовательно соединенных катушек;

– каждая катушка состоит из числа витков  $W = 70$ ;

– магнитная проницаемость стали двигателя – согласно характеристике намагничивания стали марки Э 2211;

– вихревые токи при решении задачи не учитываются;

– осевая длина крайнего зубцового сердечника статора принята равной 7 мм;

– осевая длина среднего зубцового сердечника статора принята равной 13 мм;

– толщина проводящей вставки над катушкой – 6 мм;

– два ротора АДКО имеют общую короткозамкнутую клетку;

– стержни ротора АДКО соединены с торцов двумя кольцами (рис. 5).

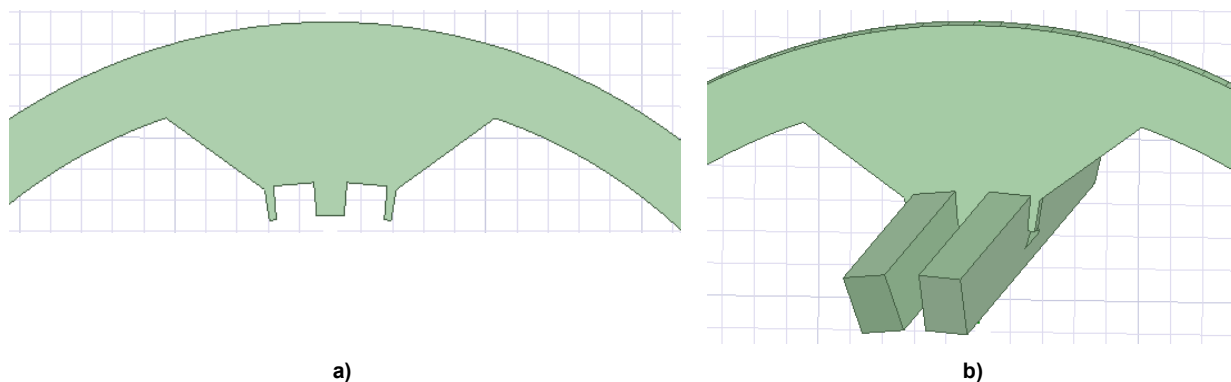


Рис. 4: а – зубцовый сердечник статора с пазами; б – зубцовый сердечник статора с вставленными в пазы зубцовыми наконечниками

Fig. 4: a – toothed stator core with grooves; b – toothed stator core with toothed tips inserted into the grooves

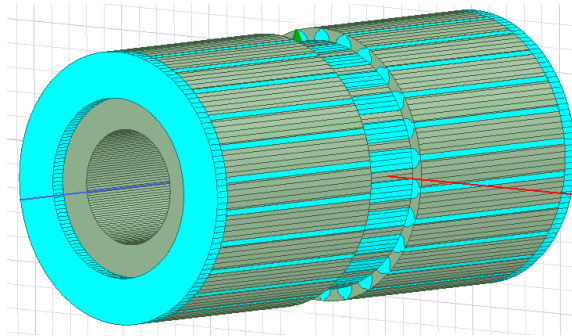


Рис. 5. Роторы АДКО, объединенные общей беличьей клеткой  
Fig. 5. ADKO rotors united by a common squirrel cage

### Определение характеристики холостого хода АДКО

Режим холостого хода двигателя АДКО, состоящего из двух последовательно соединенных машин, моделируется с помощью режима Transient программы ANSYS Maxwell.

Пользователем задается:

- скорость вращения ротора  $n = 1000$  об/мин;
- полное активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1 = 5$  Ом;
- напряжение каждой фазы обмотки статора, состоящей из четырех последовательно соединенных катушек, задается пользователем по формулам:

$$U_A = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi f \cdot t); \quad (1)$$

$$U_B = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi f \cdot t - 120^\circ); \quad (2)$$

$$U_C = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi f \cdot t + 120^\circ); \quad (3)$$

– частота сети  $f = 50$  Гц;

– фазное напряжение  $U$  в диапазоне  $0 \dots 220$  В.

На основании выполненных расчетов построим:

- график фазных напряжений обмотки статора при  $U = 127$  В, представленный на рис. 6;
- график фазных значений токов обмотки статора, изображенный на рис. 7.

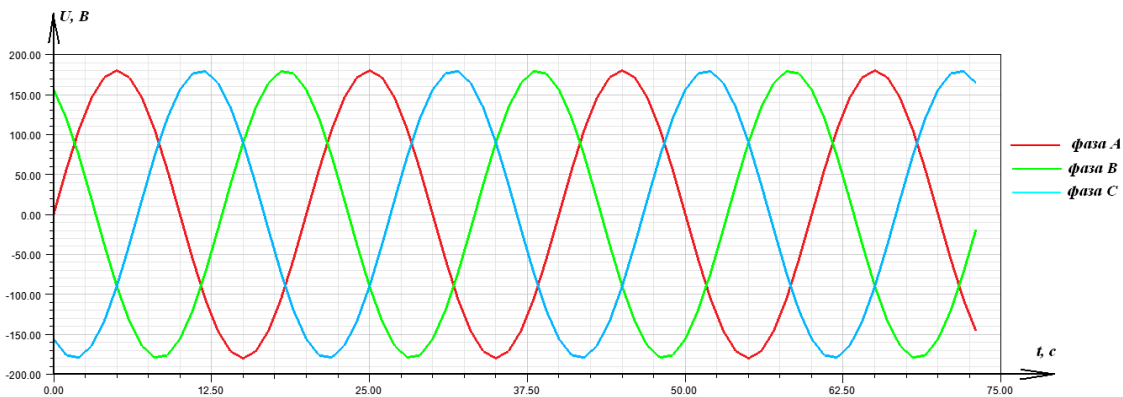


Рис. 6. Фазное напряжение обмотки статора АДКО в функции от времени  $U = f(t)$   
Fig. 6. Phase voltage of the ADKO stator winding as a function of time  $U = f(t)$

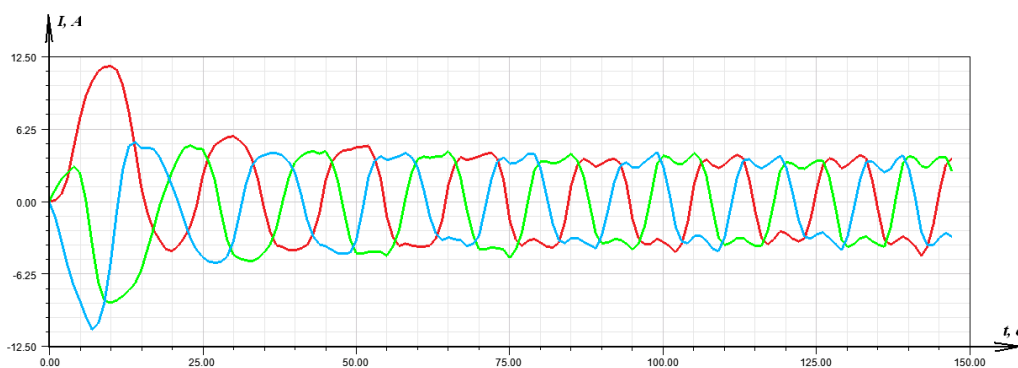


Рис. 7. Фазный ток обмотки статора АДКО в функции от времени  $I = f(t)$  в режиме холостого хода АДКО и фазном напряжении обмотки статора  $U_\phi = 127$  В  
Fig. 7. Phase current of the ADKO stator winding as a function of time  $I = f(t)$  in the ADKO idle mode and phase voltage of the stator winding  $U_\phi = 127$  В

Параметры характеристики холостого хода АДКО с двумя роторами, полученные с помощью обработки кривых из ANSYS Maxwell

Table 1

Characteristic parameters idling ADKO with two rotors, obtained by processing curves from "ANSYS Maxwell"

$U_{\phi}, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	$P_{ст}, Вт$
40	0,45	0,45	0,45	1,01	1,01	1,01	4,5
100	1,5	1,5	1,5	11,25	11,25	11,25	15,2
127	3,15	3,15	3,03	49,61	49,61	45,90	22
220	11,6	11	11	672,8	605	605	38,3

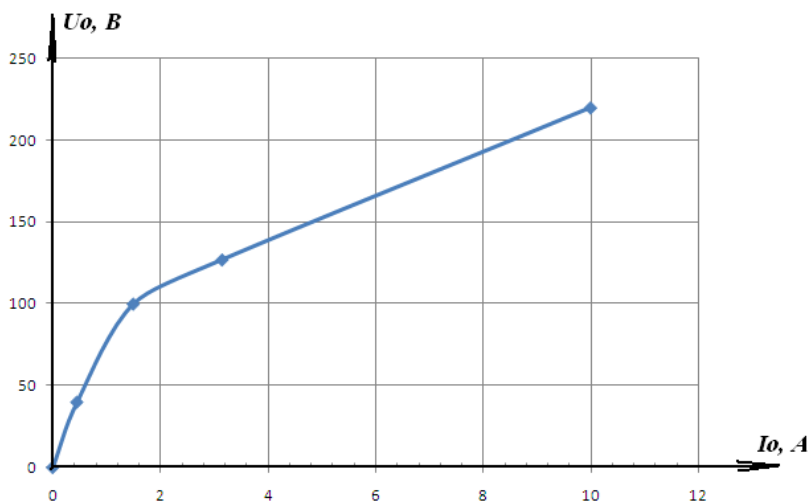


Рис. 8. Характеристика холостого хода АДКО с двумя роторами  $U_0 = f(I_0)$   
Fig. 8. Idling characteristic ADKO with two rotors  $U_0 = f(I_0)$

Меняя в программе значение фазного напряжения  $U$ , можно рассчитать характеристику холостого хода АДКО с двумя роторами:  $U_0 = f(I_0)$  при  $n = 1000$  об/мин, где  $I_0$  – ток холостого хода обмотки статора.

Параметры характеристики холостого хода АДКО с двумя статорами представлены в табл. 1.

График характеристики холостого хода представлен на рис. 8.

Согласно проведенному исследованию ток холостого хода АДКО с двумя статорами при фазном напряжении обмотки статора  $U_0 = 127$  В составляет величину, равную  $I_0 = 3,15$  А. Все дальнейшие расчеты будут выполняться для данного значения фазного тока.

#### Определение параметров схемы замещения АДКО с двумя роторами

Схема замещения АДКО с двумя роторами в режиме холостого хода приведена на рис. 9.

Определение активного сопротивления намагничивающего контура каждой машины  $R_{m1}$  и  $R_{m2}$  будет связано с возможностью программного пакета ANSYS Maxwell рассчитывать потери в стали двигателя.

Для расчета потерь в стали  $P_{ст}$  необходимо задать кривую удельных потерь  $p$ , Вт/кг, в функции от индукции  $B$ , Тл:  $p = f(B)$  для стали марки

Э2211. Данная кривая была задана для частоты  $f = 50$  Гц при толщине листа стали 0,5 мм и проводимости стали  $\sigma = 2 \cdot 10^6$  См/м.

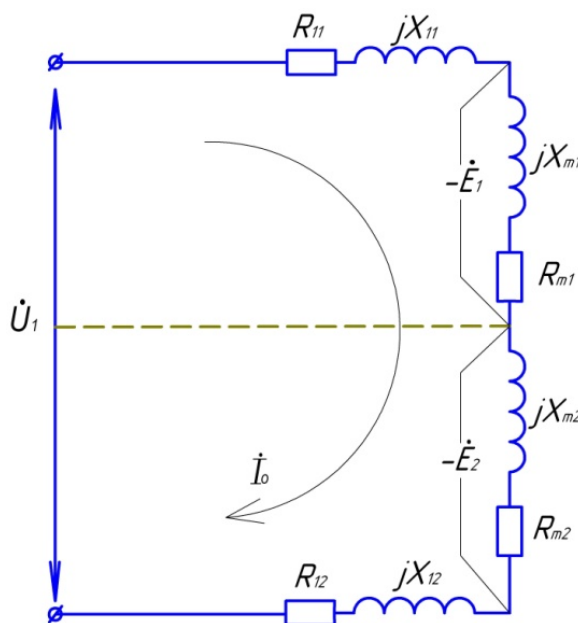


Рис. 9. Схема замещения АДКО в режиме холостого хода  
Fig. 9. Substitution circuit ADKO in idle mode

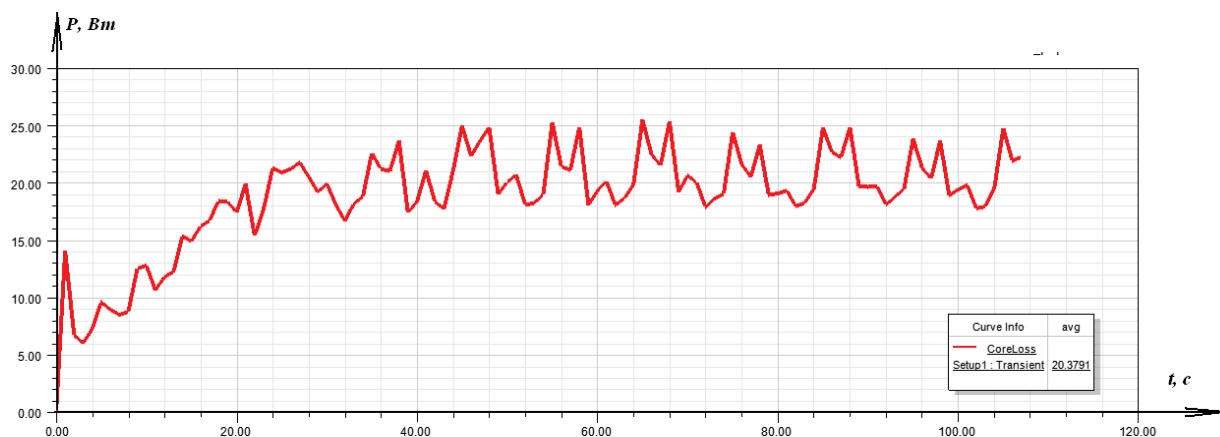


Рис. 10. Потери в стали АДКО с двумя роторами при фазном напряжении  $U_0 = 127$  В в режиме холостого хода  
Fig. 10. Losses in steel ADKO with two rotors at phase voltage  $U_0 = 127$  V in idle mode

Потери в стали включают в себя потери в железе, рассчитываемые по формуле [14]:

$$p_{ж} = k_1 \cdot B_m^2 + k_2 \cdot B_m^{1.5}; \quad (5)$$

– потери на вихревые токи:

$$p_{вт} = k_c \cdot (fB_m)^2; \quad (6)$$

– потери на гистерезис:

$$p_{г} = k_n \cdot f \cdot B_m^2. \quad (7)$$

В формулах (5)–(7) коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_c$ ,  $k_n$  рассчитываются программой автоматически с помощью кривой  $p = f(B)$ , значения индукции также берутся из данного графика.

На рис. 10 представлено расчетное значение потерь в стали АДКО при фазном напряжении  $U_0 = 127$  В в режиме холостого хода в зависимости от времени и равно  $P_{ст} = 20$  Вт.

Потери в стали связаны с активным сопротивлением контура намагничивания следующим соотношением:

$$R_0 = \frac{P_{ст}}{m \cdot I_0^2}. \quad (8)$$

Активное сопротивление контура намагничивания по (8), где  $m$  – число фаз обмотки статора АДКО:

$$R_0 = \frac{20}{3 \cdot 3,15^2} = 0,7 \text{ Ом.}$$

Тогда активное сопротивление контура намагничивания на одну фазу каждого из статоров АДКО, соединенных в каскад, составляет величину

$$R_{m1} = R_{m2} = 0,35 \text{ Ом.}$$

#### Определение индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора и взаимного индуктивного сопротивления АДКО

Расчет индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора АДКО с двумя роторами проводится для расчетной модели в режиме Magnetostatic при анализе модели с вынутым ротором. Пользователем также задается число витков в каждой

катушке обмотки статора  $W = 70$ , значение полного тока в фазе  $C$ :  $I_C = I \cdot W$ , тогда в фазах  $A$  и  $B$  –  $I_A = I_B = 0,5 \cdot I \cdot W$ , где  $I_0 = 3,15$  А – значение фазного тока холостого хода при напряжении на фазу обмотки статора, состоящую из четырех катушек,  $U_0 = 127$  В.

Пользователем рассчитывается матрица индуктивностей. Значение индуктивного сопротивления рассеяния фазы обмотки статора для каждого из двигателей в каскаде можно определить по формуле

$$X_{11} = X_{12} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{\sigma}}{2}, \quad (9)$$

где  $L_{\sigma}$  – индуктивность рассеяния фазы обмотки статора, Гн, рассчитанная в ANSYS Maxwell.

Тогда индуктивное сопротивление рассеяния каждой машины в каскаде:

$$X_{11} = X_{12} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,080469}{2} = 12,6 \text{ Ом.}$$

Расчет полной индуктивности АДКО с двумя роторами проводится в режиме Magnetostatic при анализе модели двигателя вместе с ротором. Пользователем точно так же, как и в случае определения индуктивности рассеяния, задается число витков в каждой катушке обмотки статора  $W = 70$  и значения тока статора в каждой фазе: в фазе  $C$ :  $I_C = I \cdot W$ , в фазах  $A$  и  $B$  –  $I_A = I_B = 0,5 \cdot I \cdot W$ , где  $I_0 = 3,15$  А – значение фазного тока холостого хода при напряжении на фазу обмотки статора, состоящую из четырех катушек,  $U_0 = 127$  В.

Полная индуктивность фазы АДКО, состоящей из четырех последовательно соединенных катушек, для двигателя с двумя статорами в результате расчета получилась равной  $L = 0,15954$  Гн.

Тогда полное индуктивное сопротивление фазы одного двигателя (на 2 катушки) по (9):

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,15954}{2} = 25 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура на фазу обмотки статора для каждого из двигателей в каскаде можно определить как разность полного индуктивного сопротивления фазы и индуктивного сопротивления рассеяния фазы каждого двигателя:

$$X_{m1} = X_{m2} = X - X_{11}, \quad (10)$$

где  $X$  – полное индуктивное сопротивление фазы одной машины;

$X_{11}$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы одной машины.

Согласно (10) фазное индуктивное сопротивление контура намагничивания одной машины:

$$X_{m1} = X_{m2} = 25 - 12,6 = 12,4 \text{ Ом.}$$

Схема замещения АДКО с двумя роторами в режиме холостого хода с нанесенными на схему значениями параметров представлена на рис. 11.

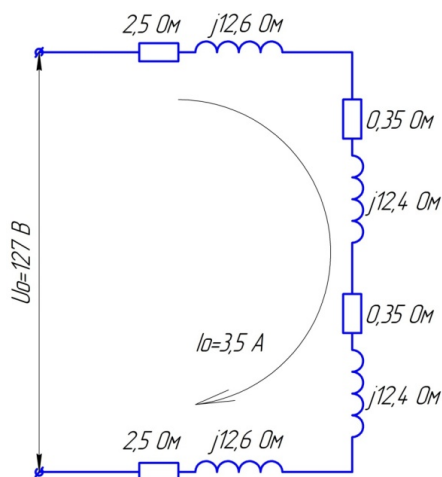


Рис. 11. Схема замещения АДКО с двумя роторами в режиме холостого хода

Fig. 11. Equivalent circuit ADKO with two rotors in idle mode

#### Определение параметров схемы замещения АДКО с двумя роторами из опыта короткого замыкания

Моделирование режима короткого замыкания АДКО с двумя роторами также выполняется с помощью режима Transient программы ANSYS Maxwell. Пользователем, как и в предыдущем случае, задается полное активное сопротивление фазы обмотки статора, состоящей из четырех последовательно соединенных катушек,  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ ; напря-

жение каждой фазы – по формулам (1)–(3), скорость вращения ротора  $n = 0$ .

Характеристика короткого замыкания АДКО с двумя роторами  $U_k = f(I_k)$  приведена в табл. 2 и на рис. 12.

Схема замещения АДКО в режиме короткого замыкания приведена на рис. 13.

Поскольку индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора АДКО  $X_1$  практически равно взаимному индуктивному сопротивлению машины  $X_m$ , что было показано выше, использовать для анализа упрощенную схему замещения в режиме короткого замыкания, присущую классическим двигателям, где пренебрегают сопротивлением контура намагничивания, не представляется возможным [15–17]. В связи с этим для определения параметров схемы замещения АДКО с двумя роторами будет использоваться полная схема замещения, представленная на рис. 3.

С использованием значений из табл. 2 проведем расчет параметров схемы замещения [18] по следующим формулам, представленным в [19, с. 295]. Расчетные параметры из опыта короткого замыкания приведены в табл. 3.

Таким образом:

– полное активное сопротивление фазы обмотки статора, состоящей из четырех катушек, для АДКО с двумя роторами  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ ;

– индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора, состоящей из четырех катушек, для АДКО с двумя роторами  $X_1 = 25,2 \text{ Ом}$ ;

– активное сопротивление контура намагничивания фазы обмотки статора, состоящей из четырех катушек, для АДКО с двумя роторами  $R_m = 0,7 \text{ Ом}$ ;

– индуктивное сопротивление контура намагничивания фазы обмотки статора, состоящей из четырех катушек, для АДКО с двумя роторами  $X_m = 24,8 \text{ Ом}$ .

Тогда полное собственное комплексное сопротивление фазы обмотки статора, состоящей из четырех катушек, для АДКО с двумя роторами можно записать, как

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 = 5 + j25,2 = 25,7 \cdot e^{j79}. \quad (11)$$

Полное комплексное сопротивление взаимной индукции фазы обмотки статора, состоящей из четырех катушек, для АДКО с двумя роторами:

$$\underline{Z}_m = R_m + jX_m = 0,7 + j24,8 = 24,8 \cdot e^{j88,4}. \quad (12)$$

Таблица 2

Расчетные параметры характеристики короткого замыкания АДКО с двумя роторами для каждой фазы, полученные с помощью ANSYS Maxwell

Table 2

Calculated parameters of the ADKO short circuit characteristic with two rotors for each phase, obtained using "ANSYS Maxwell"

$U_{\phi 2}, \text{ В}$	$I_{Ak2}, \text{ А}$	$I_{Bk2}, \text{ А}$	$I_{Ck2}, \text{ А}$	$P_{Ak2}, \text{ Вт}$	$P_{Bk2}, \text{ Вт}$	$P_{Ck2}, \text{ Вт}$
40	0,96	0,93	0,93	4,70	4,45	4,41
127	4,5	4,5	4,5	102,26	103,28	102,26
220	10	10	10	510	510	510



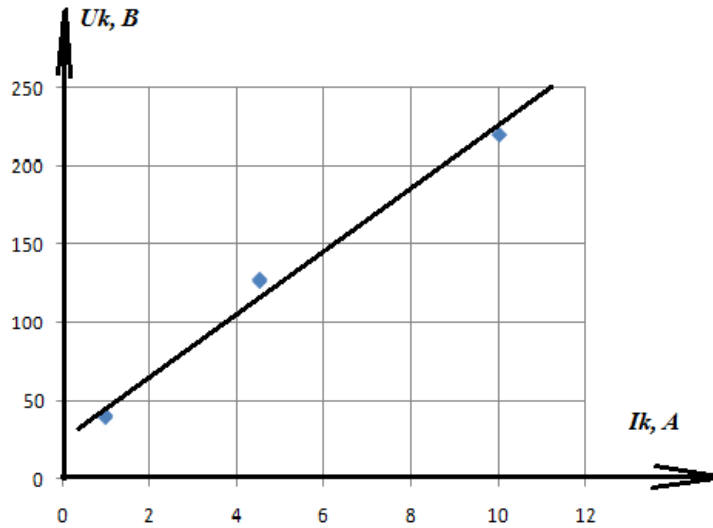


Рис. 12. Характеристика короткого замыкания АДКО с двумя роторами  
Fig. 12. Short circuit characteristic of ADKO with two rotors

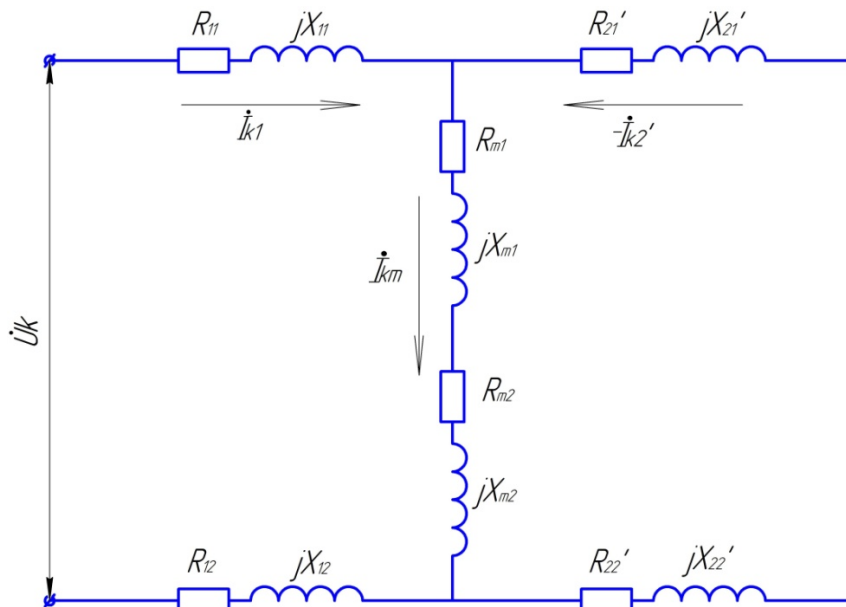


Рис. 13. Схема замещения АДКО с двумя роторами в режиме короткого замыкания  
Fig. 13. The equivalent circuit of ADKO with two rotors in the short circuit mode

Расчетные параметры схемы замещения для каждой фазы АДКО  
с двумя роторами из опыта короткого замыкания

Таблица 3

Calculated parameters of the equivalent circuit for each phase of ADKO  
with two rotors from a short circuit test

Table 3

$U_{\phi}, \text{В}$	$R_{A_2}, \text{Ом}$	$R_{B_2}, \text{Ом}$	$R_{C_2}, \text{Ом}$	$Z_{KA_2}, \text{Ом}$	$Z_{KB_2}, \text{Ом}$	$Z_{KC_2}, \text{Ом}$	$X_{KA_2}, \text{Ом}$	$X_{KB_2}, \text{Ом}$	$X_{KC_2}, \text{Ом}$
40	5,1	5,15	5,1	41,67	43,01	43,01	41,35	42,70	42,71
127	5,05	5,1	5,05	28,22	28,22	28,22	27,77	27,76	27,77
220	5,1	5,1	5,1	22,00	22,00	22,00	21,40	21,40	21,40

Полное собственное комплексное приведенное сопротивление фазы обмотки роторов АДКО:

$$\underline{Z}'_2 = R'_2 + jX'_2, \quad (13)$$

где  $R'$  и  $X'_2$  – параметры, которые необходимо определить.

Фазный сдвиг между током и напряжением можно определить, опираясь на рис. 12, согласно которому в режиме короткого замыкания при токе  $I_k = 3,15 \text{ А}$  величина напряжения  $U_k = 92 \text{ В}$ , а мощность фазы составляет величину  $P_k = 60,5 \text{ Вт}$ .

Тогда косинус угла сдвига между током и напряжением фазы обмотки статора АДКО:

$$\cos\varphi = \frac{P_k}{U_k I_k} = \frac{60,5}{92 \cdot 3,15} = 0,209. \quad (14)$$

Угол сдвига между током и напряжением фазы обмотки статора АДКО  $\varphi$  равен

$$\varphi = \arccos\varphi = \arccos(0,209) = 77,9^\circ. \quad (15)$$

Зададим комплексное значение напряжения короткого замыкания, приняв, что вектор напряжения целиком лежит на вещественной оси комплексной плоскости:

$$U_k = 92 \cdot e^{j0} = 92 \text{ В.}$$

При активно-индуктивной нагрузке ток отстает от напряжения на угол  $\varphi$ , тогда комплексное значение тока короткого замыкания:

$$I_k = 3,15 \cdot e^{-77,9j}.$$

Тогда полное комплексное сопротивление фазы АДКО в режиме короткого замыкания:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_k &= \frac{U_k}{I_k} = \frac{92 \cdot e^{j0}}{3,15 \cdot e^{-79,7j}} = 29,2 e^{77,9j} = \\ &= 6,1 + j28,56. \end{aligned} \quad (16)$$

Заменяв активные и индуктивные сопротивления на схеме рис. 13 на комплексы, получим схему на рис. 14.

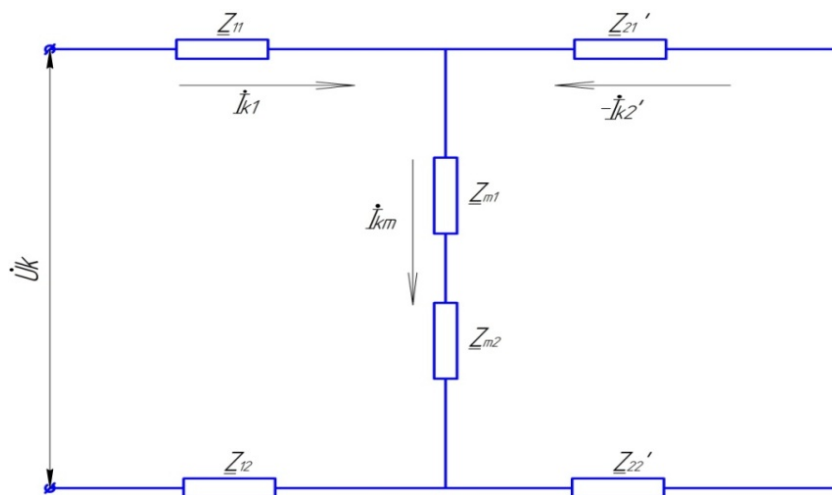


Рис. 14. Схема замещения АДКО с двумя роторами с применением полных комплексных сопротивлений в режиме короткого замыкания  
Fig. 14. The equivalent circuit of ADKO with two rotors using full complex resistances in the short circuit mode

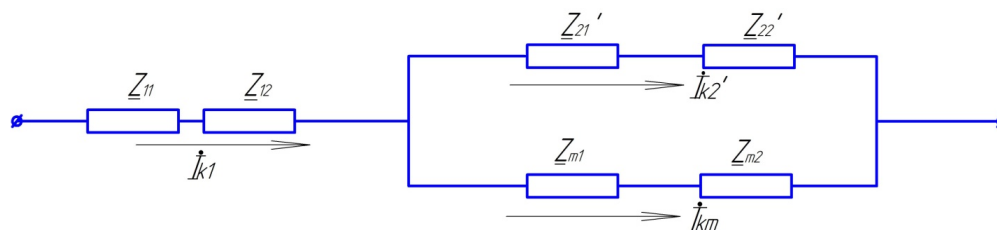


Рис. 15. Схема замещения АДКО с двумя роторами с применением полных комплексных сопротивлений в режиме короткого замыкания в упрощенном виде  
Fig. 15. The equivalent circuit of ADKO with two rotors using full complex resistances in the short circuit mode in a simplified form

Как видно из рис. 14, комплексные сопротивления контура намагничивания соединены параллельно по отношению к собственным роторным комплексам (рис. 15).

Тогда, зная полное сопротивление фазы машины в режиме короткого замыкания и полное собственное сопротивление фазы обмотки статора, можно определить общее комплексное фазное сопротивление роторного и намагничивающего контуров  $Z_{m-r}$ :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{m-r} &= \underline{Z}_k - \underline{Z}_1 = (6,1 + j28,2) - (5 + j25,2) = \\ &= 1,1 + j3,36 = 3,54 e^{j72}. \end{aligned} \quad (17)$$

С другой стороны, сопротивление  $Z_{m-r}$  можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{m-r} &= \frac{\underline{Z}_m \cdot \underline{Z}'_2}{\underline{Z}_m + \underline{Z}'_2} = \\ &= \frac{24,8 \cdot e^{j88,4} \cdot \underline{Z}'_2}{24,8 \cdot e^{j88,4} + \underline{Z}'_2} = 3,54 e^{j72}. \end{aligned} \quad (18)$$

Решая уравнение (19) относительно  $\underline{Z}'_2$ , получим:

$$\begin{aligned} 3,54 e^{j72} &= \frac{24,8 \cdot e^{j88,4} \cdot \underline{Z}'_2}{24,8 \cdot e^{j88,4} + \underline{Z}'_2}; \\ \underline{Z}'_2 &= 4,1 \cdot e^{j69,2} = 1,45 + j3,83. \end{aligned} \quad (19)$$

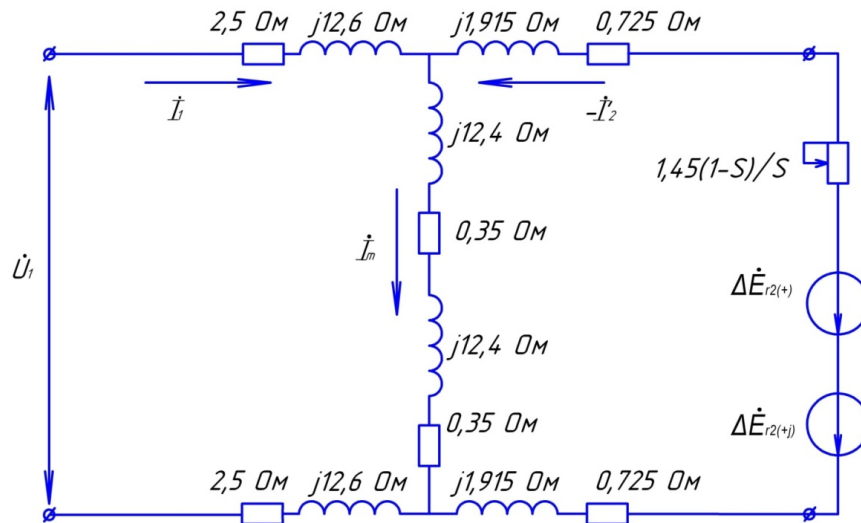


Рис. 16. Схема замещения АДКО с двумя роторами с нанесенными на схему значениями сопротивлений в абсолютных единицах  
Fig. 16. The equivalent circuit of ADKO with two rotors with resistance values printed on the circuit in absolute units

Согласно решенному уравнению (19) приведенное активное сопротивление ротора АДКО  $R'_2 = 1,45 \text{ Ом}$ , приведенное индуктивное сопротивление ротора  $X'_2 = 3,83 \text{ Ом}$ .

Схема замещения АДКО с двумя роторами с нанесенными на схему значениями сопротивлений приведена на рис. 16.

### Расчет механической характеристики АДКО с двумя роторами

#### 1. С помощью конечно-элементного анализа (МКЭ)

В данном случае расчет механической характеристики  $M=f(S)$  АДКО, состоящего из двух последо-

вательно соединенных машин, при фазном напряжении  $U = 127/220 \text{ В}$  (для четырех последовательно соединенных катушек в фазе), при допущениях, указанных выше, проводится с помощью режима Transient прикладного программного пакета ANSYS Maxwell.

При этом пользователем задается скорость вращения ротора  $n$  в диапазоне  $0 \dots 1000$  об/мин; полное активное сопротивление фазы обмотки статора, состоящей из четырех последовательно соединенных катушек,  $R_A = R_B = R_C = 5 \text{ Ом}$ , напряжение каждой фазы задается по формулам (1)–(3).

Программа представляет решение в виде графика зависимости электромагнитного момента от времени  $M = f(t)$  (рис. 17).



Рис. 17. График электромагнитного момента АДКО с двумя роторами в функции от времени  $M = f(t)$  и скорости вращения ротора от времени  $n = f(t)$  при фазном напряжении  $U = 127 \text{ В}$  и скорости вращения ротора  $n = 900$  об/мин  
Fig. 17. Graph of the electromagnetic torque of ADKO with two rotors as a function of time  $M = f(t)$  and rotor speed versus time  $n = f(t)$  at phase voltage  $U = 127 \text{ В}$  and rotor speed  $n = 900 \text{ rpm}$

## 2. С помощью аналитического расчета (АМ)

Для расчета механической характеристики АДКО с двумя статорами при фазном напряжении  $U = 127/220$  В при условии, что в фазе обмотки статора имеется по четыре последовательно соединенных катушки, число витков в каждой катушке  $W = 70$ , будет использована формула, представленная в [20, с. 527.]:

$$M = \frac{m \cdot U^2 \cdot \frac{R'_2}{S}}{\frac{2\pi f}{p} \left[ \left( X + c'' \frac{R'_2}{S} \right)^2 + \left( R + c' \frac{R'_2}{S} \right)^2 \right]}, \quad (20)$$

где  $m$  – число фаз обмотки статора;  
 $p$  – число пар полюсов двигателя;  
 $f$  – частота сети, Гц;  
 $S$  – скольжение;  
 $U$  – фазное напряжение обмотки статора, В;  
 $R'_2$  – приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

$X, R, c'$  и  $c''$  – расчетные величины согласно [20].

Задаваясь параметрами схемы замещения и скольжением в диапазоне  $(0,1 \dots 1)S$ , можно рассчитать механическую характеристику АДКО с двумя роторами  $M = f(S)$  по формуле (20). Графики механических характеристик АДКО, рассчитанных двумя способами при различных значениях фазного напряжения обмотки статора, представлены на рис. 18.

## Выводы

1. Классический двигатель АО2-32-6, выполненный на тех же диаметрах, что и исследуемый двигатель типа АДКО, имеет значение номинального момента  $M_{\text{ном}} = 21$  Нм, максимального –  $M_{\text{max}} = 46,2$  Нм, пускового –  $M_{\text{п}} = 37,8$  Нм.

2. Для модели АДКО расчетное значение индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора составляет величину  $X_1 = 25,2$  Ом. При фазном напряжении  $U = 127$  В значение пускового тока двигателя не будет превышать значения  $I_{\text{п}} \approx \frac{U}{X_1} \approx \frac{127}{25,2} \approx 5$  А, в то время как величина

номинального тока классического двигателя той же мощности и габаритов  $I_{\text{ном}} = 9,3$  А. Таким образом, пусковой ток АДКО при  $U = 127$  В даже меньше, чем номинальный ток для двигателя АО2-32-6, что не дает возможности получить необходимые значения моментов.

3. Увеличение фазного напряжения до значения  $U = 220$  В приводит к увеличению максимального и пускового моментов АДКО в три раза (см. рис. 18), но эти значения все же ниже, чем для классического двигателя той же мощности.

4. Определение механических характеристик машины двумя методами – МКЭ и АМ – позволяет убедиться в правдивости проведенных расчетов, так как погрешность методов друг относительно друга составляет менее 10 %.

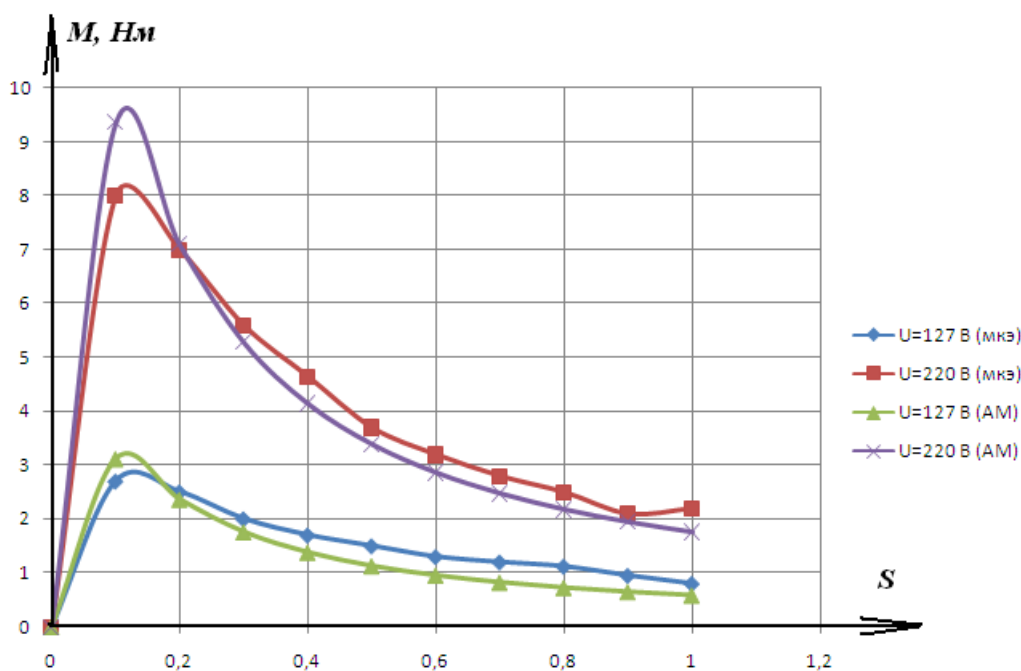


Рис. 18. Механические характеристики АДКО с двумя роторами, рассчитанные методами МКЭ и АМ при фазном напряжении  $U = 127/220$  В

Fig. 18. Mechanical characteristics of ADKO with two rotors, calculated by the FEM and AM methods at phase voltage  $U = 127/220$  V

5. Приведенное в работе определение параметров схемы замещения АДКО с двумя роторами показывает, что индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора двигателя  $X_1$  и взаимное индуктивное сопротивление  $X_m$  отличаются друг от друга менее чем на 1 %, следовательно, в дальнейшем исследовании необходимо предпринимать решения для изменения существующей конструкции двигателя так, чтобы уменьшить значение  $X_1$ .

6. Таким образом, на том же диаметре статора, в тех же габаритах, что и у классического двигателя, нет возможности получить ту же величину

электромагнитного момента. В связи с этим необходимо либо переходить на другое число пар полюсов, например,  $p = 1$ , сохранив величину существующих диаметров статора и ротора, что позволит увеличить размеры зубцового наконечника, снизить насыщение стали в области соединения зубцового наконечника с зубцовым сердечником, либо увеличивать диаметр ротора, переходя в следующий габарит при сохранении соотношения  $ID^2 = \text{const}$ . Увеличение диаметра ротора позволит уменьшить осевую длину активного железа, что позволит снизить значение  $X_1$ .

### Список литературы

1. High temperature nanocomposite insulation for high power density machines / W. Yin, R. Flanagan, R. Zhao et al. Текст: электронный // 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD). Montpellier, France, 2016. DOI: 10.1109/ICD.2016.7547620

2. Nanostructured-coated XPLE showing improved electrical properties: Partial discharge resistance and space charge accumulation / D. Fabiani, G. Montanari, A. Cavallini et al. Текст: электронный // Proceedings of 2011 International Conference on Electrical Insulating Materials (ISEIM). Kyoto, Japan, 2011. DOI: 10.1109/ISEIM.2011.6826265

3. Nanostructured hybrid sheets for electrotechnical high-power insulating applications: The sol-goal route / L. Vanet, G. Camino, J. Castellon et al. Текст: электронный // 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Montreal, QC, Canada, 2012. DOI: 10.1109/CEIDP.2012.6378931

4. Ильин А.Н. Полимерцемент как электроизоляционный материал для электротехнических систем // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 1 (26). С. 25–27.

5. Нанооксидные материалы для повышения эксплуатационных характеристик машин переменного тока / М.В. Баранов, А.Р. Бекетов, В.И. Денисенко и др. // Труды Свердловского научно-исследовательского института химического машиностроения. Серия: Оборудование для оснащения технологических производств. 2012. Вып. 20 (84). С. 68–76.

6. Патент 2121207 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> H02K 1/16. Якорь многофазной электрической машины / А.Т. Пластун; заявитель А.Т. Пластун. № 96111144/09; заявл. 09.06.1996; опубл. 27.10.1998; Бюл. № 30. 10 с.

7. Патент 2684898 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> H02K 1/16, H02K 3/238. Якорь многофазной электрической машины / А.С. Бердичевский, А.Т. Пластун, О.В. Тихонова и др.; заявитель УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. № 2018111892; заявл. 02.04.2018; опубл. 16.04.2019; Бюл. № 11. 38 с.

8. Optimal design of Axial-Flux Induction Motors based on an improved analytical model / S. Kahourzade, A. Mahmoudi, E. Roshandel, Z. Cao. Текст: электронный // Energy. 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121552

9. Boughrara K., Dubas F., Ibtouen R. 2-D analytical prediction of eddy currents, circuit model parameters, and steady-state performances in solid rotor induction motors // IEEE Transactions on Magnetics. 2014. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2342666

10. Hong C., Huang W., Hu Z. Design and analysis of a high-speed dual stator slotted solid-rotor axial-flux induction motor // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2019. P. 71–79. DOI: 10.1109/TTE.2018.2880301

11. Dianati B., Kahourzade S., Mahmoudi A. Analytical design of axial-flux induction motors // 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. DOI: 10.1109/VPPC46532.2019.8952172

12. Eremochkin S., Dorokhov D. Analysis of Methods for Calculating Parameters of the Equivalent Circuit of a Squirrel Cage Induction Motor // 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). 2021. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462297

13. Efficient Approach Based on Equivalent Electric Circuit Model to Determine Rotor Bar Currents of Squirrel Cage Induction Machines / J. Marault, A. Tounzi, F. Gillon, M. Hecquet. Текст: электронный // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. DOI: 10.1109/TMAG.2020.3011612

14. Simulation Calculation of Loss of Induction Traction Motor / N. Duan, X. Ma, S. Lu, S. Wang // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2020. P. 599–606. DOI: 10.1007/978-981-33-6609-1\_54

15. An Analytical-Numerical Approach to Model and Analyse Squirrel Cage Induction Motors / A. Marfoli, L. Papini, P. Bolognesi, C. Gerada // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2021. P. 421–430. DOI: 10.1109/TEC.2020.3007385

16. Analytical Calculations of Magnetic Fields Induced by MMF Spatial Harmonics in Multiphase Cage Rotor Induction Motors / H. Chen, J. Zhang, J. Zhao et al. // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3103643

17. Vassent E., Meunier G., Foggia A. Simulation of induction machines using complex magnetodynamic finite element method coupled with the circuit equations // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1991. P. 4246–4249. DOI: 10.1109/20.105039
18. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2011. 767 с. ISBN 978-5-9916-0904-3.
19. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
20. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учеб. для вузов: в 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МЭИ, 2006. Т. 2. 652 с. ISBN 5-903072-52-6.

### References

1. Yin W., Flanagan R., Zhao R., Artus D., Aigler C., Jia X., Huang H. High temperature nanocomposite insulation for high power density machines. In: *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, Montpellier, France, 3–7 July 2016. DOI: 10.1109/ICD.2016.7547620
2. Fabiani D., Montanari G., Cavallini A., Saccani A., Toselli M. Nanostructured-coated XPPE showing improved electrical properties: Partial discharge resistance and space charge accumulation. In: *Proceedings of 2011 International Conference on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, Kyoto, Japan, 6–10 Sept. 2011. DOI: 10.1109/ISEIM.2011.6826265
3. Banet L., Camino G., Castellon J., Couderc H., Dellea O. Nanostructured hybrid sheets for electrotechnical high-power insulating applications: The sol-gel route. In: *2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Montreal, QC, Canada, 14–17 Oct. 2012. DOI: 10.1109/CEIDP.2012.6378931
4. Iljin A.N. Polymer-modified cement as electroinsulated material for electrotechnical systems. *Electrical systems and complexes*. 2015; 1(26):25–27. (In Russ.)
5. Baranov M.V., Beketov A.R., Denisenko V.I. et al. [Nano-oxide materials for improving the performance of AC machines]. *Proceedings of the Sverdlovsk Scientific Research Institute of Chemical Engineering. Series: Equipment for equipping technological production*. 2012; 20(84):68–76. (In Russ.)
6. Plastun A. *Yakor' mnogofaznoy elektricheskoy mashiny* [Anchor of a multiphase electric machine]. Patent RF 2121207, IPC N 02 K 1/16, no. 96111144/09; decl. 06.09.96; publ. 10.27.98, Bul. no. 30. 10 p.
7. Berdichevsky A., Lopatin E., Nedzelsky V., Beraya R. et al. *Yakor' mnogofaznoy elektricheskoy mashiny* [Anchor of a multiphase electric machine]. Patent RF 2684898, IPC N 02 K 1/16, no. 2012111892; decl. 04.02.2018; publ. 04.16.2019, Bul. no. 11. 38 p.
8. Kahourzade S. Optimal design of Axial-Flux Induction Motors based on an improved analytical model. *Energy*. 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121552
9. Boughrara K., Dubas F., Ibtouen R. 2-D analytical prediction of eddy currents, circuit model parameters, and steady-state performances in solid rotor induction motors. In: *IEEE Transactions on Magnetics*, 14 July 2014. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2342666
10. Hong C., Huang W., Hu Z. Design and analysis of a high-speed dual stator slotted solid-rotor axial-flux induction motor. In: *IEEE Transactions on Transportation Electrification*; 2019. P. 71–79, DOI: 10.1109/TTE.2018.2880301
11. Dianati B., Kahourzade S., Mahmoudi A. Analytical design of axial-flux induction motors. In: *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. DOI: 10.1109/VPPC46532.2019.8952172
12. Eremochkin S., Dorokhov D. Analysis of Methods for Calculating Parameters of the Equivalent Circuit of a Squirrel Cage Induction Motor. In: *2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*; 2021. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462297
13. Marault J., Tounzi A., Gillon F., Hecquet M. Efficient Approach Based on Equivalent Electric Circuit Model to Determine Rotor Bar Currents of Squirrel Cage Induction Machines. In: *IEEE Transactions on Magnetics*. 2021. DOI: 10.1109/TMAG.2020.3011612
14. Duan N., Ma X., Lu S., Wang S. Simulation Calculation of Loss of Induction Traction Motor. *Lecture Notes in Electrical Engineering*; 2020. P. 599–606. DOI: 10.1007/978-981-33-6609-1\_54
15. Marfoli A., Papini L., Bolognesi P., Gerada C. An Analytical-Numerical Approach to Model and Analyse Squirrel Cage Induction Motors. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion*; 2021. P. 421–430. DOI: 10.1109/TEC.2020.3007385
16. Chen H., Zhang J., Zhao J. et al. Analytical Calculations of Magnetic Fields Induced by MMF Spatial Harmonics in Multiphase Cage Rotor Induction. In: *IEEE Transactions on Magnetic*; 2021. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3103643
17. Vassent E., Meunier G., Foggia A. Simulation of induction machines using complex magnetodynamic finite element method coupled with the circuit equations. In: *IEEE Transactions on Magnetics*; 1991. P. 4246–4249. DOI: 10.1109/20.105039

18. Kopylov I. *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow: Yurayt, 2011. 767 p. (In Russ.)
19. Voldek A. *Elektricheskiye mashiny* [Electric machines]. Leningrad: Energiya, 1974. 840 p. (In Russ.)
20. Ivanov-Smolensky A. *Elektricheskiye mashiny* [Electric machines]. Moscow: MEI, 2006. 652 p. (In Russ.)

***Информация об авторах***

**Тихонова Ольга Валерьевна**, ассистент, кафедра «Электротехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; olga\_tihonova\_91@mail.ru.

**Малыгин Игорь Вячеславович**, канд. техн. наук, доц., кафедра «Электротехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; mitrael\_1@mail.ru.

**Пластун Анатолий Трофимович**, д-р техн. наук, проф., кафедра «Электротехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; a.t.plastun@urfu.ru.

***Information about the authors***

**Ol'ga V. Tikhonova**, Assistant, Department of Electrical Engineering, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; olga\_tihonova\_91@mail.ru.

**Igor' V. Malygin**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of Electrical Engineering, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; mitrael\_1@mail.ru.

**Anatoliy T. Plastun**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Electrical Engineering, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; a.t.plastun@urfu.ru.

*Статья поступила в редакцию 28.11.2021; одобрена после рецензирования 04.02.2022; принята к публикации 21.02.2022.*

*The article was submitted 28.11.2021; approved after reviewing 04.02.2022; accepted for publication 21.02.2022.*