



**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ  
АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА ГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА №1  
ООО «ГАЗПРОМ ДОБЫЧА ЯМБУРГ» С ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМОЙ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ПРОГРАММЕ MATLAB/SIMULINK**

**Л.Р. Масков, В.Ю. Корнилов**

**Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия**

*maskov.linar@mail.ru*

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Разработать модель в среде MATLAB/SIMULINK для системы мехатронных модулей движения (ММД) электротехнического комплекса (ЭТК), имеющего в своём составе аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа с централизованной системой электроснабжения газового промысла (ГП) №1 ООО «Газпром добыча Ямбург». Произвести анализ энергетической эффективности ММД ЭТК АВО. Выполнить экспериментальное исследование модели ММД ЭТК АВО в динамических режимах для определения закономерности влияния одиночных (групповых) запусков на перегрузку источника электроснабжения. Разработать алгоритм включения для ММД ЭТК АВО при прямых пусках асинхронных двигателей (АД), обеспечивающий восстановление технологического режима в течение оптимального времени после исчезновения напряжения для централизованной системы электроснабжения. МЕТОДЫ. Представленные в работе результаты получены с использованием методов теории электрических и магнитных цепей, теории электропривода и электрических машин, методов оптимизации систем электроснабжения, аналитических и численных методов прикладной математики, методов математического и компьютерного моделирования. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности построения и моделирования ЭТК ГП в среде MATLAB/SIMULINK с централизованной системой электроснабжения. Выполнен сравнительный анализ существующих методик и расчёт параметров схем замещения ММД ЭТК ГП. Произведен ориентировочный расчёт механических и инерционных характеристик для создания модели нагрузки (момента сопротивления) для АД. Создана модель ММД ЭТК АВО, максимально приближенная к реально существующей системе на основе каталожных (паспортных) данных отдельных элементов ЭТК. Выполнен анализ и разработаны предложения для повышения энергетической эффективности ММД ЭТК АВО и предложены алгоритмы, обеспечивающие оптимальный прямой запуск группы вентиляторов АВО в течение заданного времени после исчезновения напряжения без перегрузки источника электроснабжения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На основе результатов компьютерного моделирования были выявлены особенности функционирования ММД ЭТК АВО, требующие дальнейшего изучения и разработки корректирующих мероприятий по повышению энергетической эффективности и надежности системы электроснабжения ГП. Комбинирование прямых запусков одиночных (групповых) вентиляторов АВО, полученное на данном этапе исследования модели ММД ЭТК АВО, позволит создать основу (алгоритм) для автоматизированной системы управления данным комплексом, что обеспечит восстановление технологического режима в течение оптимального времени после исчезновения напряжения без перегрузки централизованного источника электроснабжения. Расчёт параметров отдельных элементов модели ММД ЭТК АВО позволит использовать данные для создания других моделей ЭТК ГП, что позволит проводить углубленное исследование и совершенствование энергетической эффективности всей системы электроснабжения ГП.

**Ключевые слова:** мехатронный модуль движения, модель ММД ЭТК АВО, расчёт параметров модели ММД ЭТК, модель момента сопротивления вентилятора, инерционная характеристика вентилятора, алгоритм групповых запусков АД.

**Для цитирования:** Масков Л.Р., Корнилов В.Ю. Разработка модели электротехнического комплекса для аппаратов воздушного охлаждения газа газового промысла №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» с централизованной системой электроснабжения в программе matlab/simulink// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 50-71. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-50-71.

**DEVELOPMENT OF A SYSTEM MODEL OF MECHATRONIC MODULES  
FOR GAS AIR COOLING DEVICE MOVEMENT AT GAS FIELD NO.1  
OOO GAZPROM DOBYCHA YAMBURG WITH CENTRALIZED POWER  
SUPPLY SYSTEM IN MATLAB/SIMULINK PROGRAM**

**LR. Maskov, VYu. Kornilov**

**Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia**  
*Maskov.linar@mail.ru*

**Abstract:** *THE PURPOSE.* To develop a model in MATLAB/SIMULINK environment for the system of mechatronic movement modules (MMD) of the electrical complex, which includes gas air coolers with centralized system of power supply of the gas field 1 of "Gazprom dobycha Yamburg" LLC. To analyze the energy efficiency of MMD ETC ACHE. To perform the experimental research of the EMD EMD ETC ACHE model in the dynamic modes in order to determine the regularity of the influence of single (group) starts on the power supply source overload. To develop a switching algorithm for MMD ETK AHE at direct starts of asynchronous motors (AD), providing restoration of the technological mode within the optimum time after the voltage disappearance for the centralized power supply system. *METHODS.* The results presented in work are received with use of methods of the theory of electric and magnetic circuits, the theory of electric drive and electric machines, methods of optimization of power supply systems, analytical and numerical methods of applied mathematics, methods of mathematical and computer modeling. *RESULTS.* In article urgency of a theme is described, features of construction and modelling of ETK GP in the environment MATLAB/SIMULINK with the centralized system of power supply are considered. The comparative analysis of existing methods and calculation of parameters of the substitution schemes of the MMD ETK GP was carried out. Approximate calculation of mechanical and inertial characteristics for creating a model of load (resistance moment) for the motor. The model of EMD of electric motor drive compressor unit was created, as close as possible to the real existing system on the basis of catalog (passport) data of individual elements of electric motor drive unit. There were analyzed and developed proposals to enhance power efficiency of EMD ETC AHE and algorithms, which provide optimal direct start-up of the AHE fan group within the set time after the power failure without overloading of the power supply source, were proposed. *CONCLUSIONS.* On the basis of results of computer modeling, the peculiarities of operation of EMD ETH ACHE, which require further study and development of corrective measures to improve energy efficiency and reliability of power supply system of GP. Combination of direct starts of single (group) fans of ACHE, obtained at this stage of research of EMD EMD ETC ACHE model, will create the basis (algorithm) for automated control system of this complex, which will ensure restoration of technological mode within optimum time after power outage without overloading of centralized power supply source. Calculation of parameters of individual elements of MMD model of ETC AVO will allow to use data to create other models of ETK GP, which will allow to conduct in-depth research and improve the energy efficiency of the entire system of power supply of GP.

**Key words:** *mechatronic motion module, EMD model of ETC ACHE, calculation of parameters of EMD model of ETK, model of fan resistance moment, inertial characteristic of the fan, algorithm of group starts of AD.*

**For citation:** Maskov LR, Kornilov VYu. Development of a model of an electrical complex for gas air cooling devices of gas field №1 gazprom dobycha Yamburg LLC with a centralized power supply system in the matlab/simulink program. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(2):50-71. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-50-71.

**Введение**

Объектом исследования является ЭТК АВО ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург». Моделирование и анализ энергетической эффективности производились для ЭТК АВО в программной среде MATLAB/SIMULINK, где точность модели задается с помощью параметров схемы замещения отдельных элементов ЭТК. Целью исследования является создание модели, максимально приближенной к параметрам существующего ЭТК АВО, с последующим анализом и разработкой корректирующих мероприятий по повышению энергетической эффективности.

Анализ литературных источников [1-4] показывает, что приоритетным направлением исследований для нефтегазовой промышленности является создание высокоэффективных ЭТК. Основной акцент ставится на повышение энергетической эффективности системы и ее отдельных элементов: коррекции коэффициента мощности, фильтрации гармоник, модернизации кабельной системы, снижении удельного расхода топлива для автономных систем электроснабжения [5-8]. В тоже время вопрос изучения и анализа ЭТК для газодобывающих предприятий нуждается в дополнительных исследованиях, так как имеет особенности функционирования, как для централизованной, так и для автономной системы электроснабжения. ЭТК ГП является сложной технической системой с изменяемой структурой в зависимости от вида системы электроснабжения, а именно: ЭТК с централизованной системой электроснабжения, либо ЭТК в виде совокупности нескольких подсистем с автономными системами электроснабжения, функционирующие по схеме: «один генератор – отдельная группа электрических приемников». ЭТК ГП имеет в своем составе несколько ЭТК, отличающихся друг от друга отдельными элементами, энергетическими характеристиками и назначением [9]. Актуальность и практическая значимость исследования ЭТК ГП связана с тем, что от эффективности функционирования всего ЭТК и (или) его отдельных элементов зависят удельные затраты электроэнергии на единицу добываемой продукции (газа и газового конденсата), снижение которых является важным научно-техническим направлением для газовой промышленности. Научная новизна работы состоит в исследовании ЭТК в условиях длительного функционирования с несинусоидальной системой электроснабжения, развитии методов коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник для централизованной и в последующем для автономной системы электроснабжения ЭТК с преобладанием активно-индуктивной нагрузки.

Анализ литературы [10-11] показал, что в аналогичных моделях ЭТК АВО учитываются не все элементы и инерционно-механические характеристики ЭТК (неидеализированный источник электроснабжения, силовой трансформатор, момент инерции вентилятора). Некорректно рассчитанные параметры схемы замещения для АД в этих моделях приводят к затяжному пуску, превышающему в 10–14 раз реальные пусковые характеристики, что ведет к неадекватной оценке оптимального времени восстановления технологического процесса в аварийных режимах. Все эти недочеты в совокупности сказываются при исследовании и анализе энергетической эффективности, надежности и безаварийной эксплуатации всего ЭТК и оборудования промысла. Для устранения этих недочетов в модели ЭТК АВО, авторы выполнили сравнительный анализ существующих методик, внесли необходимые поправки в расчеты параметров схемы замещения, произвели оценку энергетической эффективности и внесли предложения по алгоритму нахождения оптимального времени последовательного одиночного и группового включения АД в аварийных режимах эксплуатации без перегрузки источника электроснабжения. Результаты работы могут быть использованы для создания моделей ЭТК и совершенствования энергетической эффективности и надежности системы электроснабжения в различных отраслях промышленности.

### **Материалы и методы**

#### *Общая характеристика объекта исследования*

ЭТК ГП №1 с централизованной системой электроснабжения является сложной технической системой, имеющий в своём составе несколько ЭТК, отличающихся друг от друга отдельными элементами, энергетическими характеристиками и назначением. Объектом исследования является многодвигательная система, применяемая для охлаждения газа на ГП (ЭТК АВО). В качестве нагрузки используются АВО газа типа 2АВГ-75С (рис.1), где в качестве электропривода применяются многополюсные тихоходные электродвигатели серии ВАСО4-37-24 номинальной мощностью 37 кВт с композитным стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2. Общее количество АД АВО газа на ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» составляет 140 ед., что соответствует максимальной потребляемой мощности 5Мвт·ч в наиболее загруженный летний период эксплуатации. Электропитание осуществляется от трансформаторов ТМЗ-1600/6/0,4 и ТМЗ-1000/6/0,4. В настоящее время применяется прямой пуск АВО газа, в качестве устройств компенсации реактивной мощности используются нерегулируемые

батареи статических конденсаторов (БСК) серии КЭ2-0,38-36-3У3. Регулирование производительности вентиляторов АВО газа осуществляется два раза в год с помощью изменения угла атаки лопастей.

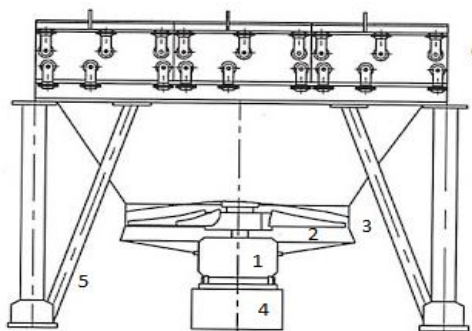


Рис.1. Схематическое изображение АВО газа:

1-асинхронный двигатель;  
2-лопасти вентилятора;  
3-диффузор;  
4-станина;  
5-металлоконструкция;  
6-теплообменный блок

Fig.1. Schematic representation of ACD gas:

1-asynchronous motor; 2-fan blades; 3-diffuser; 4-bed; 5-metal structure; 6-heat exchange unit

#### Расчёт параметров модели ЭТК ГП

Структурно модель для ЭТК одиночного АВО газа разбивается на элементы и измерительные блоки (рис.2). Расчёт параметров элементов ЭТК производится с помощью схем замещения, применяемых в блоках настройки электротехнических систем и устройств *MATLAB/SIMULINK* по их паспортным (каталожным) данным и электромеханическим характеристикам.

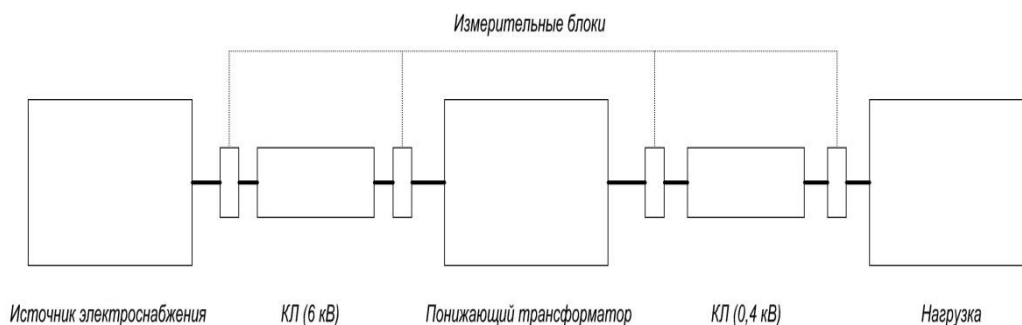


Рис.2. Обобщённая структурная схема модели ЭТК ГП

Fig.2. Generalized block diagram of the ETC GF model

Для модели ЭТК АВО (рис.3) расчёт параметров схемы замещения производится для источника электроснабжения, кабельных линий (КЛ), понижающего трансформатора, АД по каталожным данным, а инерционно-механические характеристики лопастей вентилятора рассчитываются приближенными методами.

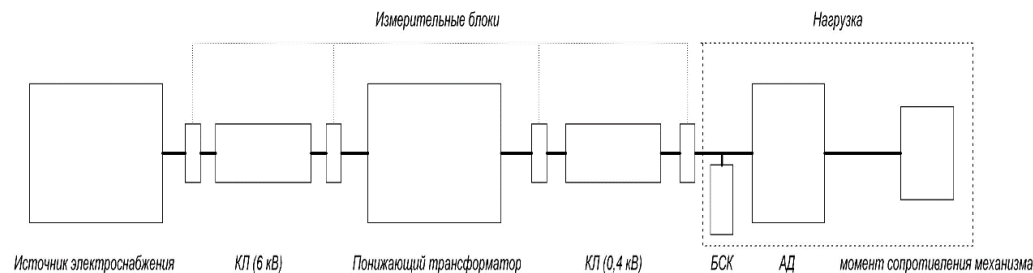


Рис.3. Структурная схема модели ЭТК АВО

Fig.3. Block diagram of the ACD ETC model

#### Расчёт параметров схемы замещения трансформатора

В качестве объекта моделирования были выбраны силовые трансформаторы типа

ТМЗ-1600(1000)/6/0,4, ТМЗ-1000(1000)/6/0,4 отечественного производства, применяемые в составе комплектно-трансформаторных подстанций (КТП) ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» с параметрами, приведёнными в таблице 1.

Таблица 1

Каталожные (паспортные) данные трансформатора типа ТМЗ-1600(1000)/6/0,4

Параметр	Обозначение	Значение		Единицы измерения
Число фаз	m	3		-
Номинальная мощность трансформатора	$S_{ном}$	1600	1000	кВА
Напряжение ВН	$U_{1ном}$	6		кВ
Напряжение НН	$U_{2ном}$	0,4		кВ
Номинальная частота сети	f	50		Гц
Напряжение короткого замыкания	$U_k$	4,5	5,5	%
Потери короткого замыкания	$P_k$	18	10,8	кВт
Потери холостого хода	$P_0$	2,35	1,55	кВт
Ток холостого хода	$I_0$	1,3	1,2	%
Схема соединения обмоток	D/Yn-11			

Для определения параметров Т-образной схемы замещения силового трансформатора (рис.4) по каталожным данным в программе *MATLAB/SIMULINK*, были проанализированы работы [12-14].

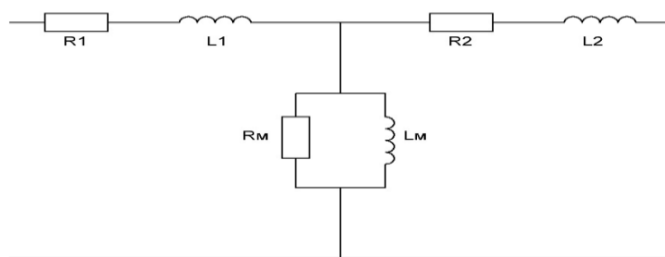


Рис.4. Т-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора в *MATLAB/SIMULINK*

Расчет параметров для модели трансформатора из библиотеки *MATLAB/SIMULINK* был выполнен в именованных (табл.2) и относительных единицах (табл.3). В результате анализа работы [14] были внесены авторские поправки в расчетные выражения. Вычисленные значения параметров схемы замещения не противоречат диапазону ориентировочных значений сопротивлений и индуктивностей обмоток трансформаторов, приведенных в [15]. Сравнение значений параметров схемы замещения, полученных в результате расчетов (табл.4), показало погрешность не более 3%, что свидетельствует о высокой сходимости. Расчет параметров производился с учётом насыщения стали магнитопровода (табл.5) [14].

Таблица 2

Расчетные значения параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора по каталожным данным

№	Наименование величины	Параметр	Значение	Единицы измерения
1	Номинальная мощность каждой фазы трансформатора	$S_{фном}$	533,333	кВА
2	Фазное напряжение первичной обмотки при соединении в «треугольник»	$U_{1ф}$	6000	В
3	Номинальный фазный ток первичной обмотки по схеме «треугольник»	$I_{1фном}$	88,89	А
4	Фазное напряжение вторичной обмотки при соединении в «звезду»	$U_{2ф}$	230,94	В
5	Номинальный фазный ток вторичной обмотки по схеме «звезда»	$I_{2фном}$	2309,4	А
Базисные величины				

№	Наименование величины	Параметр	Значение	Единицы измерения
6	Базисное значение сопротивления первичной обмотки	$R_{баз1}$	67,5	Ом
7	Базисное значение сопротивления вторичной обмотки	$R_{баз2}$	0,1	Ом
Из опыта холостого хода				
8	Фазный ток холостого хода трансформатора	$I_{0ф}$	1,16	А
9	Полное сопротивление ветви намагничивания схемы замещения при холостом ходе	$Z_0$	5172,41	Ом
10	Мощность потерь холостого хода на фазу	$P_{0ф}$	783,33	Вт
11	Коэффициент мощности холостого хода	$\cos(\varphi_0)$	0,113	-
12	Активное сопротивление ветви намагничивания	$R_m$	45773,54	Ом
13	Индуктивное сопротивление ветви цепи намагничивания	$X_m$	5205,75	Ом
14	Индуктивность цепи намагничивания	$L_m$	16,58	Гн
Из опыта короткого замыкания				
15	Фазное напряжение короткого замыкания	$U_{кзф}$	270	В
16	Полное сопротивление короткого замыкания	$Z_k$	3,04	Ом
17	Мощность потерь короткого замыкания на фазу	$P_{кзф}$	6000	Вт
18	Коэффициент мощности короткого замыкания	$\cos(\varphi_k)$	0,25	-
19	Активное сопротивление короткого замыкания	$R_k$	0,76	Ом
20	Индуктивное сопротивление короткого замыкания	$X_k$	2,94	Ом
21	Коэффициент трансформации	$k$	15	-
22	Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора	$R_1$	0,38	Ом
23	Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора	$R_2$	0,000563	Ом
24	Индуктивность первичной обмотки трансформатора	$L_1$	0,0047	Гн
25	Индуктивность вторичной обмотки трансформатора	$L_2$	0,00000696	Гн

Таблица 3

Именованные значения параметров схемы замещения в относительных единицах (о.е.)

№	Наименование величины	Параметр	Значение
1	Активное сопротивление ветви намагничивания	$R_m (o.e.)$	678,127
2	Индуктивность ветви намагничивания	$L_m (o.e.)$	77,128
3	Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора	$R_1 (o.e.)$	0,00563
4	Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора	$R_2 (o.e.)$	0,00563
5	Индуктивность первичной обмотки трансформатора	$L_1 (o.e.)$	0,0219
6	Индуктивность вторичной обмотки трансформатора	$L_2 (o.e.)$	0,0219

Таблица 4

Сравнение эмпирических и расчетных значений параметров схемы замещения трансформатора

Параметр	Эмпирические значения ( $Y_{эмп}$ ), (о.е.)	Расчетные значения ( $Y_{расч}$ ), (о.е.)	Отклонение ( $Y_{эмп}-Y_{расч}$ )/ $Y_{эмп}$ , %
$R_1=R_2$	0,005625	0,00563	0,089
$L_1=L_2$	0,0225	0,0219	-2,74
$R_m$	680,851	678,127	-0,4
$L_m$	76,923	77,128	0,27

Таблица 5

Расчетные значения характерных точек кривой намагничивания		
№ точки	$\Psi$ , о.е.	$I_m$ , о.е.
1	$\psi_1 = 0$	$i_1 = 0$
2	$\psi_2 = 1,15$	$i_2 = 0,01495$
3	$\psi_3 = 1,2175$	$i_3 = 1$

Полученные расчетные значения проверяются на имитационной модели в программе компьютерного моделирования *MATLAB* и его приложении *SIMULINK*. Имитационная модель состоит из следующих блоков: идеальный трехфазный источник напряжения, измерительный блок напряжения и тока, трёхфазный двухобмоточный трансформатор, блок измерения активной и реактивной мощности, блок расчета модуля комплексного числа по его действительной и мнимой части, блок для получения модульного значения, дисплей. Для сравнения паспортных данных (табл.1) и расчётных значений, были проведены опыты холостого хода и короткого замыкания со следующими начальными условиями: 1) в качестве источника питания используется идеальный трёхфазный источник напряжения (сопротивление источника равно нулю); 2) при проведении опыта короткого замыкания напряжение источника умножается на  $U_k$  (из табл.1). При проведении моделирования на дисплее отображаются результаты измерений активной, реактивной и полной мощности трансформатора, которые показывают, что потери холостого хода (рис.5) и короткого замыкания (рис.6) совпадают с паспортными данными (табл.6).

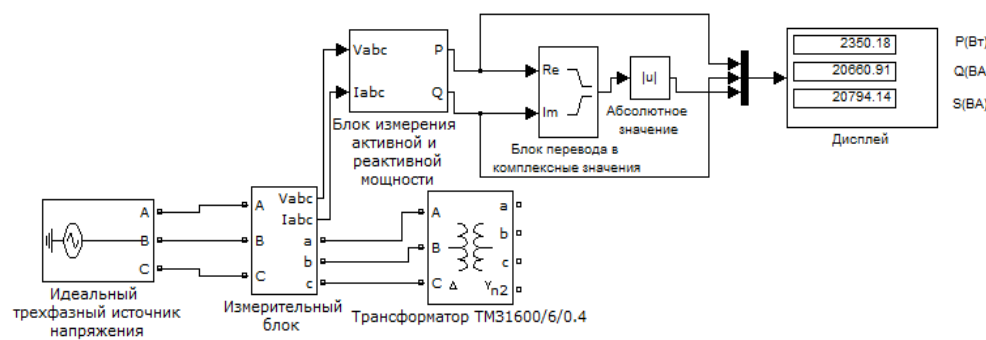


Рис.5. Опыт холостого хода трансформатора типа ТМЗ1600/6/0,4

Fig.5. The experience of idling transformer type TMZ1600/6/0,4

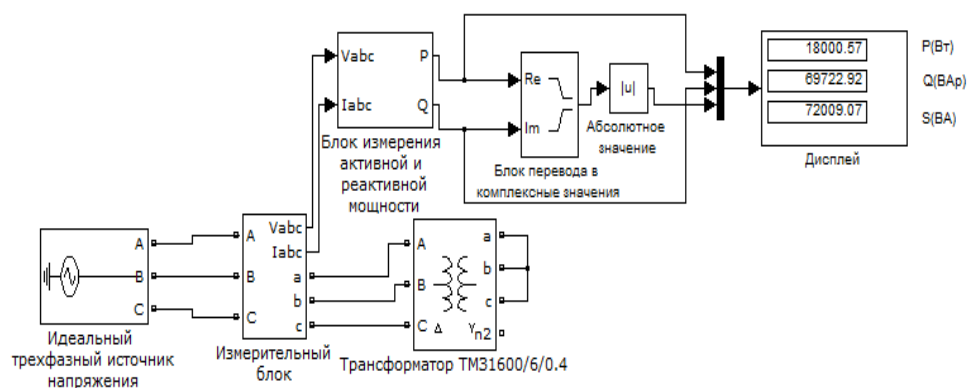


Рис.6. Опыт короткого замыкания трансформатора типа ТМЗ1600/6/0,4

Fig.6. The experience of short-circuit transformer type TMZ1600/6/0,4

Таблица 6

Сравнение паспортных и смоделированных значений параметров трансформатора				
Параметр	Наименование величины	Паспортное значение ( $Y_{пасп}$ ), Вт	Результаты моделирования ( $Y_{расч}$ )	Отклонение ( $Y_{пасп} - Y_{расч}$ )

Параметр	Наименование величины	Паспортное значение ( $Y_{\text{пасп}}$ ), Вт	Результаты моделирования ( $Y_{\text{расч}}$ )	Отклонение ( $Y_{\text{пасп}} - Y_{\text{расч}}$ )
$P_0$	Потери холостого хода	2350	2350,18	-0,18
$P_k$	Потери короткого замыкания	18000	18000,57	-0,57

Аналогичным образом рассчитываются параметры схемы замещения для двухобмоточного трансформатора типа ТМЗ/1000/6/0.4. Результаты расчетов параметров схемы замещения для трансформаторов ТМЗ1600(1000)/6/0,4, необходимые для дальнейшего моделирования ЭТК АВО с централизованной системой электроснабжения, вносятся в таблицу 7.

Таблица 7

Параметры схемы замещения трансформаторов ГП №1

Параметр	ТМЗ1600/6/0,4 (о.е.)	ТМЗ1000/6/0,4 (о.е.)
$R_1=R_2$	0,005625	0,0054
$L_1=L_2$	0,0225	0,0275
$R_m$	678,127	645,1613
$L_m$	77,128	88,333

#### Расчёт параметров схемы замещения асинхронного двигателя

В качестве объекта моделирования был выбран АД серии ВАСО4-37-24 (табл. 8) с композитным стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2.

Таблица 8

Каталожные данные АД серии ВАСО 4-37-24

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, $P_n$	37 кВт
Номинальное напряжение, $U_{\text{ном}}$	380 В
Число фаз, $m$	3
Номинальная частота вращения, $n_n$	246 об/мин
Синхронная частота вращения, $n_1$	250 об/мин
Номинальное скольжение, $S_n$	1,6 %
Коэффициент мощности, $\cos\phi$	0,63
КПД, $\eta$	89 %
Отношение пускового тока к номинальному току, $\lambda$	3,9
Отношение пускового момента к номинальному моменту, $k_p$	0,8
Отношение максимального момента к номинальному моменту, $k_m$	2,4
Момент инерции ротора, $J$	26 кг·м <sup>2</sup>
Число пар полюсов, $2p$	12
Соединение обмоток статора	Y/Δ

Для определения параметров Т-образной схемы замещения АД (рис.7) по каталожным данным в программе MATLAB/SIMULINK, были проанализированы работы [16-21].

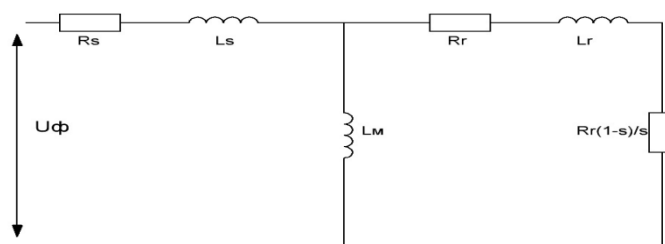


Рис.7. Т-образная схема замещения АД в MATLAB/SIMULINK

Fig.7. T-shaped AM substitution scheme in MATLAB/SIMULINK

Анализ литературы показал, что, несмотря на большое количество работ, посвященных определению параметров схемы замещения АД по каталожным данным, в них отсутствуют простые и удобные для применения методики расчета. Основными



факторами, влияющими на точность расчета параметров схемы замещения, являются: большое количество принимаемых допущений, сложность реализации алгоритма расчетов, итерационные циклы. В данной работе проведен сравнительный анализ результатов расчета параметров схемы замещения АД по трем методикам: методика 1[22], методика 2[23], методика 3[24] (табл. 9).

Таблица 9

Результаты расчета параметров схемы замещения по каталожным данным

Наименование расчетной величины	Параметр	Методика №1	Методика №2	Методика №3
Активное сопротивление обмотки статора, Ом	$R_s$	0,103514	0,083017	0,0219
Активное сопротивление обмотки ротора, Ом	$R_r$	0,020455	0,035206	0,051
Индуктивность обмотки статора, Гн	$L_s$	0,000426	0,000949	0,000888
Индуктивность обмотки ротора, Гн	$L_r$	0,000533	0,001178	0,001226
Индуктивность ветви намагничивания, Гн	$L_m$	0,008593	0,009789	0,007978

Для оценки рассчитанных параметров, была разработана имитационная модель подсистемы АД ВАСО4-37-24 в программе компьютерного моделирования *MATLAB* и его приложении *SIMULINK* (рис.8) и модель для снятия совместных электромеханических характеристик АД по методикам (1-3) (рис.9). Имитационная модель подсистемы состоит из следующих блоков: идеальный трехфазный источник напряжения (сопротивление источника равно нулю), асинхронный двигатель, блок задания нагрузки, измерительный блок (ток в статорной обмотке, электромагнитный момент, скорость вращения ротора), блок перевода скорости из рад/с в об/мин.

Результаты моделирования переходного процесса при прямом пуске на холостом ходу (значение блока задания нагрузки равно нулю) АД представлены на графиках (рис. 10-14).

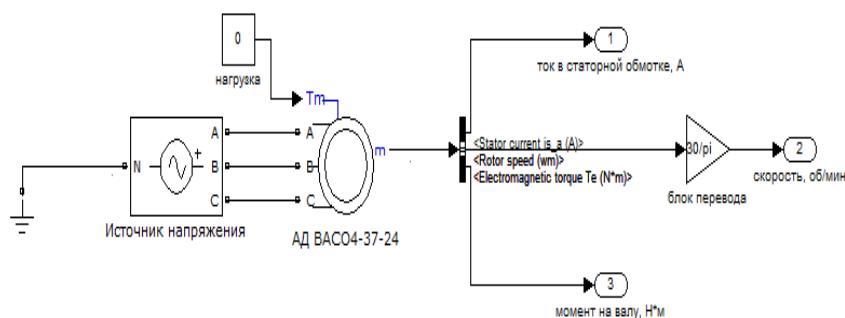


Рис.8. Модель подсистемы АД ВАСО4-37-24

Fig.8. The model of the VASO4-37-24 AM subsystem

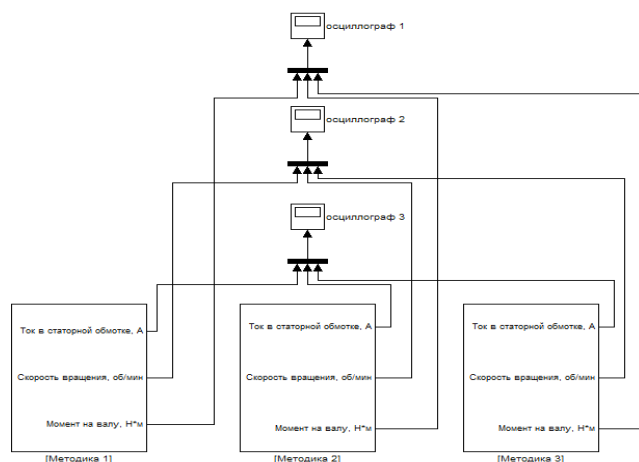


Рис.9. Модель системы для снятия совместных электромагнитных характеристик АД

Fig.9. Model of the system for removing the joint electromagnetic characteristics of AM

На графике (рис.10) показаны параметры скорости вращения двигателя в зависимости от времени моделирования. Время разгона двигателя для методик 2 и 3 практически совпали, выход на номинальную скорость составляет 1,3 секунды. Для методики 1 выход на номинальную скорость составил 1 секунду, однако данный метод имеет более длительный период перерегулирования в отличие от методик 2 и 3. В начале пуска у методики 3 наблюдается большее колебание скорости, чем у методики 1 и 2, что говорит о наличии вибрации в области низких скоростей.

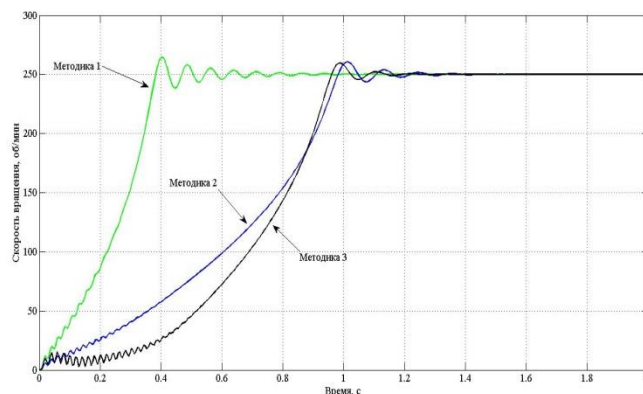


Рис.10. График зависимости скорости вращения от времени

Fig.10. Graph of the dependence of the rotation speed on time

На графиках (рис.11-13) показаны параметры тока в статорной обмотке АД в зависимости от времени моделирования, которые указывают на превышение паспортных значений пускового тока в 2,56 (методика 1), в 1,28 (методика 2) и в 1,53 (методика 3) соответственно. После переходного процесса номинальные токи для всех методик совпадают с паспортными значениями.

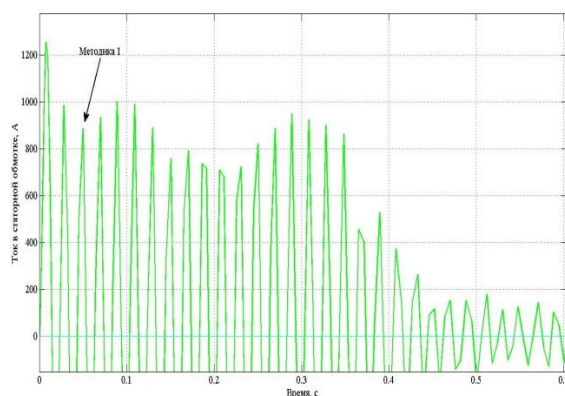


Рис.11. График зависимости тока в статорной обмотке от времени (методика 1)

Fig.11. Graph of the dependence of the current in the stator winding on time (method 1)

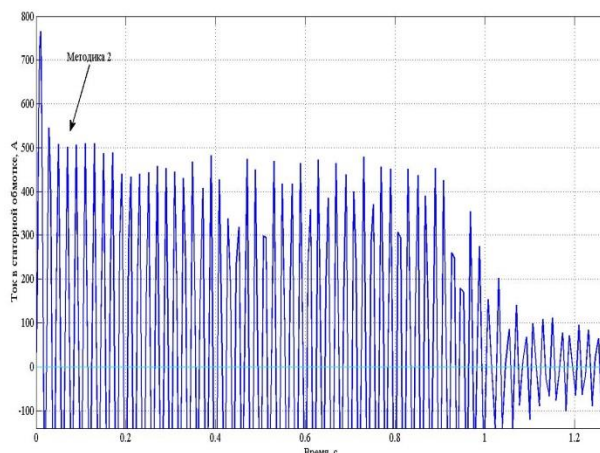


Рис.12. График зависимости тока в статорной обмотке от времени (методика 2)

Fig.12. Graph of the dependence of the current in the stator winding on time (method 2)

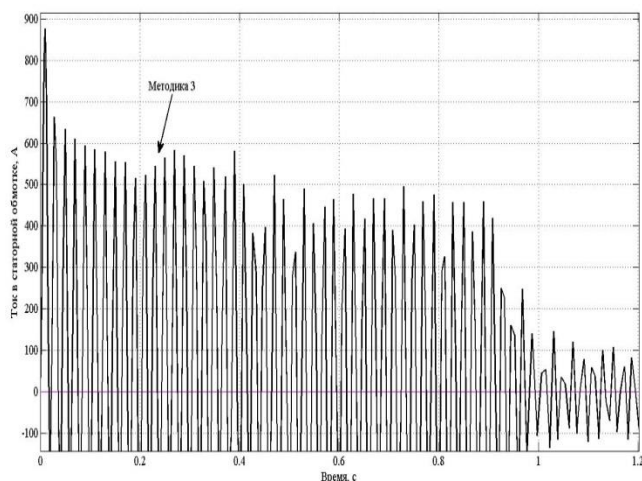


Рис.13. График зависимости тока в статорной обмотке от времени (методика 3)

Fig.13. Graph of the dependence of the current in the stator winding on time (method 3)

График (рис.14) показывает параметры электромагнитного момента на валу в зависимости от времени моделирования. Наиболее близким к паспортному значению критического момента является методика 1, однако данная методика имеет самый большой пусковой момент и время затухания переходного процесса, по сравнению с методикой 2. Методика 3 по характеристикам имеет близкие значения с методикой 2, однако имеются колебания (около 200 Н·м) ротора (биение) в области номинального режима работы АД. Сравнительный анализ показал, что не одна из методик полностью не совпала с паспортными данными. Наиболее близкими к паспортным данным являются методики 2 и 3, однако для методики 3 требуется информация о коэффициентах полезного действия и мощности при различной нагрузке электродвигателя, которая не всегда доступна (не каталожный параметр), но может быть рассчитана, например, по формулам из [25]. Методика 2 по сравнению с другими методиками наиболее близко подошла к паспортным значениям АД (пусковой ток и момент), алгоритм расчета был наиболее прост и понятен при вычислениях, отсутствие итерационных циклов при достаточной точности вычислений делают эту методику наиболее удобной (из представленных методик) для использования в расчетах модели.

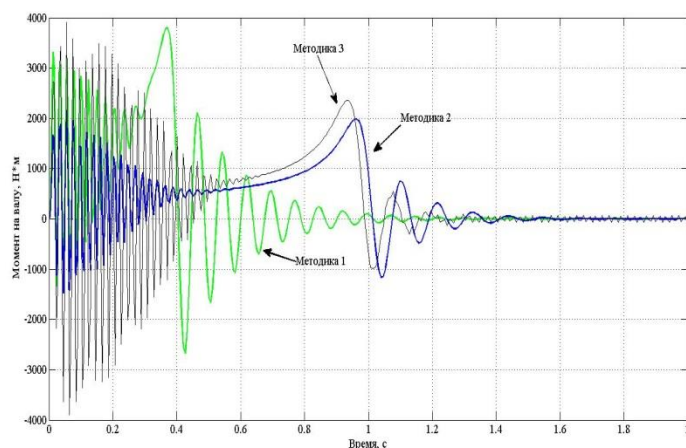


Рис.14. График зависимости момента на валу от времени

Fig.14. Graph of the dependence of the moment on the shaft on time

#### Расчет нагрузки

В качестве нагрузки для многополюсных тихоходных электродвигателей серии ВАСО4-37-24 применяются композитные стеклопластиковые рабочие колеса типа ГАЦ-50-4М2 (рис.15).

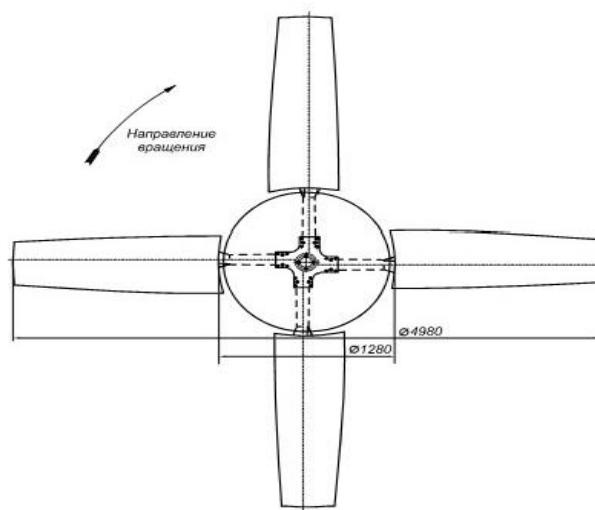


Рис.15. Стеклопластиковое рабочее колесо типа ГАЦ-50-4М2 Fig.15. Fiberglass impeller type GATS-50-4M2

Для работы механизма с большим моментом инерции требуется выполнения динамического разгона/торможения, при этом следует учитывать изменение момента, связанного с инерционностью механизма.

Момент инерции привода АВО газа можно определить:

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{вен}}, \quad (1)$$

где  $J_{\text{дв}}$  – момент инерции двигателя (табл.8);  $J_{\text{вен}}$  – момент инерции вентилятора.

Приближенно осевой момент инерции вентилятора можно определить [26]:

$$J_{\text{вен}} = \frac{0,2 \cdot M_{\text{вен}} \cdot (0,4 \cdot R)^2}{2}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{вен}}$  – суммарная масса рабочего колеса;  $R$  – радиус рабочего колеса (табл.10).

Подставляя значения в формулу 2, получим:

$$J_{\text{вен}} \approx 0,5 \cdot J_{\text{дв}}.$$

Рассчитываем коэффициент вязкого трения:

$$F = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (3)$$

где  $\omega_{\text{ном}}$  – номинальная частота вращения;  $\Delta P_{\text{мех}}$  – механические потери в двигателе.

Механические потери в двигателе определяются [16]:

$$\Delta P_{\text{мех}} = (0,02...0,05) \cdot P_n, \quad (4)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность двигателя (табл. 8).

Таблица 10

Технические характеристики рабочего колеса ГАЦ-50-4М2

Наименование параметра	Значение
Диаметр рабочего колеса	4,98 м
Диаметр ступицы	1,28 м
Число лопастей	4
Масса рабочего колеса	140 кг
Масса лопасти	30 кг
Номинальный расход воздуха	510000 м <sup>3</sup> /ч

Наименование параметра	Значение
Номинальный статический напор	200 Па

Момент сопротивления двигателя задается [26]:

$$M_c = M_o + (M_{ном} - M_o) \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2, \quad (5)$$

где  $M_o$  – момент сопротивления при пуске;  $M_{ном}$  – момент сопротивления при номинальной нагрузке;  $\omega$  – частота вращения ротора.

Момент сопротивления при номинальной нагрузке определяется [23]:

$$M_{ном} = \frac{P_n}{\eta \cdot \omega_{ном}}, \quad (6)$$

где  $\eta$  – КПД двигателя (табл.10)

Момент сопротивления при пуске определяется [27]:

$$M_o = (0.05...0.1) \cdot M_{ном}. \quad (7)$$

Полученные значения из (1,3) вносятся в *MATLAB* в окно настройки АД, по уравнению (5) моделируется блок сопротивления (нагрузки) для АД. Значения, полученные из (1,3,4,6,7) вносятся в табл.11.

Таблица 11

Результаты расчетных инерционно-механических характеристик АД АВО газа

Наименование величины	Параметры	Расчетные значения
Номинальный момент, Н·м	$M_{ном}$	1614,61
Момент сопротивления при пуске, Н·м	$M_o$	161,461
Механические потери в двигателе, Вт	$\Delta P_{мех}$	1850
Коэффициент вязкого трения, Н·м·с	F	2,79
Момент инерции привода АВО, кг·м <sup>2</sup>	J	39

#### Расчет параметров схемы замещения кабельной линии

Для определения параметров схемы замещения КЛ, заданной в программе, (рис.16) необходимо найти активное сопротивление, индуктивность и емкость линии:

$$R_l = r_0 \cdot l, \quad (8)$$

$$L_l = \frac{x_0 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (9)$$

$$C_l = c_0 \cdot l, \quad (10)$$

где  $r_0$  – удельное активное сопротивление линии;  $x_0$  – удельное индуктивное сопротивление линии;  $f$  – частота сети;  $c_0$  – удельная ёмкость линии (не учитываем для КЛ 0,4 кВ) (табл.12).

Результаты вычисленных значений из (8-10) параметров схемы замещения КЛ в зависимости от номера КТП вносятся для каждой модели в окно настроек КЛ программы *MATLAB*.

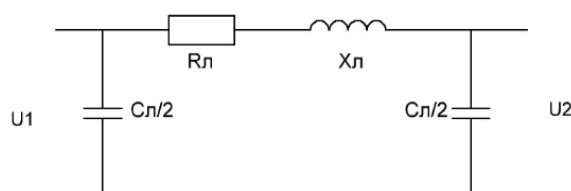


Рис.16. Схема замещения КЛ в *MATLAB/SIMULINK* Fig.16. CL substitution scheme in *MATLAB/SIMULINK*

Таблица 12

Технические характеристики кабельных линий ЭТК АВО ГП №1

Наименование объекта	Марка кабеля	Длина, м	Удельное индуктивное сопротивление, ом/км	Удельное активное сопротивление, ом/км	Удельная емкость, мкФ/км
		$l$	$x_0$	$r_0$	$C_0$
КТП-2	ААШВ-3×150 (6кВ)	200	0,074	0,206	0,51
	АВВГ-4×50(1кВ)	150	0,0625	0,64	-
КТП-5	ААШВ-3×95(6кВ)	350	0,078	0,326	0,42
	АВВГ-3×70+1×35 (1кВ)	120	0,0612	0,46	-
КТП-6	ААШВ-3×95(6кВ)	400	0,078	0,326	0,42
	АВВГ-3×70+1×35 (1кВ)	120	0,0612	0,46	-
КТП-7	ААШВ-3×70 (6кВ)	750	0,084	0,443	0,4
	АВВГ-3×70+1×25 (1кВ)	85	0,0612	0,46	-
КТП-8	ААШВ-3×70 (6кВ)	800	0,084	0,443	0,4
	АВВГ-3×70+1×25 (1кВ)	85	0,0612	0,46	-

*Расчёт параметров схемы замещения источника электроснабжения*

Источником электроснабжения (рис.2) является трансформатор серии ТДН-25000/110/6 (табл.13). Параметры схемы замещения модели могут быть определены выражениями [15,28]. Параметры проверяются на модели (рис.6) (где сравнивается расчетное и смоделированное значение мощности трехфазного короткого замыкания за трансформатором). В зависимости от выбранного варианта настройки блока, результаты из выражений 4 или 6-7 (табл.14) вносим в окно настройки источника электроснабжения в программной среде *MATLAB*.

Таблица 13

Каталожные (паспортные) данные трансформатора типа ТДН-25000/110/6

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Число фаз	$m$	3	-
Номинальная мощность трансформатора	$S_{ном}$	25000	кВА
Напряжение ВН	$U_{1ном}$	110	кВ
Напряжение НН	$U_{2ном}$	6	кВ
Номинальная частота сети	$f$	50	Гц
Напряжение короткого замыкания	$U_k$	10,5	%
Потери короткого замыкания	$P_k$	120	кВт
Потери холостого хода	$P_0$	17	кВт
Ток холостого хода	$I_0$	0,2	%
Схема соединения обмоток	Y/D-11		

Таблица 14

Расчетные значения параметров источника электроснабжения

№	Наименование величины	Параметр	Значение	Единицы измерения
1	Базисное напряжение	$U_{баз}$	6300	В
2	Базисная мощность (произвольный параметр)	$S_{баз}$	100	МВ·А
3	Индуктивное сопротивление схемы замещения трансформатора 110/6 кВ	$X_{тр-ра}$	0.42	о.е.
4	Мощность трехфазного короткого замыкания за трансформатором 110/6 кВ	$S_{k(3)}$	238.1	МВ·А
5	Индуктивное сопротивление источника электроснабжения	$X_{ист}$	0.16669	Ом

№	Наименование величины	Параметр	Значение	Единицы измерения
6	Индуктивность источника электроснабжения	$L_{ист}$	0.000531	Гн
7	Активное сопротивление источника электроснабжения	$R_{ист}$	0.016669	Ом

### Результаты

В ходе исследования в программной среде *MATLAB/SIMULINK* была создана модель ЭТК АВО (рис.17,18). С помощью данной модели были получены электромеханические (рис.19) и энергетические характеристики (табл.15,16).

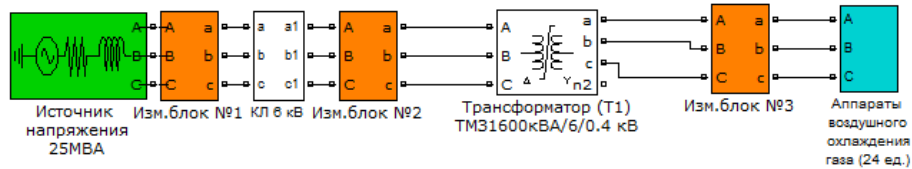


Рис.17. Модель ЭТК АВО для централизованной системы электроснабжения

Fig.17. The ACD ETC model for a centralized power supply system

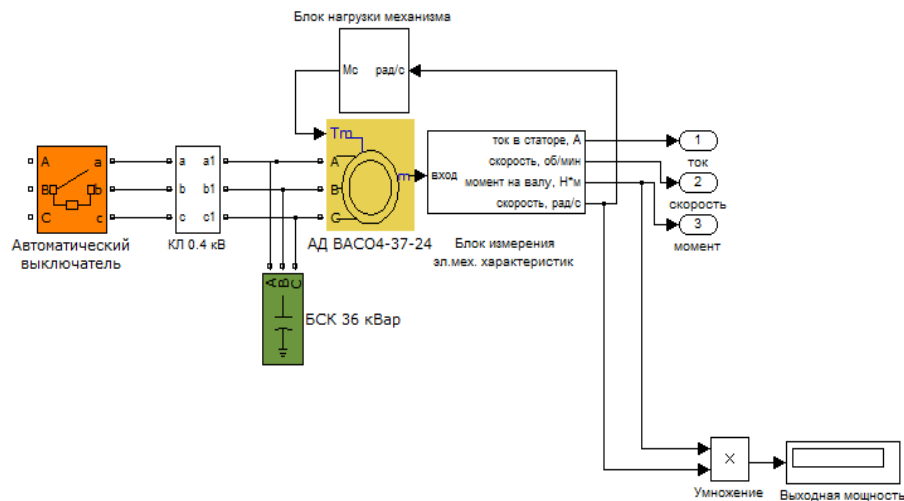


Рис.18. Модель АВО газа (1 ед.)

Fig.18. ACD gas model (1 unit)

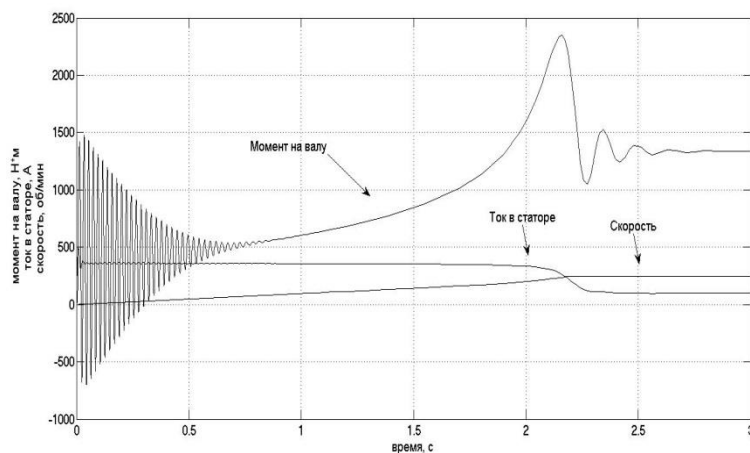


Рис.19. Электромеханические характеристики АД АВО газа, полученные при решении модели (Рис.18) для одного АД

Fig.19. Electromechanical characteristics of the ACD gas pressure obtained by solving the model (Fig.18) for one AM

Таблица 15

## Энергетические характеристики модели ЭТК АВО газа (1 ед.)

Параметры	Изм. блок №1	Изм. блок №2	Изм. блок №3	Изм. блок №4
Активная мощность, Вт	40260,19	40257,81	38012,20	37055,22
Реактивная мощность, ВАр	32317,34	33199,55	12157,10	12063,88
Полная мощность, ВА	51626,48	52181,42	39908,93	38969,56
Коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ )	0,78	0,77	0,95	0,95
Коэффициент реакт. мощности ( $\tan\varphi$ )	0,8	0,82	0,32	0,33
Потери активной мощности в АД, Вт/КПД, %	2495,22/93,26			
Потери полной мощности в КЛ 0.4кВ, Вт/КПД, %	939,37/97,64			
Потери полной мощности в тр-ре, Вт/ КПД, %	12272,49/76,48			
Коэффициент загрузки трансформатора, %	2,49			
Потери полной мощности в КЛ 6кВ, Вт/КПД, %	554,94/98,93			

Таблица 16

## Энергетические характеристики модели ЭТК АВО газа для одной секции шин (24 ед.)

Параметры для группы АД (24 ед.)	Изм. блок №1	Изм. блок №2	Изм. блок №3	Изм. блок №4
Активная мощность, Вт	919451,91	918625,6	911163,94	38063,08
Реактивная мощность, ВАр	336342,31	336924,38	290614,94	12129,73
Полная мощность, ВА	979039,3	978463,61	956387,36	39949,07
Коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ )	0,94	0,94	0,95	0,95
Коэффициент реакт. мощности ( $\tan\varphi$ )	0,37	0,37	0,32	0,32
Потери активной мощности в АД, Вт/ КПД, %	3543,08/90,69			
Потери полной мощности в тр-ре, Вт/ КПД, %	22076,25/97,74			
Коэффициент загрузки трансформатора, %	59,77			
Потери полной мощности в КЛ 6кВ, Вт/КПД, %	575,69/99,94			

Полученные электромеханические характеристики модели АД серии ВАСО4-37-24 наиболее близки к его паспортным (каталожным) параметрам. Время пуска модели АД ЭТК АВО газа соответствует его реальным (натурным) показателям в отличие от работ, представленных в источниках [10-11], где время пуска модели АД превышает в 10–14 раз реальные пусковые показатели установок АВО газа. Энергетические характеристики модели ЭТК АВО, полученные для одной секции шин (24 ед.) позволяют исследовать и проводить анализ энергетической эффективности в условиях длительного функционирования с несинусоидальной системой электроснабжения. Рекомендации по совершенствованию энергетической эффективности, которые могут быть разработаны на основе этой модели, позволят осуществить развитие методов коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник для централизованной и в последующем для автономной системы электроснабжения ЭТК газовых промыслов с преобладанием активно-индуктивной нагрузки.

**Обсуждение**

С помощью модели ЭТК АВО для централизованной системы электроснабжения было произведено экспериментальное исследование закономерности влияния одиночных (групповых) запусков на перегрузочную способность источника электроснабжения. Пуски осуществлялись поочередно (по одному, по два и т.д.) с различным временным шагом включения АД в работу. Перегрузочная способность источника электроснабжения оценивалась с помощью пересечения аппроксимирующей кривой для пусковых токов АД АВО с номинальным током вторичной обмотки трансформатора (рис.20). Алгоритм включения для ЭТК АВО при прямых пусах АД, обеспечивающий восстановление технологического режима в течение оптимального времени после исчезновения напряжения для централизованной системы электроснабжения, может быть определён по уравнениям аппроксимирующей зависимости значений пусковых токов АД относительно линии тренда суммарного потребляемого тока группы АВО от времени последовательного прямого пуска (табл.17). Результаты эксперимента показали, что оптимальное время включения в



зависимости от максимального действующего значения тока для одиночных ( $A_{onm1}$ ) и парных запусков ( $A_{onm2}$ ) АД находятся в следующих пределах:

$$A_{onm1} \leq 82,9924 \cdot x + 783,4979, \quad (11)$$

$$A_{onm2} \leq 56,4942 \cdot x + 840,3766, \quad (12)$$

где  $x$  – время запуска  $n$ -ного АД в группе.

Групповые пуски (по три, по четыре АД и т.д.) показали, что общее время запуска превышает групповые пуски (по одному, по два АД) и приводят к перегрузке источника электроснабжения.

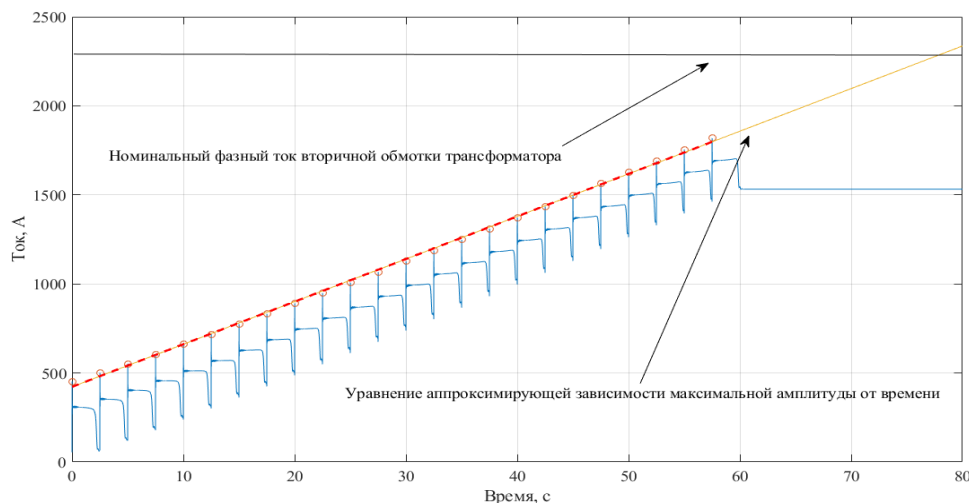


Рис.20. Экспериментальные характеристики для пусковых токов АД АВО газа (24 ед).

Fig.20. Experimental characteristics for starting currents of AM ACD gas (24 units).

Таблица 17  
Экспериментальные данные одиночных (групповых) пусков вентиляторов для ЭТК АВО газа при исчезновении напряжения

№	Шаг включения, с	Общее время запуска, с	Максимальная амплитуда, А	Количество одновременных запусков АД	Наличие перегрузки	Время перегрузки, мкс	Уравнение аппроксимирующей зависимости
	$\Delta t$	$T_{общ}$	$A_{max}$	$n$	да/нет	$t$	
1	2,5	60,4	1818	1	нет	-	$y = 23.9235 \cdot x + 422.0782$
2	1	25,85	2176				$y = 61.1324 \cdot x + 794.6353$
3	0,95	24,5	2178				$y = 64.1797 \cdot x + 798.0857$
4	0,8	21,25	2310				$y = 82.9924 \cdot x + 783.4979$
5	0,79	21	2339		да	4	$y = 86.5507 \cdot x + 785.5680$
6	0,78	20,6	2355				$y = 88.9025 \cdot x + 802.6141$
7	0,75	20	2375				$y = 90.0683 \cdot x + 887.0502$
8	0,7	19	2380			6	$y = 93.7730 \cdot x + 935.4388$
9	0,65	17,8	2390				$y = 101.4611 \cdot x + 939.8017$
10	4	47	2090	2	нет	-	$y = 27.3108 \cdot x + 868.4938$
11	3,8	44,8	2095				$y = 28.7428 \cdot x + 868.5823$
12	3,5	41,5	2097				$y = 31.2148 \cdot x + 868.3088$
13	3,1	37	2098				$y = 35.2447 \cdot x + 868.2993$
14	2,5	30,4	2120				$y = 44.9996 \cdot x + 862.3832$
15	2,4	29,4	2220				$y = 48.9299 \cdot x + 865.4385$

№	Шаг включения, с	Общее время запуска, с	Максимальная амплитуда, А	Количество одновременных запусков АД	Наличие перегрузки	Время перегрузки, мкс	Уравнение аппроксимирующей зависимости
	$\Delta t$	$T_{\text{общ}}$	$A_{\text{max}}$	$n$	да/нет	t	
16	2,32	28,7	2310				$y = 56.4942 \cdot x + 840.3766$
17	2,3	28,2	2432		да	10	$y = 61.2742 \cdot x + 886.7366$
18	2,1	26	2480				$y = 57.7697 \cdot x + 1183.0242$
19	9	68	2380	3	да	3	$y = 16.6926 \cdot x + 1312.7539$
20	6	45	2385				$y = 25.0414 \cdot x + 1312.5166$
21	5	38	2384				$y = 30.0637 \cdot x + 1312.5962$

Наиболее оптимальное общее время запуска для групповых пусков АД серии ВАСО4-37-24 без перегрузки источника питания составило соответственно: 21,5 сек (для одиночных пусков); 28,7 сек (для пусков по два двигателя) и более 70 сек (по три двигателя). Учитывая, что в настоящее время групповое включение АД осуществляет технологический персонал в ручном режиме, одной из рекомендаций является создание автоматической системы группового пуска АД ЭТК АВО. Разработанный алгоритм включения для автоматической системы группового пуска позволит обеспечить восстановление технологического режима в течение оптимального времени после исчезновения напряжения по сравнению с ручным режимом пуска.

#### **Заключение**

1. Проведен анализ структуры и отдельных элементов ЭТК АВО ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» как объекта исследования.

2. Разработана структурная модель для ЭТК АВО газа, которая разбивается на элементы и измерительные блоки.

3. Внесены необходимые поправки в расчеты параметров схемы замещения в именованных единицах [14], которые показали высокую сходимость (отклонение не более 3 %). Разработана имитационная модель для проверки рассчитанных параметров трансформатора по каталожным данным.

4. Проведен сравнительный анализ методик расчета асинхронного двигателя по каталожным данным, который выявил наиболее удобный и простой (из представленных методик) алгоритм расчета параметров схемы замещения.

5. Выполнен расчет параметров схем замещения источника электроснабжения, кабельных линий высокого и низкого напряжения в программной среде MATLAB.

6. Произведен ориентировочный расчет механических и инерционных характеристик для многополюсного АД серии ВАСО4-37-24 с композитным стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2. Расчет показал, что момент инерции механизма (J) в 22 раза меньше чем в работе [11]. Создана модель нагрузки (момента сопротивления) для АД.

7. Разработана модель в среде MATLAB/SIMULINK для ЭТК АВО. Выполнено экспериментальное исследование модели АВО на холостом ходу и на номинальную нагрузку, которое показало совпадение электромеханических характеристик с паспортными значениями АД серии ВАСО4-37-24.

8. Выполнено экспериментальное исследование модели ЭТК АВО в динамическом режиме, которое показало совпадение времени пуска с реальными показателями на производстве в отличие от работ, представленных в источниках, где время пуска модели АД превышает в 2,72 [10] и 11 [11] раз реальные пусковые показатели установок АВО газа.

9. Получены энергетические характеристики для ЭТК АВО газа (1 и 24 ед.).

10. Даны рекомендации по совершенствованию восстановления технологического режима при исчезновении напряжения с помощью автоматической системы группового пуска АД ЭТК АВО газа вместо ручного режима пуска.

11. Разработан алгоритм включения для ЭТК АВО при прямых пусках АД, обеспечивающий восстановление технологического режима в течение оптимального времени после исчезновения напряжения для централизованной системы

электрообеспечения. Серия экспериментов показала, что наиболее предпочтительным методом является поочередный запуск АД, т.к. при этом методе обеспечивается наиболее быстрое восстановление технологического режима без перегрузки источника электрообеспечения.

### Литература

1. Меньшов Б.Г. Суд И.И. Электрификация предприятий нефтяной и газовой промышленности. М.: Недра. 1984. 416 с.
2. Ziyodullo E. Holboiv F. Modernization of Control Systems of Electric Drives of Mine Lifting Machines. E3S Web of Conferences: 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition, Kemerovo, 3–5 октября 2018 г, Kemerovo: EDP Sciences, 2018.
3. Козярук А.Е. Энергоэффективные электротехнические комплексы горнодобывающих и транспортных машин // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 261-269.
4. Abdulhy Al-Ali M.A., Kornilov V.Y., Gorodnov A.G. Optimal operation of electrical power generators for wells operated by artificial lifting at Rumaila field. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 127-132.
5. Шклярский Я.Э., Замятина Е.Н., Замятин Е.О. Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 3. с. 339-347.
6. Городнов А.Г. Оценка энергоэффективности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия с автономной системой электрообеспечения // Инновационная наука в глобализующемся мире. 2020. № 1 (7). С. 30-31.
7. Савенко А.Е., Савенко П.С. Оптимизация использования автономного электротехнического комплекса на объектах нефтегазовой промышленности // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: материалы IV Международной научно-практической конференции; 16–18 октября 2019 г., Альметьевск: АГНИ, 2019. С. 429-432.
8. Xiaodong L., Omid G., Wilsun X. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. V. 53. N3. pp. 3164-3174.
9. Масков Л.Р., Корнилов В.Ю. Анализ структуры и энергетических параметров электротехнического комплекса газового промысла No1 ООО «Газпром добыча Ямбург» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 66-86. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-66-86.
10. Шабанов В.А., Пашкин В.В., Ивашкин О. Н. Моделирование процесса пуска электропривода АВО газа в режиме противовключения // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов конференции. Уфа: УГНТУ, 2013. С. 127-133.
11. Аршакян И.И., Артюхов И.И., Степанов С.Ф. Компенсация реактивной мощности в системах электрообеспечения аппаратов воздушного охлаждения газа // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 1(2). С. 92-100.
12. Qiong W., Saeed J., Francisco L. Parameter Estimation of Three-phase Transformer Models for Low-frequency Transient Studies from Terminal Measurements // IEEE Trans. Magnetics. 2017. V. 53. N7. pp. 1-8.
13. Wenxia S., Daixiao P., Ming Y., et al. Low-frequency model for single-phase transformers based on the three-component Preisach model considering deep saturation // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. V. 110. N2. pp. 107-117.
14. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MATLAB-SIMULINK с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12-24.
15. SimPower Systems. User's Guide Version 3. The MathWorks, Inc.; 2003. 620 p.
16. Wu B and Narimani M. High-Power converters and AC drives. Wiley-IEEE Press, 2nd ed. 2017.
17. Кузнецов Е.М., Зубов Д.Д., Кошман Р.В. Идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя в программной среде Multisim // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием; 17 мая 2018 г., Омск: ОГТУ, 2018. С. 248-251.
18. Макаров В.Г., Цвенгер И.Г., Шаряпов А.М., и др. Анализ спектральных характеристик тока асинхронного электропривода // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 7. С. 80-86.

19. Zhen G., Qing-wei Z. The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1060.
20. Пиляев С.Н., Афоничев Д.Н. Обоснование параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13. № 4 (67). С. 129-138.
21. Гридин В.М. Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. 2018. № 9. С. 44-48.
22. Мясовский В. А. Исследование методов расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по данным каталога производителя // Молодой ученый. 2020. № 20. (310). С. 127-133.
23. Фаттахов К. М., Фаттахов Р. К. Метод определения параметров схемы замещения асинхронной машины по паспортным и каталожным данным // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов конференции; 08–09 апреля 2011 г., Уфа: УГНТУ, 2011. С. 123-131.
24. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. 1998. №4. С. 38-42.
25. Влияние загрузки электродвигателей на коэффициенты полезного действия и мощности [Электронный ресурс] // Образовательный сайт Школа для электрика. URL: <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/1113-vlijanie-zagruzki-jelektrodvigatelej.html>. (дата обращения 21.01.2022).
26. Электропривод вентиляционной установки [Электронный ресурс] // Образовательный сайт. URL: <https://works.doklad.ru/view/1aTyWgvjBKc/2.html> (дата обращения 01.04.2022).
27. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных и воздухоудных установках. М.: Энергоатомиздат. 2006. 360 с.
28. Голубев М.Л. Расчет токов короткого замыкания в электросетях 0,4-35 кВ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1980. 88 с.

#### Авторы публикации

**Масков Линар Рамильевич** – аспирант кафедры приборостроения и мехатроники, Казанский государственный энергетический университет.

**Корнилов Владимир Юрьевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры приборостроения и мехатроники, Казанский государственный энергетический университет.

#### References

1. Men'shov BG, Sud II. Elektrifikatsiya predpriyatii neftyanoi i gazovoi promyshlennosti. Moscow: Nedra; 1984.
2. Ziyodullo E., Holboiv F. *Modernization of Control Systems of Electric Drives of Mine Lifting Machines. E3S Web of Conferences: 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition, Kemerovo, 3–5 Oct 2018*. Kemerovo: EDP Sciences, 2018. doi 10.1051/e3sconf/20184103006.
3. Kozyaruk AE. Energoeffektivnye elektrotekhnicheskie komplekсы gornodobyvayushchikh i transportnykh mashin. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016; 218: 261-269.
4. Abdulhy Al-Ali MA, Kornilov VY, Gorodnov AG. Optimal operation of electrical power generators for wells operated by artificial lifting at Rumaila field. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2018; 20(11-12):127-132. doi 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-127-132.
5. Shklyarskii YaE, Zamyatina EN, Zamyatin EO. Otsenka energeticheskoi effektivnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020; 3: 339-347.
6. Gorodnov AG. Otsenka energoeffektivnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa neftedobyvayushchego predpriyatiya s avtonomnoi sistemoi elektrosnabzheniya. *Innovatsionnaya nauka v globalizuyushchemsya mire*. 2020. 7 (1): 30-31.
7. Savenko AE, Savenko PS. Optimizatsiya ispol'zovaniya avtonomnogo elektrotekhnicheskogo kompleksa na ob'ektakh neftegazovoi promyshlennosti. *Dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya neftegazovoi otrasli: materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii; 16–18 Oct 2019*. Al'met'evsk. Russia: Al'met'evskii gosudarstvennyi neftyanoi institut, 2019. pp. 429-432.

8. Xiaodong L., Omid G., Wilsun X. *Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities. IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017; 53 (3): 3164-3174. doi: 10.1109/TIA.2016.2613984.
9. Maskov LR, Kornilov VYu. Analiz struktury i energeticheskikh parametrov elektrotekhnicheskogo kompleksa gazovogo promysla №1 OOO «Gazprom dobycha Yamburg» *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021. 23(6):66-86. doi 10.30724/1998-9903-2021-23-6-66-86.
10. Shabanov VA, Pashkin VV, Ivashkin ON. Modelirovanie protsessa puska elektroprivoda AVO gaza v rezhime protivovklyucheniya. *Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii: sbornik nauchnykh trudov konferentsii*. Ufa: Russia: Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet, 2013. pp. 127-133.
11. Arshakyan II, Artyukhov II, Stepanov SF. Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti v sistemakh elektrosnabzheniya apparatov vozdušnogo okhlazhdeniya gaza. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2004. 2(1): 92-100.
12. Qiong W., Saeed J., Francisco L. *Parameter Estimation of Three-phase Transformer Models for Low-frequency Transient Studies from Terminal Measurements. IEEE Trans. Magnetics*. 2017. 53(7): 1-8. doi:10.1109/TMAG.2016.2563389.
13. Wenxia S., Daixiao P., Ming Y., et al. *Low-frequency model for single-phase transformers based on the three-component Preisach model considering deep saturation International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018. 110(2):107-117. doi: 10.1016/j.ijepes.2019.02.050.
14. Novash IV, Rumyantsev YuV. Raschet parametrov modeli trekhfaznogo transformatora iz biblioteki MATLAB-SIMULINK s uchetom nasyshcheniya magnitoprovoida. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*. 2015. 1:12-24.
15. SimPower Systems. User's Guide Version 3. The MathWorks, Inc.; 2003.
16. Wu B., Narimani M. High-Power converters and AC drives. Wiley-IEEE Press, 2nd ed. 2017.
17. Kuznetsov EM, Zubov DD, Koshman RV. Identifikatsiya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo elektrodvigatelya v programmnoi srede Multisim. *Aktual'nye voprosy energetiki: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem; 17 Mart 2018*. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018. pp. 248-251.
18. Makarov VG, Tsvenger IG, Sharyapov AM, i dr. Analiz spektral'nykh kharakteristik toka asinkhronnogo elektroprivoda. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2018. 21(7):80-86.
19. Zhen G., Qing-wei Z. The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss. *Journal of Physics:Conference Series*. 2018. 1060. DOI:10.1088/1742-6596/1060/1/012085.
20. Pilyaev SN, Afonichev DN. Obosnovanie parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo elektrodvigatelya. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020. 13(4): 129-138. (In Russ). doi 10.17238/issn2071-2243.2020.4.129.
21. Gridin VM. Raschet kharakteristik asinkhronnykh dvigatelei po kataloghnym dannym. *Elektrichestvo*. 2018. 9: 44-48. doi 10.24160/0013-5380-2018-9-44-48.
22. Myasovskii VA. Issledovanie metodov rascheta parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya po dannym kataloga proizvoditelya. *Molodoi uchenyi*. 2020. 310 (20):127-133.
23. Fattakhov KM, Fattakhov RK. Metod opredeleniya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoi mashiny po pasportnym i kataloghnym dannym. *Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii: sbornik nauchnykh trudov konferentsii; 08-09 April 2011*. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet, 2011. pp. 123-131.
24. Moshchinskii YuA, Bepalov VYa, Kiryakin AA. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnykh dvigatelei po kataloghnym dannym. *Elektrichestvo*. 1998. 4:38-42.
25. Vliyanie zagruzki elektrodvigatelya na koeffitsienty poleznogo deistviya i moshchnosti [Elektronnyi resurs]. In: *Obrazovatel'nyi sait Shkola dlya elektrika*. Available at: <http://electricalschool.info/spravochnik/mashiny/1113-vliyanie-zagruzki-jelektrodvigatelyej.html>. Accessed: 21 Jan 2022.
26. Elektroprivod ventilyacionnoj ustanovki [Elektronnyj resurs]. In: *Obrazovatel'nyj sayt*. URL:<https://works.doklad.ru/view/1aTyWgvjBKc/2.html>. Accessed: 01 Apr. 2022.
27. Leznov BS. Energoberezhenie i reguliruemyi elektroprivod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh. Moscow.: Energoatomizdat, 2006.
28. Golubev ML. *Raschet tokov korotkogo замыкания в электроcетях 0,4-35 kV*. 2nd ed. Moscow: Energiya, 1980.

**Authors of the publication**

***Linar R. Maskov*** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

***Vladimir Y. Kornilov*** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

***Получено*** ***30.03.2022г.***

***Отредактировано*** ***06.04.2022г.***

***Получено*** ***20.04.2022г.***