

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С НАКОПИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В работе отмечена проблема развития ремонтной инфраструктуры для нового подвижного состава, в том числе с асинхронными тяговыми двигателями. В соответствии с этим в качестве объекта исследований выбран электротехнический комплекс для испытаний асинхронных двигателей. Рассмотрена схема испытаний пары асинхронных машин с применением метода взаимной нагрузки. Для сглаживания бросков тока в переходных режимах в данной схеме применен накопитель электрической энергии. В результате исследований получена математическая модель рассматриваемой схемы испытаний, которая учитывает наличие накопителя энергии, подключенного к звену постоянного тока схемы испытаний. Решение тестовой задачи для проверки работоспособности рассматриваемой схемы показало ее высокую эффективность при сглаживании бросков тока в переходных режимах в схеме взаимной нагрузки.

Ключевые слова: математическая модель, накопитель электрической энергии, электротехнический комплекс, взаимная нагрузка, асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, испытательный стенд, переходный режим.

В связи с необходимостью замены устаревающего парка железнодорожного подвижного состава постоянно внедряются новые типы электровозов и электропоездов (2ЭС10 «Гранит», 2ЭС8/3ЭС8 «Малахит» и ЭС104 «Ласточка») с тяговыми асинхронными двигателями [1]. В наши дни ведется активная разработка нового инновационного магистрального тепловоза 2ТЭ35А с тяговым двигателем А425-430 (ТАД430). Кроме этого, в последние годы происходит общее обновление и развитие промышленного оборудования, в котором также применяются асинхронные двигатели.

Внедрение новых образцов оборудования требует развития существующей инфраструктуры для их обслуживания и ремонта, а также создание новой инфраструктуры [2]. Кроме того, следует проводить работы по мониторингу, анализу, совершенствованию существующих методов и программ испытаний и, при необходимости, разработать новые.

Важность исследований и испытаний асинхронных двигателей зависит от проблем, которые необходимо решать в течение всего жизненного цикла оборудования. Одна из существенных проблем — высокая частота отказов асинхронных двигателей, работающих в сложных системах и в тяжелых условиях эксплуатации. Например, современные асинхронные двигатели, используемые в железнодо-

рожном транспорте, подвергаются самым суровым условиям эксплуатации и поэтому требуют регулярного ремонта и послеремонтных (приемо-сдаточных) испытаний.

Исследования [3–5] показали, что частое использование переходных режимов работы в асинхронных двигателях может привести к локальному перегреву изоляции обмотки статора, что ускоряет старение и приводит к возникновению межвитковых и межфазных замыканий.

Испытания асинхронных двигателей на нагрев [6, 7] (проводятся в течение одного часа при номинальном напряжении, номинальной выходной мощности или номинальном токе) предназначены для установившегося режима работы S1. Этот тип испытаний не дает качественной оценки нагрева асинхронного двигателя в переходных режимах работы. Следовательно, программа испытаний асинхронных двигателей должна быть расширена, чтобы включить переходные режимы работы, соответствующие S2...S3.

Среди методов, применяемых при нагрузочных испытаниях асинхронных двигателей, метод взаимной нагрузки является одним из наиболее энергоэффективных и разрешен к применению в соответствии с действующими инструкциями и ГОСТами. Вышеописанный метод уменьшает потребляемую

электрическую энергию из сети (приблизительно на 60...80 %) за счет того, что одна из машин работает в генераторном режиме и частично компенсирует энергию, потребляемую из сети другой машиной [8, 9, 10]. Метод взаимной нагрузки позволяет проводить испытания асинхронных двигателей большой мощности при более экономичном потреблении электроэнергии из питающей.

В моменте работы асинхронного двигателя в переходных режимах работы в питающей сети может возникать существенный бросок тока и снижение напряжения (наиболее яркий пример — прямой пуск двигателя). Также в ряде случаев возникают проблемы, обусловленные недостатком мощности питающего трансформатора или дефицитом мощности питающей сети. Мероприятия, направленные на решение данных проблем, могут быть связаны со значительными экономическими затратами.

Одним из вариантов решения указанных проблем является компенсация пиковых скачков потребления мощности из питающей сети путем применения накопителя электрической энергии. Данный накопитель может быть подключен в звено постоянного тока соединённых между собой частотных преобразователей, входящих в состав электротехнического комплекса для испытания асинхронных двигателей, как показано на рис. 1 [11].

В наши дни существует множество видов и типов накопителей электрической энергии, из которых выделим несколько основных, которые будут классифицироваться по множеству параметров, из которых отметим в качестве основных: конструктивные и электрические.

К основным конструктивным характеристикам накопителей можно отнести: способ запасаения

энергии: *химический* (аккумуляторные батареи, топливные элементы), *механический* (гидроаккумулирующие электростанции, аккумулированная энергия в виде сжатого воздуха, супермаховики) и *электрический* (конденсаторы, ионисторы и сверхпроводниковый магнитный аккумулятор). Электрические параметры у накопителей электрической энергии схожи с другим электрооборудованием, однако в качестве специфичных выделим: ток разряда и заряда, плотность заряда, внутреннее сопротивление. Также необходимо учитывать массогабаритные параметры накопителей электрической энергии, что в некоторых ситуациях может быть решающим фактором при выборе.

Для электротехнического комплекса, предназначенного для испытаний асинхронных двигателей, ввиду различных конструктивных параметров (требуемый максимальный ток разряда, мощность, энергоемкость, электрическая емкость, номинальное напряжение элемента и др.), целесообразно применить химические или электрические накопители электрической энергии. Ввиду того, что ионисторы (суперконденсаторы), как и обычные конденсаторы, обладают электрической емкостью, применение накопителя электрической энергии на их основе уменьшит пульсации тока и напряжения. К особенностям суперконденсаторов можно отнести низкое напряжение и небольшой разрядный ток единичного элемента. При применении таких элементов в накопителе электрической энергии потребуются соединения необходимого количества элементов в последовательные и параллельные ветви [12].

Ранее был разработан алгоритм расчета структуры электротехнического комплекса для испытаний асинхронных двигателей с короткозамкнутым

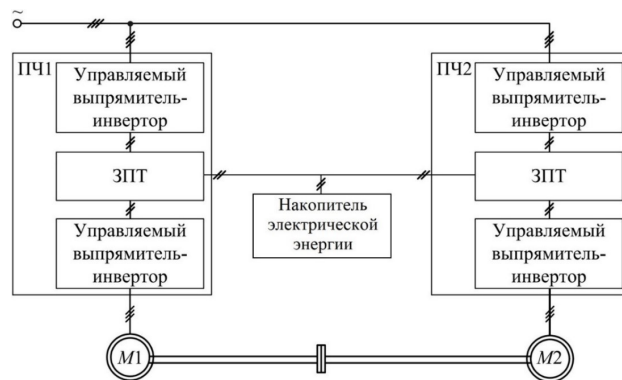


Рис. 1. Схема взаимной нагрузки асинхронных машин с двумя преобразователями частоты и накопителем электрической энергии

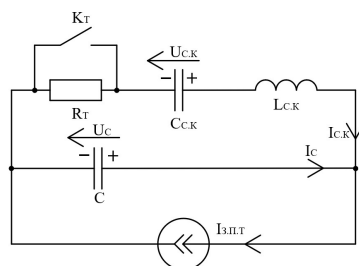


Рис. 2. Принципиальная схема звена постоянного тока электротехнического комплекса с накопителем электрической энергии

ротатором и параметров элементов, входящих в его состав, в том числе накопителя электрической энергии [13].

Для анализа режимов работы электротехнического комплекса предлагается использование математической модели, в состав которой входят два асинхронных двигателя с короткозамкнутыми

ротаторами, которые соединены между собой, и два преобразователя частоты. Данная математическая модель (1) включает в себя систему уравнений для расчета частоты вращения, токов статора и ротора асинхронного двигателя, а также выражения для расчета токов транзисторов и диодов, входящих в состав преобразователей частоты [14, 15].

$$\begin{cases}
 \frac{di1_{1a}}{dt} = \frac{1}{L1_1\sigma1} \left[u1_{1a} - i1_{1a}R1_1 + k1_r \left[i'_{2a}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1b} - i1_{1c}) + L1_2(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\
 \frac{di1_{1b}}{dt} = \frac{1}{L1_1\sigma1} \left[u1_{1b} - i1_{1b}R1_1 + k1_r \left[i'_{2b}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1c} - i1_{1a}) + L1_2(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\
 \frac{di1_{1c}}{dt} = \frac{1}{L1_1\sigma1} \left[u1_{1c} - i1_{1c}R1_1 + k1_r \left[i'_{2c}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1a} - i1_{1b}) + L1_2(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\
 \frac{di1'_{2a}}{dt} = \frac{-1}{L2_1\sigma1} \left[k1_s(u1_{1a} - i1_{1a}R1_1) + \left[i'_{2a}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1b} - i1_{1c}) + L1_2(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\
 \frac{di1'_{2b}}{dt} = \frac{-1}{L2_1\sigma1} \left[k1_s(u1_{1b} - i1_{1b}R1_1) + \left[i'_{2b}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1c} - i1_{1a}) + L1_2(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\
 \frac{di1'_{2c}}{dt} = \frac{-1}{L2_1\sigma1} \left[k1_s(u1_{1c} - i1_{1c}R1_1) + \left[i'_{2c}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1a} - i1_{1b}) + L1_2(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\
 \frac{d\omega}{dt} = \frac{-p}{J\sqrt{3}} \left[L1_{12}[\dot{i}1_{1a}(i'_{2b} - i'_{2c}) + \dot{i}1_{1b}(i'_{2c} - i'_{2a}) + \dot{i}1_{1c}(i'_{2a} - i'_{2b})] + \dots \right. \\
 \left. \dots + L2_{12}[\dot{i}2_{1a}(i'_{2b} - i'_{2c}) + \dot{i}2_{1b}(i'_{2c} - i'_{2a}) + \dot{i}2_{1c}(i'_{2a} - i'_{2b})] \right] - \frac{M_{\text{пот}}}{J} \text{sign}(\omega); \\
 \frac{di2_{1a}}{dt} = \frac{1}{L2_1\sigma2} \left[u2_{1a} - i2_{1a}R2_1 + k2_r \left[i'_{2a}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1b} - i2_{1c}) + L2_2(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\
 \frac{di2_{1b}}{dt} = \frac{1}{L2_1\sigma2} \left[u2_{1b} - i2_{1b}R2_1 + k2_r \left[i'_{2b}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1c} - i2_{1a}) + L2_2(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\
 \frac{di2_{1c}}{dt} = \frac{1}{L2_1\sigma2} \left[u2_{1c} - i2_{1c}R2_1 + k2_r \left[i'_{2c}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1a} - i2_{1b}) + L2_2(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\
 \frac{di2'_{2a}}{dt} = \frac{-1}{L2_2\sigma2} \left[k2_s(u2_{1a} - i2_{1a}R2_1) + \left[i'_{2a}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1b} - i2_{1c}) + L2_2(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\
 \frac{di2'_{2b}}{dt} = \frac{-1}{L2_2\sigma2} \left[k2_s(u2_{1b} - i2_{1b}R2_1) + \left[i'_{2b}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1c} - i2_{1a}) + L2_2(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\
 \frac{di2'_{2c}}{dt} = \frac{-1}{L2_2\sigma2} \left[k2_s(u2_{1c} - i2_{1c}R2_1) + \left[i'_{2c}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1a} - i2_{1b}) + L2_2(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right].
 \end{cases} \quad (1)$$

В приведенной системе уравнений использованы следующие обозначения: фазные напряжения, подведенные к обмоткам статора первой и второй машин, — $u1_{1a}$, $u1_{1b}$, $u1_{1c}$, $u2_{1a}$, $u2_{1b}$, $u2_{1c}$, активные сопротивления фазных обмоток статора асинхронных машин $R1_1$ и $R2_1$, приведенные сопротивления фазных обмоток ротора $R1'_1$ и $R2'_2$, количество пар полюсов p , индуктивности фазных обмоток статора и ротора $L1_1$, $L1_2$, $L2_1$, $L2_2$, взаимные индуктивности $L1_{12}$ и $L1_{21}$, коэффициенты магнитной связи ротора и статора $k1_r$, $k1_s$, $k2_r$, $k2_s$, коэффициенты рассеяния $\sigma1$ и $\sigma2$, токи статора первой и второй машины $di1_{1a}$, $di1_{1b}$, $di1_{1c}$, $di2_{1a}$, $di2_{1b}$, $di2_{1c}$, приведенные токи ротора первой и второй машины $di1'_{1a}$, $di1'_{1b}$, $di1'_{1c}$, $di2'_{1a}$, $di2'_{1b}$, $di2'_{1c}$, угловая скорость вращения ротора ω [12]. Такие механические параметры, как суммарный момент инерции вращающейся системы J и суммарный момент потерь $M_{\text{пот}}$ в двух асинхронных машинах, включены в седьмое уравнение.

С целью получения возможности проверки правильности определения параметров рассматриваемого электротехнического комплекса предлагается

дополнить математическую модель уравнениями, описывающими физические процессы, происходящие в звене постоянного тока с учетом подключенного к нему накопителя электрической энергии.

Предложенная схема замещения для звена постоянного тока электротехнического комплекса с подключенным накопителем электрической энергии (рис. 2) включает в себя: резистор R_T , ключ K_T моделирует транзистор, работающий в ключевом режиме, $C_{\text{с.к}}$ — емкость накопителя электрической энергии, $L_{\text{с.к}}$ — индуктивность накопителя электрической энергии, C — емкость конденсатора, подключенного в звено постоянного тока, $I_{\text{з.пт}}$ — ток в звене постоянного тока, $U_{\text{с.к}}$ — напряжение накопителя электрической энергии, U_C — напряжение конденсатора, подключенного в звено постоянного тока, $I_{\text{с.к}}$ — ток накопителя электрической энергии, I_C — ток конденсатора, подключенного в звено постоянного тока.

Математическая модель звена постоянного тока с подключенным накопителем электрической энергии имеет вид:

$$\begin{cases} -L_{C.K} \frac{dI_{C.K}}{dt} = I_{C.K} \cdot R_T - U_{C.K} + U_C; \\ I_{3.П.T} - I_{C.K} = I_C; \\ I_C = -C \cdot \frac{dU_C}{dt}; \\ I_{C.K} = -C_{C.K} \cdot \frac{dU_{C.K}}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

Для упрощения расчетов выполним следующие преобразования:

$$\begin{cases} -L_{C.K} \cdot C_{C.K} \cdot \frac{d^2 U_{C.K}}{dt^2} = C_{C.K} \cdot \frac{dU_{C.K}}{dt} \cdot R_T - C_{C.K} + C_C; \\ I_{3.П.T} + C_{C.K} \cdot \frac{dU_{C.K}}{dt} = -C \frac{dy_2}{dt}; \\ I_C = -C \cdot \frac{dU_C}{dt}; \\ I_{C.K} = -C_{C.K} \cdot \frac{dU_{C.K}}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

Введем переменные:

$$\begin{cases} y_0 = \frac{-dU_{C.K}}{dt} = \frac{-dy_1}{dt}; \\ y_1 = U_{C.K}; \\ y_2 = U_C. \end{cases} \quad (4)$$

Произведем замену:

$$\begin{cases} -L_{C.K} \cdot C_{C.K} \frac{dy_0}{dt} = C_{C.K} \cdot y_0 \cdot R_T - y_1 + y_2; \\ I_{3.П.T} - C_{C.K} \cdot y_0 = -C \frac{dy_2}{dt}; \\ \frac{dy_1}{dt} = -y_0. \end{cases} \quad (5)$$

После преобразований итоговая математическая модель будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dy_0}{dt} = -\frac{R_T}{L_{C.K}} \cdot y_0 + \frac{y_1 - y_2}{L_{C.K} \cdot C_{C.K}}; \\ \frac{dy_1}{dt} = -y_0; \\ \frac{dy_2}{dt} = +\frac{I_{3.П.T}}{C} - \frac{C_{C.K}}{C} \cdot y_0. \end{cases} \quad (6)$$

В качестве тестовой задачи для проверки разработанной математической модели выполнены следующие расчеты в программе Mathcad. Входными данными для расчетов приняты результаты моделирования пуска асинхронного двигателя мощностью 5,5 кВт с применением системы уравнений (1), дополненной выражениями для расчета токов в полупроводниковых элементах преобразователя частоты [14, 15].

На рис. 3 приведена временная диаграмма, отражающая изменение частоты вращения ротора асинхронного двигателя при его пуске в схеме взаимной нагрузки (рис. 2). Полученный при данном расчете ток асинхронного двигателя в звене постоянного тока преобразователей частоты приведен на рис. 4.

Полученные значения тока $I_{3.П.T}$ использованы в качестве исходных данных для системы уравнений (6).

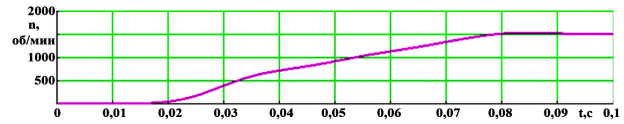


Рис. 3. Частота вращения ротора асинхронного двигателя при пуске

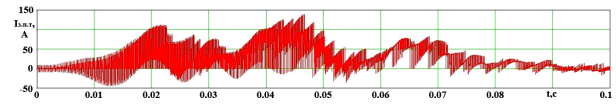


Рис. 4. Сила тока в звене постоянного тока преобразователя частоты $I_{3.П.T}$ при пуске асинхронного двигателя

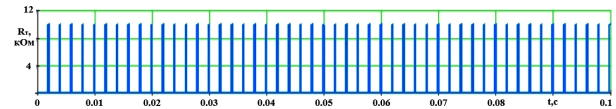


Рис. 5. Сопротивление R_T в ветви накопителя электрической энергии

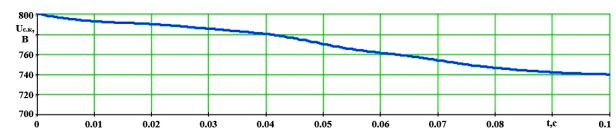


Рис. 6. Временная диаграмма напряжения суперконденсатора

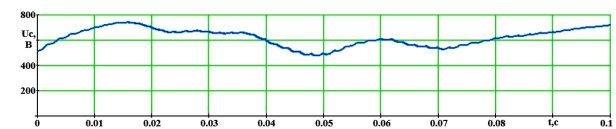


Рис. 7. Временная диаграмма напряжения на штатном конденсаторе звена постоянного тока

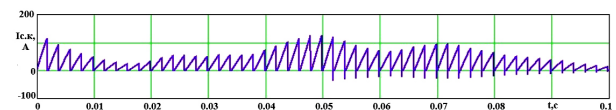


Рис. 8. Временная диаграмма тока разряда суперконденсатора

Для моделирования приняты следующие начальные условия:

$$U_{C.K} = 800 \text{ В}; U_C = 513 \text{ В}.$$

Параметры схемы замещения: $C_{C.K} = 50$ мФ; $C = 2$ мФ; $L_{C.K} = 4$ мГн; $R_T = 10$ кОм.

Резистор R_T имеет частоту подключения $f = 500$ Гц, коэффициент заполнения при работе ключа КТ (отношение длительности) равен 0,1 (рис. 5).

В результате моделирования получены временные диаграммы, приведенные на рис. 6–8.

Временная диаграмма напряжения суперконденсатора приведена на рис. 6.

Временная диаграмма напряжения на штатном конденсаторе преобразователя частоты приведена на рис. 7.

Временная диаграмма тока разряда суперконденсатора приведена на рис. 8.

Анализ временных диаграмм, полученных в результате математического моделирования, показывает, что при разгоне ротора двигателя происходят значительные по величине пульсации тока разряда суперконденсатора, которые существенно снижаются через 0,08 с.

При заданном подключении суперконденсатора в звене постоянного тока с отношением времени работы к периоду включения, равным 0,9, за расчетное время ($t_p = 0,1$ с) происходят значительные колебания напряжения на конденсаторе C_K и разряд накопителя электрической энергии с уменьшением напряжения до 740 В. Колебания напряжений на расчетных диаграммах соответствуют изменениям графиков тока звена постоянного тока и накопителя электрической энергии (рис. 4 и 8): при наибольших токах звена постоянного тока происходит более быстрый разряд накопителя электрической энергии и уменьшение напряжения U_C . Высокие токи суперконденсатора соответствуют не только высоким токам звена постоянного тока, но и перетоку заряда на емкость C , обусловленному значительной разностью напряжений ($U_{C_K} - U_C$) в начале переходного процесса.

Полученная система уравнений (5) дополняет известную математическую модель электротехнического комплекса для испытания асинхронного двигателя методом взаимной нагрузки. Данные выражения позволяют рассчитать ток разряда, напряжение накопителя электрической энергии подключенного в звено постоянного тока, в переходных режимах работы электротехнического комплекса. Дополненная новыми выражениями математическая модель позволяет получить данные, необходимые при выборе оборудования в соответствии с разработанной ранее методикой проектирования накопителя электрической энергии [16].

Библиографический список

1. Сайт группы компаний СИНАРА. URL: <https://sinaratm.ru/media/news/> (дата обращения: 26.03.2024).
2. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года (утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAgA2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 26.03.2024).
3. Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю., Худоногов А. М., Иванов В. Н. Теоретическое обоснование механизма локального перегрева изоляции в режиме пуска асинхронных вспомогательных машин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т. 2. С. 378–382. EDN: WHUPDR.
4. Иванов П. Ю., Агафонов В. М., Дульский Е. Ю. Математическое моделирование процесса нагрева изоляции обмотки статора асинхронной вспомогательной машины электровоза // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 183–189. EDN: VSYEJN.
5. Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю., Худоногов А. М. Локальный перегрев изоляции асинхронных вспомогательных машин электровозов в переходных режимах работы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20, № 11 (118). С. 194–200. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-194-200. EDN: XEFJJJ.
6. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. Введ. 01–01–1998. Москва: Изд-во стандартов, 2002. 41 с.
7. ГОСТ Р 53472-2009. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. Введ. 01–01–2021. Москва: Стандартинформ, 2011. 42 с.

8. Попов Д. И. Разработка алгоритма выбора схемы испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 2. С. 458–462. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-458-462. EDN: WDQVBP.

9. Снарков И. М. Повышение энергоэффективности испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки // Энергия-2019: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 6 т. Иваново, 02–04 апреля 2019 г. Иваново: Изд-во ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2019. Т. 4. С. 29. EDN: VURAGY.

10. Казаков Ю. Б., Палилов И. А., Гуляев И. В. Анализ электромеханических процессов в асинхронных машинах при испытаниях методом взаимной нагрузки с рекуперацией энергии в сеть // Электротехника. 2020. № 1. С. 2–8. EDN: KSYGTR.

11. Пат. 217790 U1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Схема испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки / Харламов В. В., Попов Д. И., Соколов П. С. № 2023102066; заявл. 30.01.2023; опубл. 18.04.2023. Бюл. № 11.

12. Незевак В. Л., Дмитриев А. Д., Самолинов С. С. Моделирование кратковременных режимов работы тяговых накопителей электроэнергии // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 2 (105). С. 6–17. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-2-1. EDN: P1DNT.

13. Соколов П. С., Попов Д. И. Разработка методики расчета параметров элементов электротехнического комплекса для испытания асинхронных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 6. С. 265–271. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-6-265-271. EDN: ERRNWS.

14. Попов Д. И. Разработка научных основ построения электротехнических комплексов для испытания тяговых электротехнических машин методом взаимной нагрузки: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2022. 365 с.

15. Попов Д. И. Математическое моделирование физических процессов в испытательных комплексах электрических машин // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 79–84. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-79-84. EDN: XZBIPZ.

16. Харламов В. В., Попов Д. И., Соколов П. С. Проектирование накопителя электроэнергии для электротехнических комплексов, предназначенных для испытания асинхронных двигателей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 8. С. 513–521. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-513-514. EDN: STUFBQ.

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: emoe@omgups.ru

ПОПОВ Денис Игоревич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 8506-9250

AuthorID (РИНЦ): 657177

ORCID: 0000-0001-9519-1062
AuthorID (SCOPUS): 57200090858
Адрес для переписки: porovomsk@yandex.ru
СОКОЛОВ Павел Сергеевич, аспирант кафедры
«Электрические машины и общая электротехника»
ОмГУПС, г. Омск.
SPIN-код: 9475-2198
AuthorID (РИНЦ): 822996
ORCID: 0000-0001-9945-8836
Адрес для переписки: емое@omgups.ru

Для цитирования

Харламов В. В., Попов Д. И., Соколов П. С. Математическая модель электротехнического комплекса с накопителем электрической энергии для испытания асинхронных двигателей // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 76–82.
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-76-82.

Статья поступила в редакцию 04.04.2024 г.
© В. В. Харламов, Д. И. Попов, П. С. Соколов

UDC 621.313.33; 621.314
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-76-82
EDN: MKXFYN

V. V. KHARLAMOV
D. I. POPOV
P. S. SOKOLOV

Omsk State Transport University,
Omsk, Russia

MATHEMATICAL MODEL OF AN ELECTRICAL COMPLEX WITH THE DEVICE OF ELECTRICAL ENERGY STORAGE FOR TESTING INDUCTION MOTORS

The research highlights the problem of developing repair infrastructure for new rolling stock, including those with asynchronous traction motors. Therefore, an electrical engineering complex for testing asynchronous motors was chosen as the object of research. The scheme of testing a pair of asynchronous machines using the method of mutual loading is considered. To smooth out current surges in transient modes, an electric energy storage device is used in this scheme. As a result of the research, a mathematical model of the test circuit in question was obtained, which considered an energy storage device connected to a DC link of the test circuit. The solution of the test problem to verify the operability of the considered circuit showed its high efficiency in smoothing current surges in transient modes in the mutual load circuit.

Keywords: mathematical model, electric energy storage, electrical engineering complex, mutual load, asynchronous motor, short-circuited rotor, test bench, transient mode.

References

1. Sayt gruppy kompaniy SINARA [Website of the SINARA Group of companies]. URL: <https://sinaratm.ru/media/news/> (accessed: 26.03.2024). (In Russ.).
2. Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossiyskiye zheleznyye dorogi» do 2025 goda (utv. rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19 marta 2019 g. № 466-p [Long-term development program of JSC «Russian Railways» until 2025 (Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 No. 466-p. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAGA2RXSVoKu.pdf> (accessed: 26.03.2024). (In Russ.).
3. Ivanov P. Yu., Dul'skiy E. Yu., Khudonogov A. M., Ivanov V. N. Teoreticheskoye obosnovaniye mekhanizma lokal'nogo peregreva izolyatsii v rezhime puska asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin [Theoretical substantiation of the mechanism of local overheating of insulation in the start-up mode of asynchronous auxiliary machines] // *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. Transport Infrastructure of the Siberian Region*. 2016. Vol. 2. P. 378–382. EDN: WHUPDR. (In Russ.).
4. Ivanov P. Yu., Agafonov V. M., Dul'skiy E. Yu. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa nagreva izolyatsii obmotki statora asinkhronnoy vspomogatel'noy mashiny elektrovoza [Mathematical modeling of the process of heating of stator winding insulation of electric locomotive's asynchronous auxiliary machine] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye. Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2016. No. 1 (49). P. 183–189. EDN: VSYEJN. (In Russ.).
5. Ivanov P. Yu., Dul'skiy E. Yu., Khudonogov A. M. Lokal'nyy peregreva izolyatsii asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin elektrovozov v perekhodnykh rezhimakh raboty [Local insulation overheating of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives in transient operating conditions] // *Vestnik*

Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016. Vol. 20, no. 11 (118). P. 194–200. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-194-200. EDN: XEFJJJ. (In Russ.).

6. GOST 7217-87. Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiyey. Dvigateli asinkhronnyye. Metody ispytaniy [Rotating electrical machines. Asynchronous motors. Test methods]. Moscow, 2002. 41 p. (In Russ.).

7. GOST R 53472-2009. Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiyey. Dvigateli asinkhronnyye. Metody ispytaniy [Rotating electrical machines. Asynchronous motors. Test methods]. Moscow, 2011. 42 p. (In Russ.).

8. Popov D. I. Razrabotka algoritma vybora skhemy ispytaniy asinkhronnykh dvigateley metodom vzaimnoy nagruzki [Development of an algorithm for selecting a test scheme for induction motors by the method of mutual loading] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023. No. 2. P. 458–462. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-458-462. EDN: WDQVBP. (In Russ.).

9. Snarov I. M. Povysheniye energoeffektivnosti ispytaniy asinkhronnykh mashin metodom vzaimnoy nagruzki [Improving the energy efficiency of testing asynchronous machines by the method of mutual loading] // *Energia-2019. Energia-2019*. In 6 vols. Ivanovo, 2019. Vol. 4. P. 29. EDN: VURAGY. (In Russ.).

10. Kazakov Yu. B., Palilov I. A., Gulyayev I. V. Analiz elektromekhanicheskikh protsessov v asinkhronnykh mashinakh pri ispytaniyakh metodom vzaimnoy nagruzki s rekuperatsiyey energii v set' [Analysis of electromechanical processes in asynchronous machines during tests by the method of mutual loading with energy recovery into the network] // *Elektrotehnika. Electrical Engineering*. 2020. No. 1. P. 2–8. EDN: KSYGTR. (In Russ.).

11. Patent 217790 U1 Russian Federation, IPC G01 R31/34. Skhema ispytaniya asinkhronnykh mashin metodom vzaimnoy nagruzki [Scheme of testing asynchronous machines by the method of mutual load] / Kharlamov V. V., Popov D. I., Sokolov P. S. No. 2023102066. (In Russ.).

12. Nezevak V. L., Dmitriyev A. D., Samolinov S. S. Modelirovaniye kratkovremennykh rezhimov raboty tyagovykh napoyteley elektroenergii [Simulation of short-term modes of operation of traction power storage devices] // *Mir transporta. World of Transport and Transportation*. 2023. Vol. 21, no. 2 (105). P. 6–17. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-2-1. EDN: PIIDNT. (In Russ.).

13. Sokolov P. S., Popov D. I. Razrabotka metodiki rascheta parametrov elementov elektrotekhnicheskogo kompleksa dlya ispytaniya asinkhronnykh mashin [Development of a methodology for calculating the parameters of elements of an electrical complex for testing asynchronous machines] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2022. No. 6. P. 265–271. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-6-265-271. EDN: ERRNWS. (In Russ.).

14. Popov D. I. Razrabotka nauchnykh osnov postroyeniya elektrotekhnicheskikh kompleksov dlya ispytaniya tyagovykh

elektricheskikh mashin metodom vzaimnoy nagruzki [Development of scientific foundations for the construction of electrotechnical complexes for testing traction electric machines by the method of mutual loading]. Omsk, 2022. 365 p. (In Russ.).

15. Popov D. I. Matematicheskoye modelirovaniye fizicheskikh protsessov v ispyatel'nykh kompleksakh elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of physical processes in test complexes of electric machines] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 4 (160). P. 79–84. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-79-84. EDN: XZBIPZ. (In Russ.).

16. Kharlamov V. V., Popov D. I., Sokolov P. S. Proyektirovaniye napoytelya elektroenergii dlya elektrotekhnicheskikh kompleksov, prednaznachennykh dlya ispytaniya asinkhronnykh dvigateley [Designing an electric power storage device for electrotechnical complexes intended for testing asynchronous motors] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023. No. 8. P. 513–521. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-513-514. EDN: CTUFBQ. (In Russ.).

KHARLAMOV Viktor Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.

SPIN-code: 5093-8463

AuthorID (RSCI): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Correspondence address: emoe@omgups.ru

POPOV Denis Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 8506-9250

AuthorID (RSCI): 657177

ORCID: 0000-0001-9519-1062

AuthorID (SCOPUS): 57200090858

Correspondence address: popovomsk@yandex.ru

SOKOLOV Pavel Sergeevich, Graduate Student of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 9475-2198

AuthorID (RSCI): 822996

ORCID: 0000-0001-9945-8836

Correspondence address: emoe@omgups.ru

For citations

Kharlamov V. V., Popov D. I., Sokolov P. S. Mathematical model of an electrical complex with the device of electrical energy storage for testing induction motors // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 76–82. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-76-82.

Received April 04, 2024.

© V. V. Kharlamov, D. I. Popov, P. S. Sokolov