



УДК 621.313.333:621.372.632  
DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-44-49

**В. В. ХАРЛАМОВ**  
**Д. И. ПОПОВ**  
**П. С. СОКОЛОВ**  
**Л. Е. СЕРКОВА**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье представлены результаты сопоставления экспериментальных исследований и математического моделирования работы стенда для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки. Приведено детальное описание состава экспериментальной установки, основу которой составляют пара преобразователей частоты и подключенная к ним пара двигателей типа АИС71В4 номинальной мощностью 0,75 кВт, валы которых жестко соединены муфтой. Представлена математическая модель электромеханической системы, примененная при расчетах, и перечислены ее основные допущения. Приведены таблица значений параметров и графики, полученные по расчетным и экспериментальным данным. Анализ полученных данных показал возможность применения рассмотренной математической модели с имеющимися допущениями при проектировании электротехнических комплексов, предназначенных для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки.

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования, тяговый двигатель, испытательный стенд, преобразователь частоты, математическая модель, сопоставление результатов.

Преимущества в эксплуатационных качествах асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АДКР) над остальными типами электродвигателей, а также современное состояние развития элементной базы силовых транзисторов и преобразователей на их основе позволило установиться тренду на расширение сфер применения АДКР. В первую очередь, АДКР вытесняют коллекторные двигатели из тяги как на железнодорожном, так и на других видах транспорта (например, самосвалы, работающие на угольных разрезах и др.) [1–3].

Разработка электротехнических комплексов для испытаний электрических машин требует созда-

ния перспективных схемных решений, адекватных математических моделей физических процессов в данных комплексах, а также эффективных методов расчета их параметров. Известны исследования в данном направлении нескольких научных коллективов в России и ближнем зарубежье [4–11].

Математические модели различных типов электротехнических комплексов для испытания АДКР описаны в работах [12, 13]. Основой таких моделей является система уравнений, описывающая работу двух асинхронных машин с жестко связанными валами и питающихся от напряжений, образованных путем широко-импульсной модуляции (ШИМ):

$$\begin{aligned}
\frac{di1_{1a}}{dt} &= \frac{1}{L_1\sigma_1} \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}{L_1\sigma_1} \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}{L_1\sigma_1} \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{di'_{2a}}{dt} &= \frac{-1}{L_2\sigma_1} \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{di'_{2b}}{dt} &= \frac{-1}{L_2\sigma_1} \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{di'_{2c}}{dt} &= \frac{-1}{L_2\sigma_1} \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} [i1_{1a}(i'_{2b} - i'_{2c}) + i1_{1b}(i'_{2c} - i'_{2a}) + i1_{1c}(i'_{2a} - i'_{2b})] + \dots \right. \\
&\quad \left. \dots + L2_{12} [i2_{1a}(i'_{2b} - i'_{2c}) + i2_{1b}(i'_{2c} - i'_{2a}) + i2_{1c}(i'_{2a} - i'_{2b})] \right] - \frac{M_{\text{порт}}}{J} \text{sign}(\omega); \\
\frac{di2_{1a}}{dt} &= \frac{1}{L2_1\sigma_2} \left[ u2_{1a} - i2_{1a}R1_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\sigma_2} \left[ u2_{1b} - i2_{1b}R1_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\sigma_2} \left[ u2_{1c} - i2_{1c}R1_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{di'_{2a}}{dt} &= \frac{-1}{L2_2\sigma_2} \left[ k2_s(u2_{1a} - i2_{1a}R1_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{di'_{2b}}{dt} &= \frac{-1}{L2_2\sigma_2} \left[ k2_s(u2_{1b} - i2_{1b}R1_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{di'_{2c}}{dt} &= \frac{-1}{L2_2\sigma_2} \left[ k2_s(u2_{1c} - i2_{1c}R1_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{aligned} \tag{1}$$

Более подробное описание данной математической модели приведено в [14]. Математическая модель (1) имеет ряд допущений: механическая связь валов АДКР считается абсолютно жесткой, не учитываются нелинейность характеристик намагничивания и реальные фронты импульсов напряжения при ШИМ, постоянными принимаются механические потери, индуктивности и активные сопротивления обмоток и др. Уточнение данной математической модели с целью учета названных явлений принципиально возможно, но при незначительном усложнении расчетов ведет к значительным трудностям достоверного определения дополнительных входных параметров, что ставит вопрос о целесообразности такого уточнения. Для ответа на данный вопрос необходима оценка возможного отклонения результатов расчёта параметров рассматриваемого электротехнического комплекса, обусловленного наличием принятых допущений, от параметров реального объекта.

С целью выполнения данной оценки проведено математическое моделирование и эксперименталь-

ные исследования на стенде с парой асинхронных двигателей типа АИС71В4 со следующими номинальными параметрами: полезная мощность  $P_n = 370$  Вт, КПД  $\eta_n = 65\%$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_n = 0,74$ , линейный ток 1,17 А, линейное напряжение 380 В. Данные двигатели имеют близкие номинальные скорости вращения ротора: 1370 об/мин и 1350 об/мин. Параметры схемы замещения определены по методике, приведенной в [15]. Данная методика не дает однозначных значений параметров схемы замещения АДКР, т.к. предполагает их расчет через ряд коэффициентов, выбираемых из достаточно широких диапазонов. Данные коэффициенты в настоящем исследовании определены методом последовательных приближений по критерию минимизации расхождения экспериментальных и расчетных значений токов и мощностей в режиме холостого хода и номинальной нагрузки. В расчете действующее значение первой гармоники линейного напряжения на выходе преобразователей частоты (ПЧ) задано равным 380 В, значение момента инерции принято усредненным

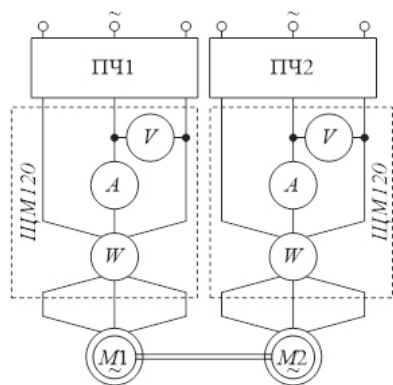


Рис. 1. Схема испытаний

из справочных данных для двигателей-аналогов [16]. Принципиальная схема испытаний приведена на рис. 1.

Измерение напряжения, тока и мощности выполнены многофункциональным прибором ЩМ120, внесенным в Государственный реестр средств измерения РФ. Данный прибор имеет следующие погрешности: при измерении мощности основную приведенную — 0,5 % и дополнительную — 0,5 %, при измерении тока и напряжения основную приведенную — 0,2 % и дополнительную — 0,4 %. Допустимый коэффициент искажения синусоидальности входного напряжения при измерениях прибором ЩМ120 не должен превышать 20 %. Частота на-

пряжения определялась по показаниям индикатора, встроенного в преобразователи частоты (ПЧ1 и ПЧ2) *Emerson Unidrive SP0401* испытательного стенда. Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 1.

Частота напряжения на выходе ПЧ1 задавалась равной 50 Гц, на выходе ПЧ2 — равной  $(50 - \Delta f)$  Гц. Величины напряжения, тока и мощности, имеющие число «1» после буквенного обозначения ( $U1$ ,  $I1$ ,  $P1$ ), относятся к электрической цепи двигателя  $M1$  (см. рис. 1), те же величины, имеющие число «2» после буквенного обозначения ( $U2$ ,  $I2$ ,  $P2$ ), относятся к электрической цепи двигателя  $M2$ . Далее по тексту принят такой же принцип при обозначении различных величин.

Для упрощения анализа степени адекватности математической модели реальному объекту построены сравнительные графики, приведенные на рис. 2, 3. Значения мощностей и токов на графиках приведены в относительных единицах, за базис которых приняты соответствующие номинальные величины.

Как показывает анализ кривых, приведенных на рис. 2а, характер изменения мощности потребляемой первой машиной ( $M1$ ), работающей в двигательном режиме, и второй машиной, работающей в генераторном режиме ( $M2$ ), по измерениям и расчетам близко совпадает. На рис. 2а сплошная линия соответствует экспериментальным данным, пунктирная линия — расчетным данным. Относительная разность данных величин, найденная по выражению

Таблица 1

## Результаты измерений и расчетов

Эксперимент						$\Delta f$ , Гц	Расчет			
$U1$ , В	$U2$ , В	$P1$ , Вт	$P2$ , Вт	$I1$ , А	$I2$ , А		$P1$ , Вт	$P2$ , Вт	$I1$ , А	$I2$ , А
391,0	391,0	71	81	0,635	0,784	0	73	83	0,667	0,851
389,2	391,5	178	0	0,653	0,885	1,5	168	0	0,684	0,870
388,5	389,8	262	-60	0,713	0,990	2,5	236	-56	0,713	0,991
386,9	382,7	360	-120	0,815	1,076	3,8	326	-115	0,797	0,989
384,4	375,1	465	-169	0,949	1,175	5,2	425	-172	0,910	1,064
383,1	367,3	567	-205	1,096	1,276	6,6	529	-219	1,052	1,172

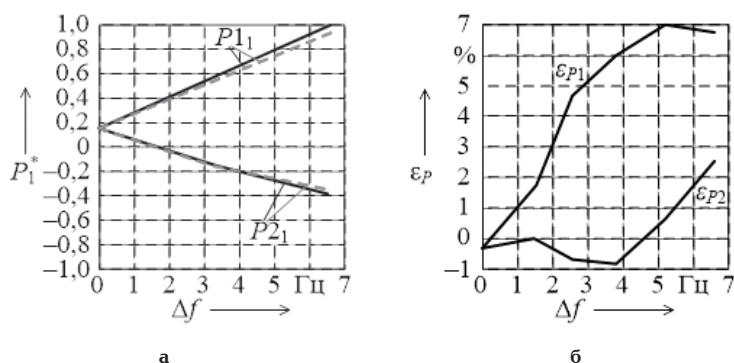


Рис. 2. Сопоставление измеренных и расчетных значений мощностей

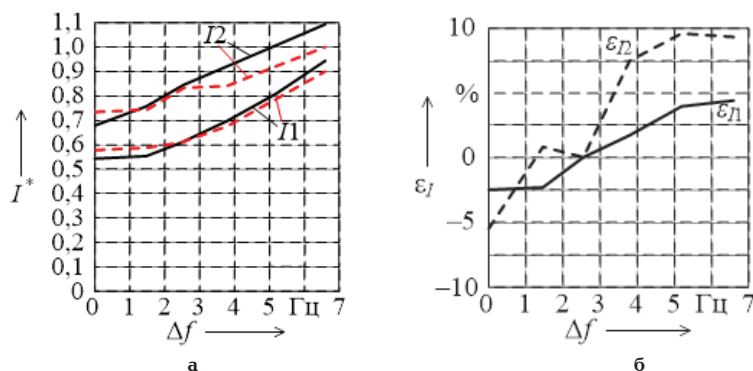


Рис. 3. Сопоставление измеренных и расчетных значений токов

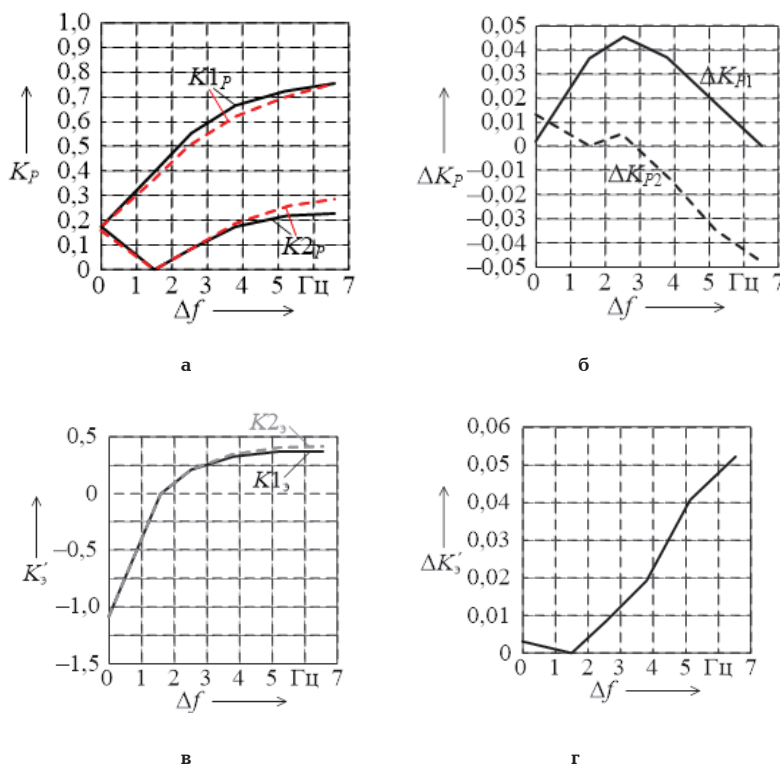


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных и расчетных энергетических характеристик

$$\varepsilon_p = \frac{P_{\text{измеренная}} - P_{\text{расчетная}}}{P_{\text{измеренная}}}, \quad (2)$$

приведена на рис. 2б и не превышает  $\pm 7\%$  для машины M1 и  $\pm 2,5\%$  для машины M2 на всем диапазоне изменения нагрузки, задаваемой величиной  $\Delta f$ . Таким образом, расчетные значения мощности лишь немного превышают величину абсолютной погрешности измерения мощности прибора ЩМ120, равную 32,909 Вт.

Характер изменения действующего значения линейного тока при изменении нагрузки также совпадает для измеренных и расчетных данных в соответствии с рис. 3а (сплошная линия — для экспериментальных данных, пунктирная линия — для расчетных данных). Относительная разность измеренных и расчетных токов, найденная по выражению

$$\varepsilon_I = \frac{I_{\text{измеренный}} - I_{\text{расчетный}}}{I_{\text{измеренный}}}, \quad (3)$$

приведена на рис. 3б и не превышает  $\pm 5\%$  для машины M1 и  $\pm 10\%$  для машины M2 на всем диапазоне изменения нагрузки.

Сравнение результатов экспериментов и математического моделирования по энергетическим характеристикам приведено на рис. 4.

Коэффициент мощности  $K_p$ , найденный как отношение активной мощности к полной мощности (с учетом всех гармонических составляющих), при изменении нагрузки приведен на рис. 4а: сплошная линия — для экспериментальных данных, пунктирная линия — для расчетных данных.

Разность экспериментального и расчетного коэффициента мощности не превышает  $\pm 0,05$  для обеих машин.

При нагрузке, близкой к номинальной (при  $\Delta f = 6,6$  Гц), для машины, работающей в двигательном режиме  $K_{1p}$  достигает значения, близкого к паспортному  $\cos\varphi_n = 0,74$  (см. рис. 4а).

Для оценки энергетической эффективности метода взаимной нагрузки в работе [17] предложен коэффициент

$$K'_3 = \eta_1 \cdot \eta_2, \quad (4)$$

который иначе может быть найден по выражению

$$K'_3 = \frac{P_2}{P_1}. \quad (5)$$

Данный коэффициент показывает, какая доля затрат энергии, необходимой на нагружение испытуемого двигателя, компенсируется энергией, вырабатываемой машиной, работающей в генераторном режиме.

Как показывает анализ полученных данных, коэффициент энергетической эффективности  $K'_3$ , полученный по расчету, отличается от экспериментального не более чем на 0,053 на всем диапазоне нагрузок.

Таким образом, в проведенной работе получены следующие основные результаты. Выполнен анализ соответствия данных, получаемых путем математического моделирования с применением системы уравнений (1), данным реального объекта — стенда для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки. Проведенный анализ для установившихся режимов работы показал, что математическая модель позволяет получить результаты, адекватные реальному объекту, пригодные для анализа его параметров при режиме работы от холостого хода до номинальной нагрузки.

Математическая модель, выраженная системой уравнений (1) с имеющимися в ней допущениями, может быть применена в процессе разработки стендов для испытания асинхронных двигателей, например, при выборе параметров коммутационной и другой аппаратуры, с учетом оценки возможных отклонений реальных значений токов от расчетных.

#### Библиографический список

1. Struhariňanský E., Vittek J., Makyš P. [et al.]. Vector control techniques for traction drive with induction machines — comparison // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 851–856. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.147.
2. Steimel A. Power-electronic grid supply of AC railway systems // *Proc. of the 13th Intern. Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*. 2012. DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231844.
3. Bulucea C. A., Nicola D. A., Rosen M. A. [et al.]. Operation analysis of AC traction motors in terms of electromagnetic torque capability on sustainable railway vehicles // *MATEC Web Conf.* 2016. Vol. 76. DOI: 10.1051/mateconf/20167602005.
4. Beyerleyn E. V., Tyuteva P. V. Energy efficiency of back-to-back method for induction traction motors testing // *Proc. of the 15th Intern. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM)*. 2014. P. 359–361. DOI: 10.1109/EDM.2014.6882547.
5. Синявский И. В., Жирков А. И., Курочка А. А. Стенд для испытаний асинхронных тяговых электродвигателей // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения*. 2014. № 1 (67). С. 3–12.
6. Пат. 2200960 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Устройство для испытаний бесколлекторных электрических машин переменного тока / Курбасов А. С., Таргонский И. Л., Долгошеев Э. А. № 2001101213/09; заявл. 12.01.01; опубл. 20.03.03, Бюл. № 8.
7. Пат. 99186 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Стенд для испытаний асинхронного тягового электродвигателя / Козлов Л. Г., Осипов С. С., Феоктистов В. П., Конова-

лов В. А. № 2010122670/28; заявл. 04.06.10; опубл. 10.11.10, Бюл. № 31.

8. Владимиров О. В., Ившин И. В., Низамиев М. Ф. [и др.]. Стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей напряжением до 1000 В // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21, № 3-4. С. 58–66. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-58-66.
9. Захаренко В. С., Науменко Р. С. Имитационная модель энергосберегающего электромеханического испытательного стенда на основе асинхронных электродвигателей, управляемых преобразователями частоты с векторным управлением // *Энергоэффективность*. 2019. № 10. С. 22–27.
10. Афанасов А. М. Определение рациональных режимов взаимного нагружения тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта // *Наука та прогрес транспорту*. 2014. № 4 (52). С. 67–74.
11. 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.
12. 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.
13. Kharlamov V. V., Popov D. I. Mathematical modeling of physical processes in the complex for testing of induction machines // *MATEC Web Conf.* 2018. Vol. 239. P. 01055. DOI: 10.1051/mateconf/201823901055.
14. Попов Д. И. Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин: моногр. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2019. 175 с.
15. Фираго Б. И., Павлячик Л. Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Мн.: Техноперспектива, 2006. 363 с. ISBN 985-6591-37-6.
16. Кацман М. М. Справочник по электрическим машинам. М.: Академия, 2005. 480 с. ISBN 5-7695-1686-0.
17. Попов Д. И. Определение коэффициента экономичности электротехнических комплексов для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки // *Вопросы электротехнологии*. 2020. № 1 (26). С. 40–45.

**ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: emoe@omgups.ru

**ПОПОВ Денис Игоревич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 8506-9250

AuthorID (РИНЦ): 657177

ORCID: 0000-0001-9519-1062

AuthorID (SCOPUS): 57200090858

Адрес для переписки: popovomsk@yandex.ru

**СОКОЛОВ Павел Сергеевич**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 9475-2198

AuthorID (РИНЦ): 822996

Адрес для переписки: емое@omgups.ru

**СЕРКОВА Любовь Ефимовна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 6564-9152

AuthorID (РИНЦ): 677015

AuthorID (SCOPUS): 6603655796

Адрес для переписки: sle2000-12@yandex.ru

#### Для цитирования

Харламов В. В., Попов Д. И., Соколов П. С., Серкова Л. Е. Экспериментальные исследования метода взаимной нагрузки асинхронных двигателей // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 44 – 49. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-44-49.

Статья поступила в редакцию 10.07.2020 г.

© В. В. Харламов, Д. И. Попов, П. С. Соколов, Л. Е. Серкова