

DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-141-149

УДК 621.313.333:621.372.632

ББК 31.261.63+31.264.5+34.47

В.В. ХАРЛАМОВ, Д.И. ПОПОВ, Р.В. СЕРГЕЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗВЕНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА СХЕМЫ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Ключевые слова: математическое моделирование, испытательный комплекс, определение мощности, асинхронный двигатель, метод взаимной нагрузки, звено постоянного тока, схема испытаний.

В статье отмечена тенденция внедрения асинхронных двигателей, в свою очередь влекущая необходимость внедрения оборудования, предназначенного для осуществления их технического обслуживания, ремонта и приемо-сдаточных испытаний. Выделена общая часть схем испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с двумя управляемыми инверторами. Показана математическая модель работы подобных схем. Приведены результаты математического моделирования физических процессов в звене постоянного тока схем взаимной нагрузки асинхронных машин. Отмечены значительные пульсации постоянного напряжения и тока в данных схемах. Рассмотрена проблема измерения мощности в звене постоянного тока, проходящей через один инвертор к испытуемому двигателю и через другой инвертор от нагрузочного генератора. Выполнен расчет данных мощностей в установившихся режимах для асинхронных машин номинальной мощностью 0,37 кВт, 5,5 кВт и 250 кВт при различных значениях емкости конденсатора, включенного в звено постоянного тока. По результатам расчетов построены зависимости относительной величины методической погрешности определения мощности в звене постоянного тока по произведению действующих значений пульсирующего напряжения и тока. За истинное значение мощности принято действующее значение от произведения мгновенных значений напряжения и тока на некотором интервале времени. Показано, что при емкости конденсатора выше некоторого критического значения данная методическая погрешность не превышает 0,9% при номинальной мощности испытуемых двигателей 0,37 кВт; 0,3% – при мощности 5,5 кВт; 0,2% – при мощности 250 кВт. При снижении емкости конденсатора данная погрешность резко возрастает. Показано, что значение емкости, соответствующее перегибу рассмотренной зависимости, приблизительно соответствует значению, необходимому для ограничения пульсаций напряжения в звене постоянного тока до 600 В.

Существующая тенденция внедрения асинхронных двигателей в различных отраслях промышленности влечет за собой необходимость развития систем, обеспечивающих все этапы их эксплуатации. Например, внедрение асинхронных двигателей на тяге требует существенных вложений в развитие инфраструктуры для осуществления их технического обслуживания, ремонта и послеремонтных (приемо-сдаточных) испытаний. Перечень оборудования, необходимого для испытаний электрических машин, определяется программой испытаний соответствующей категории, например, в соответствии с ГОСТ 2582-2013 для тяговых электродвигателей (ТЭД)¹. Этим и другими государственными стандартами, устанавливающими методы испытаний асин-

¹ ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 56 с.

хронных двигателей, допускается применение схем взаимной нагрузки¹. В схемах такого типа энергия, вырабатываемая нагрузочным генератором, используется для питания испытуемого двигателя [2, 6, 8, 9].

В ряде схем взаимной нагрузки так же, как и в эксплуатации на тяге, асинхронные машины подключаются к выходам управляемых инверторов напряжения (преобразователей частоты), на входы которых подается питание от соединенных между собой звеньев постоянного тока (ЗПТ) [5, 7, 12, 13]. Общий фрагмент подобных схем приведен на рис. 1.

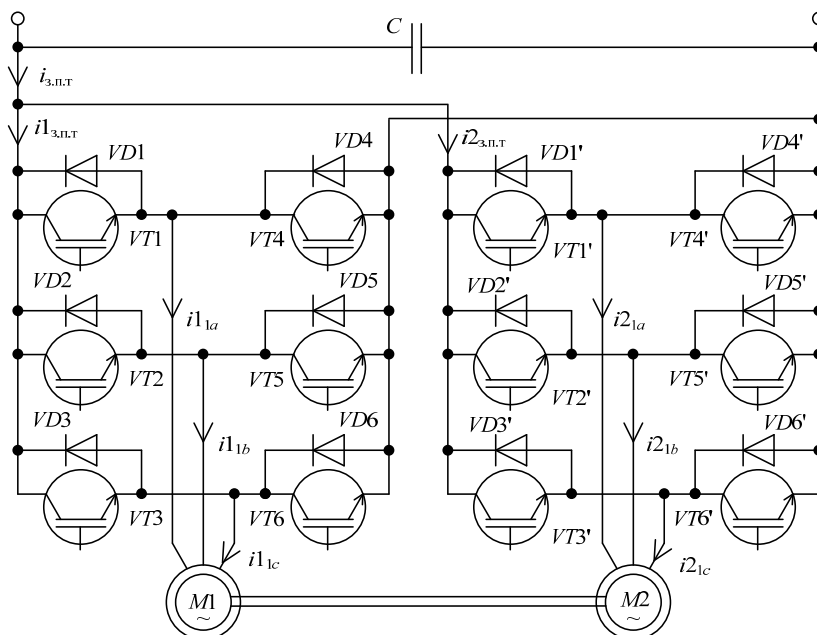


Рис. 1. Общий фрагмент схем взаимной нагрузки с объединенными звеньями постоянного тока

Математическая модель, позволяющая найти токи в фазах асинхронных машин, работающих по схеме взаимной нагрузки, рассмотрена в [9]. Ток в диодах $VD1 - VD3$ можно определить по выражениям с логическими функциями, объединенным в следующую систему:

$$\begin{cases} i_{VD1} = \begin{cases} i_{1a}, & \text{если } (u_{1a} > 0) \cap (i_{1a} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VD2} = \begin{cases} i_{1b}, & \text{если } (u_{1b} > 0) \cap (i_{1b} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VD3} = \begin{cases} i_{1c}, & \text{если } (u_{1c} > 0) \cap (i_{1c} < 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

¹ ГОСТ 11828-86 Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 31 с.

Полупроводниковые элементы в данном случае (см. рис. 1) принимаются идеальными.

Расчет токов в транзисторах $VT1 - VT3$ можно осуществить по следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} i_{l_{VT1}} = \begin{cases} i_{l_{1a}}, & \text{если } (u_{l_{1a}} > 0) \cap (i_{l_{1a}} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{l_{VT2}} = \begin{cases} i_{l_{1b}}, & \text{если } (u_{l_{1b}} > 0) \cap (i_{l_{1b}} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{l_{VT3}} = \begin{cases} i_{l_{1c}}, & \text{если } (u_{l_{1b}} > 0) \cap (i_{l_{1b}} > 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

Исходя из систем уравнений (1) и (2) может быть найден ток на входе первого управляемого инвертора

$$i_{l_{з.п.т}} = i_{l_{VT1}} + i_{l_{VT2}} + i_{l_{VT3}} + i_{l_{VD1}} + i_{l_{VD2}} + i_{l_{VD3}}. \quad (3)$$

Аналогичным образом находится ток на входе второго управляемого инвертора $i_{l_{2.п.т}}$.

Полный ток, протекающий по звену постоянного тока (ЗПТ) схемы (см. рис. 1):

$$i_{з.п.т} = i_{l_{з.п.т}} + i_{2.п.т}. \quad (4)$$

Напряжение на емкости C может быть определено из уравнений:

$$\begin{cases} U_C = U_{л\max} \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \text{Int}(6ft)\right), & \text{если } i_{з.п.т} \geq 0; \\ dU_C = -\frac{i_{з.п.т} dt}{C}, & \text{если } i_{з.п.т} < 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $U_{л\max}$ – линейное напряжение в трехфазной сети (далее в расчете 380 В), Int – функция, выделяющая целую часть числа [11].

Для асинхронных двигателей типа 5 А трех номинальных мощностей (0,37 кВт, 5,5 кВт и 250 кВт) по каталожным данным [3] найдены параметры схемы замещения по методике из [10] и смоделирована работа схемы испытания при различных значениях емкости C в ЗПТ (см. рис. 1). Примеры графиков с расчётными значениями действующего значения напряжения в ЗПТ для двигателей номинальной мощностью 5,5 кВт, работающих в установившемся режиме, приведены на рис. 2, на котором отмечается усиление пульсаций напряжения при уменьшении емкости C .

Примеры графиков с расчётными значениями токов в ЗПТ для двигателя той же номинальной мощности представлены на рис. 3.

Положительные значения тока на рис. 3, *a* соответствуют потреблению мощности электрической машиной, подключенной к данному инвертору напряжения, отрицательные значения – генерации мощности с отдачей ее в ЗПТ.

Анализ полученных результатов моделирования (см. рис. 2, 3) работы схемы взаимной нагрузки асинхронных машин с двумя инверторами показывает, что напряжение и токи в ЗПТ имеют значительную переменную составляющую.

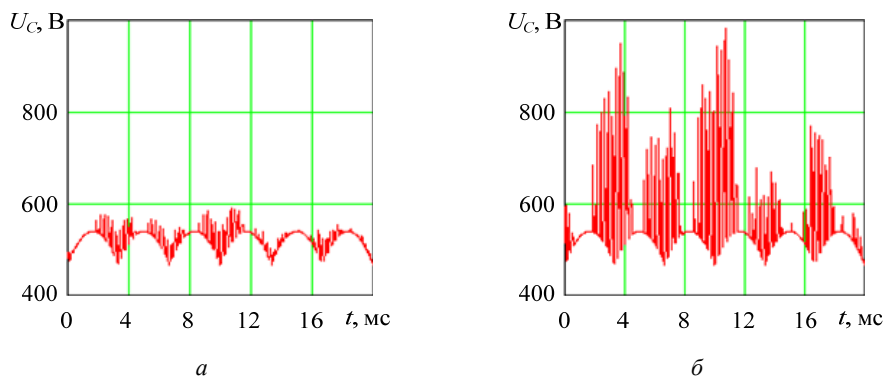


Рис. 2. Расчетные осциллограммы напряжения в ЗПТ при различных значениях емкости конденсатора C

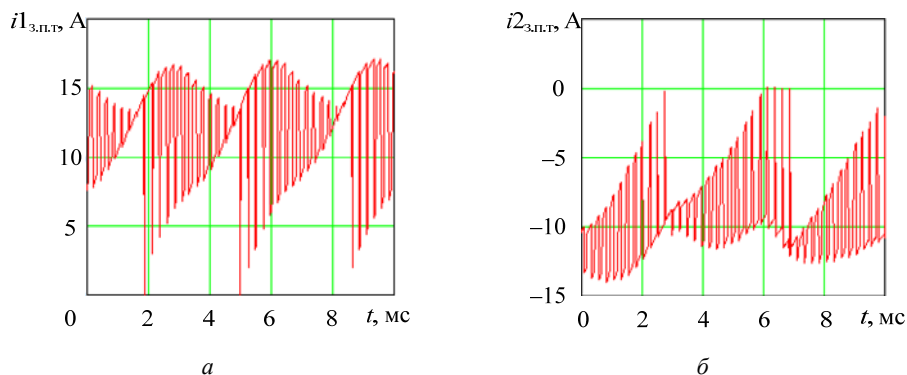


Рис. 3. Расчетные осциллограммы токов, поступающих от ЗПТ на вход управляемых инверторов

Известен метод косвенного контроля мощности испытуемых асинхронных машин в схеме взаимной нагрузки, предполагающий проведение ряда измерений в цепи постоянного тока [1, 4]. Однако данные измерения неизбежно будут иметь некоторую методическую погрешность при использовании неспециализированных на пульсирующих токах и напряжениях измерительных комплексов, величина которой ранее не была оценена. Следовательно, не была обоснована целесообразность применения тех или иных (сложных и дорогих специализированных или простых и дешевых неспециализированных) средств измерения.

Данная методическая погрешность оценена в установившемся режиме работы по мощности в ЗПТ, определяемой действующими значениями напряжения и тока, и средней мощности, определяемой по мгновенным значениям напряжения и тока.

Мощность на входе первого управляемого инвертора, определяемая измерительным прибором, специализированным для измерений в цепях с пульсирующими токами и напряжениями, вычисляется по выражению

$$P1_{3.п.т} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_{3.п.т_i} \cdot i1_{3.п.т_i})^2}{N}}, \quad (6)$$

где N – количество расчетных точек, полученных при моделировании установившегося режима работы испытуемых электрических машин.

Та же мощность, определяемая по произведению действующих значений напряжения и тока, может быть найдена следующим образом:

$$P1'_{3.п.т} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_{3.п.т_i})^2}{N}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (i1_{3.п.т_i})^2}{N}}. \quad (7)$$

Относительная методическая погрешность измерения мощности по действующим значениям напряжения и тока в ЗПТ

$$\varepsilon = \frac{P1_{3.п.т} - P1'_{3.п.т}}{P1_{3.п.т}}. \quad (8)$$

Аналогичным образом можно вычислить мощности и погрешность по второму управляемому инвертору.

По результатам математического моделирования работы испытуемых машин трех различных мощностей выполнен расчет относительной методической погрешности измерения мощности по действующим значениям напряжения и тока в ЗПТ, результаты которого приведены на рис. 4.

Анализ результатов расчета показывает, что при уменьшении емкости C (см. рис. 1) вследствие усиления пульсаций напряжения и тока в ЗПТ возрастает величина относительной погрешности ε . С увеличением емкости C выше некоторых значений величина погрешности не превышает значений: 0,9 % при номинальной мощности испытуемых двигателей 0,37 кВт; 0,3 % при мощности 5,5 кВт; 0,2 % при мощности 250 кВт.

Зависимости, приведенные на рис. 4 для асинхронных машин, работающих в двигательном (ε_d) и генераторном режимах (ε_r), не имеют точного совпадения, однако имеют одинаковую форму кривых с перегибом практически при одинаковых значениях емкости C .

Подбором значений емкости C , необходимых для ограничения максимальных значений пульсации напряжения в ЗПТ ($U_{п\max}$) до величин от 600 до 1000 В, получены зависимости, приведенные на рис. 5.

Анализ полученных таким образом данных (см. рис. 5) показывает, что если емкость C в ЗПТ подобрана таким образом, что величина пульсаций напряжения не превышает значения 600 В, то погрешность измерения мощности по действующим значениям напряжения и тока в ЗПТ не превышает значений: 0,9% при номинальной мощности испытуемых двигателей 0,37 кВт; 0,3% – при мощности 5,5 кВт; 0,2% – при мощности 250 кВт. Таким образом, величина максимальных пульсаций в ЗПТ ($U_{п\max}$) является критерием, по которому можно относительно просто определить применимость рассмотренного метода определения мощности.

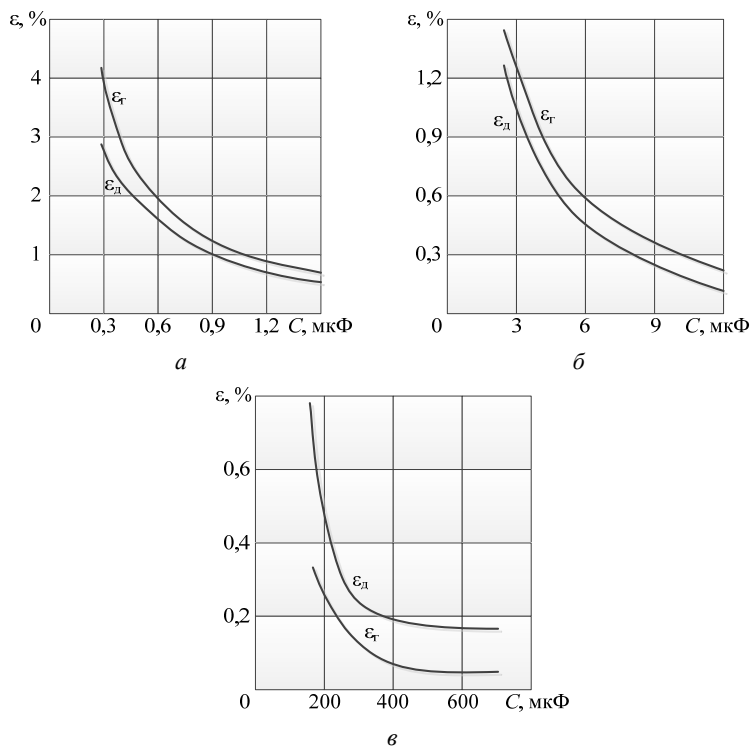


Рис. 4. Зависимости методической погрешности измерения мощности по действующим значениям напряжения и тока в ЗИП для испытуемых двигателей различной мощности:
 a – 0,37 кВт; $б$ – 5,5 кВт; $в$ – 250 кВт

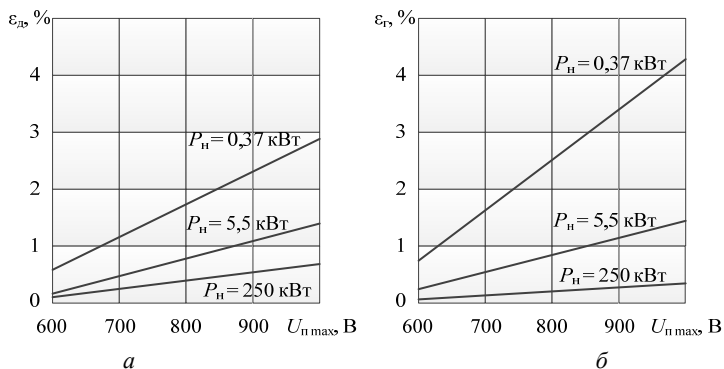


Рис. 5. Зависимости методической погрешности измерения мощности по действующим значениям напряжения и тока в ЗИП от величины максимальных пульсаций напряжения в установившемся режиме

Выводы. В результате выполненного исследования показано, что в звене постоянного тока схем взаимной нагрузки асинхронных двигателей напряжение и ток имеют значительные пульсации. Данные пульсации приводят к на-

лично методической погрешности при определении мощности в ЗПТ по произведению действующих значений напряжения и тока. Анализ расчетных данных позволил оценить величину методической погрешности и ввести критерий применимости данного метода определения мощности. Резкое снижение данной погрешности наблюдается при пульсации напряжения в ЗПТ, не превышающего 600 В для асинхронных двигателей в рассмотренном диапазоне номинальных мощностей от 0,37 кВт до 250 кВт.

Литература

1. *Авилов В.Д., Попов Д.И., Литвинов А.В.* Методика определения потерь в двухзвенных преобразователях частоты в составе стенда для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки // *Известия Транссиба*. 2014. № 1(17). С. 2–8.
2. *Бейерлейн Е.В., Цукублин А.Б., Рапопорт О.Л.* Схема испытания тяговых частотно-регулируемых асинхронных электродвигателей // *Известия вузов. Электромеханика*. 2006. № 3. С. 46–48.
3. *Кацман М.М.* Справочник по электрическим машинам. М.: Академия, 2005. 480 с.
4. Пат. 143346 РФ, МПК G01R31/00. Схема для определения электрической мощности, потребляемой асинхронными двигателями при испытании их методом взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов (РФ). № 2014112918/28; заявл. 02.04.2014; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20. 8 с.
5. Пат. 145998 РФ, МПК G01R31/34. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов (РФ). № 2014112920/07; заявл. 02.04.2014; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27. 2 с.
6. Пат. 2200960 РФ, МПК G01R31/34. Устройство для испытаний бесколлекторных электрических машин переменного тока / А.С. Курбасов, И.Л. Таргонский, Э.А. Долгошеев (РФ). № 2001101213/09; заявл. 12.11.2001; опубл. 20.03.2003, Бюл. № 8. 1 с.
7. Пат. 2433419 РФ, МПК G01R31/34. Способ испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, А.И. Володин, В.Т. Данковцев, В.В. Лукьянченко, Е.В. Панькин (РФ). № 2010124307/28; заявл. 15.06.2010; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31. 6 с.
8. Пат. 99186 РФ, МПК G01R31/34. Стенд для испытаний асинхронного тягового электродвигателя / Л.Г. Козлов, С.С. Осипов, В.П. Феоктистов, В.А. Коновалов (РФ). № 2010122670/28; заявл. 04.06.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31. 2 с.
9. *Попов Д. И.* Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. 175 с.
10. *Фираго Б.И., Павлячек Л.Б.* Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.
11. *Kharlamov V.V., Popov D.I.* Mathematical modeling of physical processes in the complex for testing of induction machines. In: MATEC Web Conf., vol. 239, 27 November 2018, p. 01055.
12. *Smarandescu I.D., Marinescu R.-F., Nicolae M.-S. et al.* Considerations on designing and simulation of an induction motor drive system for an electric locomotive. Proc. of the 2017 Intern. Conf. on Modern Power Systems (MPS), June 6–9, 2017. Cluj-Napoca, 2017. DOI: 10.1109/MPS.2017.7974436.
13. *Struharňanský L., Vittek J., Makyš P. et al.* Vector control techniques for traction drive with induction machines – comparison. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 192, pp. 851–856. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.147.

ХАРЛАМОВ ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ – доктор технических наук, заведующий кафедрой электрических машин и общей электротехники, Омский государственный университет путей сообщения, Россия, Омск (emoe@omgups.ru).

ПОПОВ ДЕНИС ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники, Омский государственный университет путей сообщения, Россия, Омск (popovomsk@yandex.ru).

СЕРГЕЕВ РОМАН ВЛАДИМИРОВИЧ – кандидат технических наук, директор института электрического транспорта и систем энергообеспечения, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники, Омский государственный университет путей сообщения, Россия, Омск (romariovs@yandex.ru).

Viktor V. KHARLAMOV, Denis I. POPOV, Roman V. SERGEEV

STUDY OF PHYSICAL PROCESSES IN THE DIRECT CURRENT LINK OF THE LOADING-BACK SCHEME OF ASYNCHRONOUS MACHINES

Key words: mathematical modeling, test complex, power determination, asynchronous motor, loading-back method, DC link, test scheme.

The article notes the tendency of introducing asynchronous engines, entailing the necessity to introduce the equipment which is intended to carry out maintenance, repair and acceptance check-outs. The general part of test circuits for asynchronous motors by the loading-back method with two controlled inverters is emphasized. The mathematical model of similar schemes' functioning is shown. The article gives the results obtained by mathematic simulation of physical processes in the direct current link in the loading-back scheme for asynchronous machines. Significant ripple voltage of constant voltage and DC in these circuits is noted. The issue of measuring power in the DC link passing through one inverter to the test engine and through another inverter from the load generator is considered. The authors carried out calculation of the capacities mentioned in the steady state modes for asynchronous machines with nominal power of 0.37 kW, 5.5 kW and 250 kW at different values of capacitor capacitance included in the DC link. Basing on the results of calculations, the authors found the dependence between the relative value of the procedural error in determining power in the DC link by the product of the current values of pulsed voltages and current. The current value from the product of instantaneous values of voltage and current at some time interval was taken as the true value of power. It is shown that at the capacitor capacity above some critical value this procedural error does not exceed 0.9% at the nominal power of the test engines 0.37 kW; 0.3% – at the power of 5.5 kW; 0.2% – at the power of 250 kW. This error increases dramatically when capacitor capacitance decreases. It is shown that the value of the capacitance corresponding to the inflection of the considered dependence approximately corresponds to the value necessary for limiting ripple voltage in the DC link of up to 600 V.

References

1. Avilov V.D., Popov D.I., Litvinov A.V. *Metodika opredeleniya poter' v dvukhzvennykh preobrazovatelyakh chastoty v sostave stenda dlya ispytaniya asinkhronnykh dvigatelej metodom vzaimnoj nagruzki* [Methodology for assigning losses in two-element frequency converter in induction motor test rig]. *Izvestiya Transsiba*, 2014, no. 1(17), pp. 2–8.
2. Bejerlejn E.V., Tsukublin A.B., Rapoport O.L. *Skhema ispytaniya tyagovykh chastotno-reguliruemyykh asinkhronnykh elektrodvigatelei* [Scheme of testing of traction frequency-controlled induction motors]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2006, no. 2, pp. 46–48.
3. Katsman M.M. *Spravochnik po ehlektricheskim mashinam* [Directory of electric machines]. Moscow, Akademiya Publ., 2005, 480 p.
4. Avilov V.D., Popov D.I., Litvinov A.V. *Skhema dlya opredeleniya ehlektricheskoi moshchnosti, potrebyaemoi asinkhronnymi dvigatelyami pri ispytanii ikh metodom vzaimnoi nagruzki* [Scheme for determining the electrical power consumed by asynchronous motors when testing them by mutual load method]. Patent RF, no. 143346, 2014.
5. Avilov V.D., Kharlamov V.V., Popov D.I., Litvinov A.V. *Skhema ispytanii asinkhronnykh dvigatelei metodom ikh vzaimnoi nagruzki* [Scheme of testing of induction motors by their mutual load]. Patent RF, no. 145998, 2014.
6. Kurbasov A.S., Targonskij I.L., Dolgosheev Eh.A. *Ustroystvo dlya ispytaniy beskollektornykh ehlektricheskikh mashin peremennogo toka* [Facility testing AC brushless electric machines]. Patent RF, no. 2200960, 2001.
7. Avilov V.D., Volodin A.I., Dankovtsev V.T., Luk'yanchenko, Pan'kin Ye.V. *Sposob ispytaniya asinhronnykh ehlektrodvigatelei metodom ih vzaimnoi nagruzki* [Back-to-back test method for asynchronous motors]. Patent RF, no. 2433419, 2010.
8. Kozlov L.G., Osipov S.S., Feoktistov V.P., Konovalov V.A. *Stend dlya ispytaniy asinkhronnogo tyagovogo ehlektrodvigatelya* [Stand for testing induction traction electromotor]. Patent RF, no. 99186, 2010.

9. Popov D.I. *Nauchnye osnovy sozdaniya energoeffektivnykh metodov i sredstv ispytaniya elektricheskikh mashin* [Scientific bases of creation of energy efficient methods and means of testing of electric machines]. Omsk, 2019, 175 p.

10. Firago B.I., Pavlyachik L.B. *Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka* [Adjustable AC drives]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2006, 363 p.

11. Kharlamov V.V., Popov D.I. Mathematical modeling of physical processes in the complex for testing of induction machines. In: MATEC Web Conf., vol. 239, 27 November 2018, p. 01055.

12. Smarandescu I.D., Marinescu R.-F., Nicolae M.-S. et al. Considerations on designing and simulation of an induction motor drive system for an electric locomotive. Proc. of the 2017 Intern. Conf. on Modern Power Systems (MPS), June 6–9, 2017. Cluj-Napoca, 2017. DOI: 10.1109/MPS.2017.7974436.

13. Struharňanský L., Vittek J., Makyš P. et al. Vector control techniques for traction drive with induction machines – comparison. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 192, pp. 851–856. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.147.

VIKTOR V. KHARLAMOV – Doctor of Technical Sciences, Head of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Russia, Omsk (emoe@omgups.ru).

DENIS I. POPOV – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Russia, Omsk (popovomsk@yandex.ru).

ROMAN V. SERGEEV – Candidate of Technical Sciences, Director of Electric Transport and Power Supply Systems Institute, Assistant Professor of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Russia, Omsk (romariovs@yandex.ru).

Формат цитирования: Харламов В.В., Попов Д.И., Сергеев Р.В. Исследование физических процессов в звене постоянного тока схемы взаимной нагрузки асинхронных машин // Вестник Чувацкого университета. – 2020. – № 3. – С. 141–149. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-141-149.