

рабочим органом // Строительные и дорожные машины. 1996. №10. С. 24-27.

6. Лис В., Колесников Б.В. Рабочий орган для раскатки скважин // Вестник СибАДИ, вып. 2, 2005. - С. 192-197.

7. Гулия Н.В., Клоков В.Г., Юрков С.А. Детали машин. - 2 изд. - СПб., М., Краснодар: Лань, 2010. - 416 с.

8. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. Учебник для вузов - Изд. 4-е. - М.: Высшая школа, 1975. - 654 с.

A METHOD FOR STRENGTH CALCULATION OF A SHAFT OF WELLS' SINKER

V. Lis, Y.E. Ponomarenko

Abstract. The absence of a method for strength calculation of a shaft of wells' sinker, considering its structural features, significantly complicates the constructor's work in determining essential cross-sections of a shaft, providing its reliable, no-failure operation during the whole life cycle. The article provides the scheme of loading a rolling working element in a well, the scheme of a load transferring from rollers to the shaft's core using off-center bushing. The authors of the article have also determined the influence of these bushings on load distribution along the core.

Keywords: roller, off-center bushing, shaft's core, cross force, bending and torsion moment.

References

1. Svirshchevskiy V. K. Prokhodka skvazhin v grunte sposobom raskatki. - Novosibirsk: Nauka, 1982. - 121 p.

2. Lis V., Ponomarenko Y.Y. Germetizatsiya raskatyvayushchikh prokhodchikov skvazhin // Vestnik SibADI, vyp. 6 (40), 2014. - p. 33-39.

3. Burdukovskiy A.I., Goykhman Y.A. Raskatyvayushchiye i spiralevidnyye snaryady // Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny. 1990. №8. p. 5-8.

4. Bobylev L.M., Bobylev A.L. Mashiny dlya prokhodki skvazhin v grunte // Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny. 1993. №3. p. 16-18.

5. Paronyan G.G. Osobennosti proyektirovaniya gruntoprokhodnykh mashin s samozavinchivayushchimsya rabochim organom // Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny. 1996. №10. p. 24-27.

6. Lis V., Kolesnikov B.V. Rabochiy organ dlya raskatki skvazhin // Vestnik SibADI, vyp. 2, 2005. - p. 192-197.

7. Gulia N. V., Klovov V. G., Yurkov S. A. Detali mashin .. - 2 izd. . - SPb, M., Krasnodar: Lan', 2010. - 416 p.

8. Darkov A.V., Shpiro G.S. Soprotivleniye materialov. Uchebnik dlya vtuzdv - Izd. 4-ye. - M.: Vysshaya shkola, 1975. - 654 p.

Лис Виктор (Германия, Mittlbiberach) – кандидат технических наук (88441, Mittlbiberach, Germany, e-mail кандидат технических наук (88441, Mittlbiberach, Germany, e-mail: vidalis@kabelbw. de).

Пономаренко Юрий Евгеньевич (Россия, Омск) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Инженерная геология, основания и фундаменты ФГБОУ ВО «СибАДИ». (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).

Lis Victor (Germany, Mittlbiberach) - candidate of technical sciences (88441, Mittlbiberach, Germany, e-mail: vidalis@kabelbw. de).

Ponomarenko Yuriy Evgenievich (Russian Federation, Omsk) - doctor of technical sciences, professor, Head of the department "Engineering geology, foundations and bases" of The Siberian State Automobile and Highway Academy (SIBADI) (644080, Omsk, Mira ave, 5).

УДК 621.313.33:621.333:621.314.26

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов
ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»

Аннотация. В данной статье предложена методика определения мощности при испытании асинхронных тяговых двигателей и уточнена математическая модель процесса испытаний методом взаимной нагрузки за счет учета потерь мощности в неуправляемых выпрямителях и управляемых инверторах, входящих в состав преобразователей частоты. Для уточнения математической модели предложено воспользоваться методикой определения зависимости потерь в элементах частотных преобразователей, находящихся в составе схемы взаимной нагрузки асинхронных двигателей, от величины потребляемой и генерируемой мощности испытываемой машиной.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, испытания, метод взаимной нагрузки, математическая модель.

Введение

Широкое внедрение асинхронного тягового привода на сети железных дорог требует увеличения мощностей для его ремонта и после-ремонтных (приемо-сдаточных) испытаний. При этом вводящиеся в строй новые мощности должны соответствовать последним достижениям науки и техники в области энергосбережения за счет применения соответствующих технологий.

При проведении приемо-сдаточных испытаний асинхронных тяговых двигателей необходимо проведение целого ряда различных видов испытаний [1, 2, 3, 4]. Наиболее энергозатратным видом является испытание на нагревание, которое должно быть проведено по возможности непосредственно в номинальном режиме [2]. Номинальным режимом для тяговых двигателей электровозов, питающихся от автономного источника (преобразователя частоты), считается продолжительный или часовой режим работы [3] в зависимости от категории испытаний. При этом испытания следует проводить при питании тем родом тока, для которого предназначена электрическая машина. Схемы, применяемые для испытаний, должны иметь характеристики, соответствующие характеристикам подвижного состава, для которого предназначен данный тип электрической машины [3].

Очевидно, что использование для создания нагрузки испытываемому двигателю нагрузочной машины, работающей в режиме динамического торможения или торможения противовключением, абсолютно не оправдано с точки зрения расхода требуемой на испытания электроэнергии. Следовательно, в таких случаях с целью экономии электроэнергии используют схемы, позволяющие возвращать часть мощности нагрузки обратно в сеть. Существует множество схем, позволяющих осуществить метод взаимной нагрузки для асинхронных двигателей, когда на две асинхронные машины подается напряжение с различной частотой, при этом одна машина нагружается как двигатель, а другая – отдает электроэнергию в сеть, работая как генератор [5,6,7]. При этом потребление электроэнергии из сети испытательным стендом в целом равно суммарным потерям, которые определяются коэффициентами полезного действия машин и питающих их частотных преобразователей.

Методика определения потерь

Для исследования схем, использующих взаимную нагрузку, разработана математическая модель, позволившая описать работу двух асинхронных машин, у которых валы механически соединены и вращаются совместно с одной угловой скоростью. Данная математическая модель представляет собой систему из 13 линейных дифференциальных уравнений первой степени [8]. Сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных данных показало достаточно высокую сходимость для интересующего участка механической характеристики – от холостого хода до номинальной нагрузки.

Однако данная система уравнений позволяет с рядом допущений моделировать только процессы, происходящие в электрических машинах. При этом участие в электрической схеме частотных преобразователей учитывается лишь в виде идеальных (т.е. не имеющих потерь) источников электродвижущей силы заданной формы.

Для учета потерь в частотных преобразователях предлагается воспользоваться следующей методикой, рассмотренной на примере одной из схем [5].

На рисунке 1 показана схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки и подключенные к схеме измерительные приборы. На рисунке 1 обозначены следующие элементы: AM1, AM2 – испытываемые асинхронные двигатели; 1, 2 – преобразователи частоты; 1.1, 1.2 – неуправляемые выпрямители первого и второго частотных преобразователей; 1.2, 2.2 – звенья постоянного тока первого и второго частотных преобразователей; 1.3, 2.3 – управляемые инверторы первого и второго частотных преобразователей; 5, 6 – контакторы; 7, 8, 9 – ваттметры; 10 – амперметр постоянного тока; 11 – вольтметр постоянного тока; 4 – общая шина постоянного тока; 3 – механическая связь валов двигателей AM1 и AM2, вращающихся с одинаковой угловой частотой.

Схема содержит три общепромышленных электроизмерительных прибора для измерения мощности переменного тока частотой 50 Гц, подаваемого на входы обоих частотных преобразователей и одного из асинхронных двигателей; из общепромышленных электроизмерительных приборов для измерения мощности постоянного тока, передаваемого по общей шине постоянного тока; двух контакторов, по-

звolyющих отключить выпрямитель одного из преобразователей частоты.

Определение электрической мощности, потребляемой асинхронными двигателями при

испытании их методом взаимной нагрузки для рассматриваемой схемы (см. рисунок 1) проводится в три этапа. На первом этапе собирается схема, приведенная на рисунке 2.

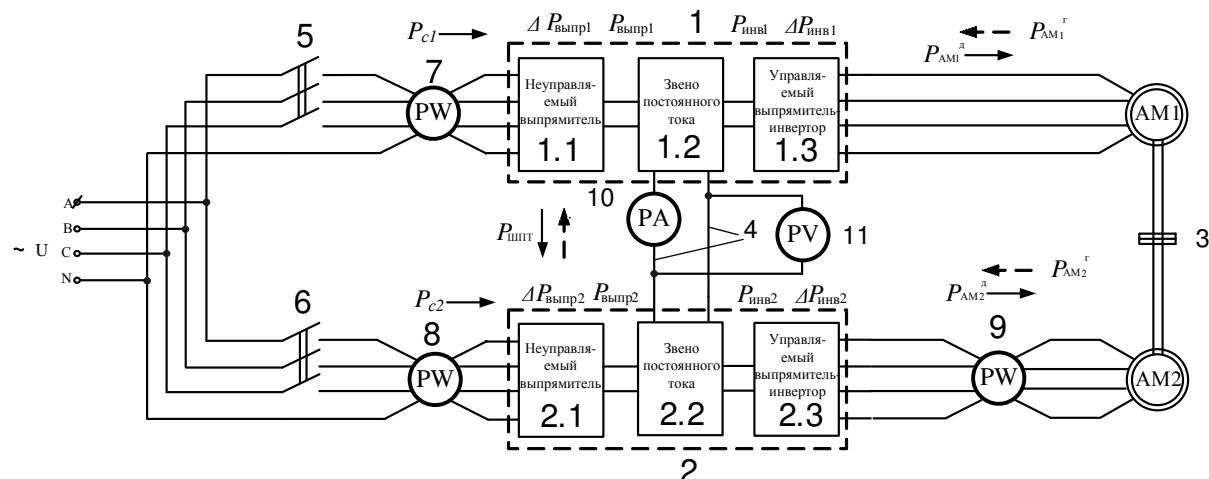


Рис. 1. Схема для испытания асинхронных тяговых двигателей методом их взаимной нагрузки с использованием одного преобразователя частоты и комплектом электроизмерительных приборов (второй измерительный этап).

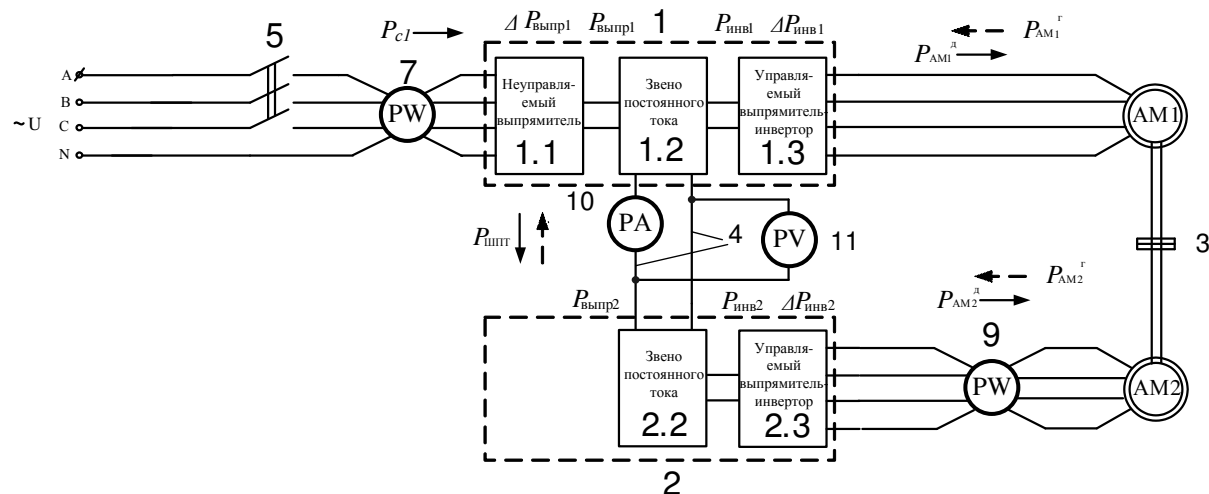


Рис. 2. Схема для испытания асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки с использованием одного преобразователя частоты и комплектом электроизмерительных приборов (первый измерительный этап).

На первом этапе проводят действия в следующей последовательности:

- подается питание из сети на выпрямитель первого преобразователя 1.1: осуществляется запуск обеих машин, AM1, AM2 на холостом ходу при номинальной частоте напряжения, питающего двигателя;

- при неизменной частоте напряжения, питающего AM2, уменьшается частота напряжения, питающего AM1, за счет чего AM1 нагружается в режиме генератора, а AM2 – в режиме двигателя; проводятся измерения мощности, передаваемой через шину постоянного тока 4,

и мощности, подаваемой на двигатель AM2 от управляемого инвертора 2.3, по разности которых определяется зависимость потерь в управляемом инверторе 2.3 от мощности, потребляемой двигателем AM2:

$$\Delta P_{\text{инв}} (P_{\text{AM2д}}) = P_{\text{шт}} (P_{\text{AM2д}}) - P_{\text{AM2д}}; \quad (1)$$

- при неизменной частоте напряжения, питающего AM2, увеличивается частота напряжения, питающего AM1, за счет чего AM2 нагружается в режиме генератора, а AM1 – в режиме двигателя; проводятся измерения мощ-

ности, передаваемой через шину постоянного тока 4, и мощности, вырабатываемой генератором АМ2, по разности которых определяется зависимость потерь в управляемом инверторе 2.3 от мощности, вырабатываемой генератором АМ2, и передаваемой от него в звено постоянного тока:

$$\Delta P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2г}}) = P_{\text{АМ2г}} - P_{\text{шпт}}(P_{\text{АМ2г}}); \quad (2)$$

- определяем зависимость мощности, подводимой к инвертору 2.3 второго частотного преобразователя 2, от мощности, потребляемой двигателем АМ2:

$$P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2д}}) = \Delta P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2д}}) + P_{\text{АМ2д}}; \quad (3)$$

- определяем зависимость мощности, подводимой к инвертору 2.3 второго частотного преобразователя 2, от мощности, вырабатываемой генератором АМ2:

$$P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2г}}) = P_{\text{АМ2г}} - \Delta P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2г}}). \quad (4)$$

Используя зависимости (3) и (4) получаем:

$$\Delta P_{\text{инв.д}} = f(P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2д}})); \quad (5)$$

$$\Delta P_{\text{инв.г}} = f(P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2г}})). \quad (6)$$

На втором этапе определяются потери в неуправляемом выпрямителе.

Измерения на втором этапе проводятся по схеме, приведенной на рисунке 1, отличие которой состоит в том, что электрическая энергия от сети в звенья постоянного тока передается по обоим неуправляемым выпрямителям одновременно. Измерения проводятся при тех же режимах работы асинхронных машин, что и на первом этапе.

В результате измерений получают следующие зависимости:

- мощности на выходе выпрямителя 2.1 второго частотного преобразователя 2 от мощности, потребляемой двигателем АМ2:

$$P_{\text{выпр}}(P_{\text{АМ2д}}) = P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2д}}) - P_{\text{шпт}}(P_{\text{АМ2д}}), \quad (7)$$

где $P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2д}})$ определяется по выражению (3);

- мощности на выходе выпрямителя 4.1 второго частотного преобразователя 4 от мощности, вырабатываемой генератором 2:

$$P_{\text{выпр}}(P_{\text{АМ2г}}) = P_{\text{шпт}}(P_{\text{АМ2г}}) - P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2г}}), \quad (8)$$

где $P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2г}})$ определяется по выражению (4);

- потерь мощности в выпрямителе 2.1 второго частотного преобразователя 2 от мощности, передаваемой им в звено постоянного тока при работе машины АМ2 как в двигательном, так и в генераторном режиме:

$$\Delta P_{\text{выпр}}(P_{\text{выпр}}(P_{\text{АМ2д}})) = P_{\text{с}}(P_{\text{АМ2д}}) - P_{\text{выпр}}(P_{\text{АМ2д}}), \quad (9)$$

$$\Delta P_{\text{выпр}}(P_{\text{выпр}}(P_{\text{АМ2г}})) = P_{\text{с}}(P_{\text{АМ2г}}) - P_{\text{выпр}}(P_{\text{АМ2г}}), \quad (10)$$

где $P_{\text{с}}$ – мощность, потребляемая вторым частотным преобразователем 4 из сети.

Второй этап завершается определением зависимости потерь мощности в неуправляемом выпрямителе 2.1 от подводимой к нему мощности из сети:

$$\Delta P_{\text{выпр.д}} = f(P_{\text{с}}(P_{\text{АМ2д}})), \quad (11)$$

$$\Delta P_{\text{выпр.г}} = f(P_{\text{с}}(P_{\text{АМ2г}})), \quad (12)$$

в соответствии с выражениями (4.9) и (4.10).

Необходимо выполнить действия в соответствии с формулами (1) – (12), как для первого, так и для второго частотного преобразователя.

Составляющие $P_{\text{с}}$, $P_{\text{АМ2д}}$, $P_{\text{АМ2г}}$, $P_{\text{шпт}}$ получены по результатам измерений. Первые два этапа проводятся только один раз. Цель первых двух этапов – получение зависимостей (1) – (12) для их дальнейшего многократного использования.

Третий этап проводится следующим образом. Измеритель мощности 9 на данном этапе не требуется. При некотором установившемся режиме измеряются величины $P_{\text{с1}}$, $P_{\text{с2}}$, $P_{\text{шпт}}$, после чего выражаются и находятся следующие величины:

- $\Delta P_{\text{выпр1}}$, $\Delta P_{\text{выпр2}}$ определяются из (11), (12);
- $P_{\text{выпр1}}$, $P_{\text{выпр2}}$ определяются из (9) и (10);
- $P_{\text{инв1}}$, $P_{\text{инв2}}$ определяются из (7) и (8);
- $\Delta P_{\text{инв1}}$, $\Delta P_{\text{инв2}}$ определяются из (5), (6);
- $P_{\text{АМд}}$ и $P_{\text{АМг}}$ определяются из (3) и (4).

Зная зависимости потерь мощности в выпрямителях и инверторах от мощности подключенных к ним асинхронных машин (3), (4), (7), (8), можно расширить математическую модель, полученную ранее для процесса испытаний [8]. Таким образом, математическая модель принимает следующий вид из семнадцати выражений.

$$\begin{aligned}\frac{di_{1a}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{11}} \cdot \left[u_{1a}(t) - i_{1a} \cdot R_1 + k_{1r} \cdot \left[i'_{2a} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{12} \cdot (i_{1b} - i_{1c}) + L_{12} \cdot (i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{di_{1b}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{11}} \cdot \left[u_{1b}(t) - i_{1b} \cdot R_1 + k_{1r} \cdot \left[i'_{2b} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{12} \cdot (i_{1c} - i_{1a}) + L_{12} \cdot (i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{di_{1c}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{11}} \cdot \left[u_{1c}(t) - i_{1c} \cdot R_1 + k_{1r} \cdot \left[i'_{2c} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{12} \cdot (i_{1a} - i_{1b}) + L_{12} \cdot (i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2a}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{12}} \cdot \left[k_{1s} \cdot (u_{1a}(t) - i_{1a} \cdot R_1) + \left[i'_{2a} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{12} \cdot (i_{1b} - i_{1c}) + L_{12} \cdot (i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2b}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{12}} \cdot \left[k_{1s} \cdot (u_{1b}(t) - i_{1b} \cdot R_1) + \left[i'_{2b} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{12} \cdot (i_{1c} - i_{1a}) + L_{12} \cdot (i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2c}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{12}} \cdot \left[k_{1s} \cdot (u_{1c}(t) - i_{1c} \cdot R_1) + \left[i'_{2c} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{12} \cdot (i_{1a} - i_{1b}) + L_{12} \cdot (i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{-p}{J \cdot \sqrt{3}} \cdot [i_{1a} \cdot (i'_{2b} - i'_{2c}) + i_{1b} \cdot (i'_{2c} - i'_{2a}) + i_{1c} \cdot (i'_{2a} - i'_{2b})] \cdot L_{12} + \dots \\ &\dots + \frac{-p}{J \cdot \sqrt{3}} \cdot [i_{2a} \cdot (i'_{2b} - i'_{2c}) + i_{2b} \cdot (i'_{2c} - i'_{2a}) + i_{2c} \cdot (i'_{2a} - i'_{2b})] \cdot L_{12} - \frac{M_{\text{пот}}}{J} \cdot \text{sign}(\omega); \\ \frac{di_{2a}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{21}} \cdot \left[u_{2a}(t) - i_{2a} \cdot R_1 + k_{2r} \cdot \left[i'_{2a} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{212} \cdot (i_{2b} - i_{2c}) + L_{22} \cdot (i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{di_{2b}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{21}} \cdot \left[u_{2b}(t) - i_{2b} \cdot R_1 + k_{2r} \cdot \left[i'_{2b} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{212} \cdot (i_{2c} - i_{2a}) + L_{22} \cdot (i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{di_{2c}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{21}} \cdot \left[u_{2c}(t) - i_{2c} \cdot R_1 + k_{2r} \cdot \left[i'_{2c} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{212} \cdot (i_{2a} - i_{2b}) + L_{22} \cdot (i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2a}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{22}} \cdot \left[k_{2s} \cdot (u_{2a}(t) - i_{2a} \cdot R_1) + \left[i'_{2a} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{212} \cdot (i_{2b} - i_{2c}) + L_{22} \cdot (i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2b}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{22}} \cdot \left[k_{2s} \cdot (u_{2b}(t) - i_{2b} \cdot R_1) + \left[i'_{2b} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{212} \cdot (i_{2c} - i_{2a}) + L_{22} \cdot (i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2c}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{22}} \cdot \left[k_{2s} \cdot (u_{2c}(t) - i_{2c} \cdot R_1) + \left[i'_{2c} \cdot R'_2 + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{212} \cdot (i_{2a} - i_{2b}) + L_{22} \cdot (i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\ \Delta P_{\text{инв.д}} &= f(P_{\text{AM2д}}); \\ \Delta P_{\text{инв.г}} &= f(P_{\text{AM2г}}); \\ \Delta P_{\text{выпр.д}} &= f(P_{\text{AM2д}}); \\ \Delta P_{\text{выпр.г}} &= f(P_{\text{AM2г}}).\end{aligned}$$

Заключение

Практическая ценность представленной методики для определения мощности заключается в том, что при номинальной частоте напряжения испытываемых двигателей равной 50 Гц требуются измерительные приборы, рассчитанные на эту же частоту напряжения, что значительно упрощает схему и уменьшает стоимость необходимого оборудования.

Полученные в соответствии с данной методикой зависимости позволяют дополнить разработанную ранее математическую модель [8],

и учесть потери в элементах частотных преобразователей.

Уточненная математическая модель позволяет более точно определять мощность, потребляемую стендом при испытаниях асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки. Таким образом, появляется возможность при известных параметрах испытуемых двигателей и частотных преобразователей на этапе проектирования испытательного стенда согласовать его

параметры с параметрами питающей цеховой сети.

Библиографический список

1. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. - 4 изд., сокр. и перераб. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 408 с.: ил.
2. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. - Введ. 1987-07-01. - М.: Изд-во стандартов, 1986. - 42 с.
3. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. - Введ. 2015-01-01. - М.:Стандартинформ, 2014. - 51 с.
4. ГОСТ Р 53472-2009. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. Введ. 2009-12-09. - М.:Стандартинформ, 2011. - 41 с.
5. Пат. 140678 РФ: МПК G01R 31/34: Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов; ОмГУПС. - № 2013147519/28; заявл. 24.10.2013; опубл. 20.05.2014, Бюл. №14.
6. Пат. 80018 РФ: МПК G01R 31/04: Устройство для испытания тяговых электродвигателей / Е.В. Бейерлейн, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин; ТПУ. - № 2008115647/22; заявл. 21.04.2008; опубл. 20.01.2009, Бюл. №2.
7. Пат. 2433419 РФ: МПК G01R 31/34: Способ испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, А.И. Володин, В.Т. Данковцев, В.В. Лукьянченко, Е.В. Панькин; ОмГУПС. - № 2010124307/28; заявл. 15.06.2010; опубл. 10.11.2011, Бюл. №31.
8. Авилов, В.Д. Математическая модель процесса испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А. В. Литвинов // Вестник СибАДИ. - 2013. - № 5 (33). - С. 75-81.

METHOD OF DETERMINING POWER AND MATHEMATICAL MODELING OF PHYSICAL PROCESSES IN TESTING TRACTION INDUCTION MOTORS BY MUTUAL LOADS

V. V. Kharlamov, D. I. Popov, A. V. Litvinov

Abstract. In this article suggested the method of determining power when testing traction induction motors and the mathematical model of tests updated by taking into account the power losses in uncontrolled rectifiers and controlled inverters included in the frequency converters. To refine the mathematical model proposed to use the method of determining the dependency of the losses in the elements of frequency converters, located in the structure of the scheme of mutual loads of induction motors, the magnitude of the consumed and generated power of test and load machine.

Keywords: induction motor, frequency converter, the test method of mutual loading, mathematical model.

References

1. Gervais G.K. *Promyshlennye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electrical machines]. Leningrad, 1984. 408 p.
2. GOST 11828-86. *Mashiny jelektricheskie vrashhajushiesja. Obshhie metody ispytaniy* [Rotating electrical machines. General test methods.].
3. GOST 2582-2013. *Mashiny jelektricheskie vrashhajushiesja tjagovye. Obshhie tehicheskie uslovija* [Rotating traction electrical machines. General technical conditions.].
4. GOST P 53472-2009. *Mashiny jelektricheskie vrashhajushiesja. Dvigateli asinhronnye. Metody ispytaniy* [Rotating electrical machines. Induction motors. Test methods.].
5. Avilov V.D., Popov D.I., Litvinov A.V. *Shema ispytaniy asinhronnykh dvigatelej metodom ih vzaimnoj nagruzki* [The experimental design of induction motors by the method of mutual loading]. Patent RF, no 140678, 2014.
6. Beierlein E.V., Rapoport O.L., Culublin A.B. *Ustrojstvo dlja ispytaniya tjagovykh elektrodvigatelej* [Test rig for induction tractive motors]. Patent RF, no 80018, 2009.
7. Avilov V.D., Volodin A.I., Dankovcev V.T., Lukjanchenko V.V., Pankin E. V. *Sposob ispytaniy asinhronnykh elektrodvigatelej metodom ih vzaimnoj nagruzki* [Method of testing induction motors by the method of mutual loading]. Patent RF, no 2433419, 2011.
8. Avilov V.D., Popov D.I., Litvinov A.V. *Matematicheskaya model processa ispytaniy asinhronnykh dvigatelej metodom ih vzaimnoj nagruzki* [Mathematical modeling of back-to-back method in testing induction motor]. *Vestnik Sibadi*, 2013, no. 5 (33), pp. 75-81.

Харламов Виктор Васильевич (Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (644046, г. Омск, Пр. Маркса, 35, e-mail: emoe@omgups.ru)..

Попов Денис Игоревич (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (644046, г. Омск, Пр. Маркса, 35, e-mail: popovomsk@yandex.ru).

Литвинов Артём Валерьевич (Омск, Россия) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Локомотивы» Омского государственного университета путей сообщения (644046, г. Омск, Пр. Маркса, 35, e-mail: artyom_hawk@mail.ru).

Viktor V. Kharlamov (Omsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of the departa-

ment, Department of Electrical machines and general electrical engineering, Omsk State Transport University (644046, Russia, Omsk, Marksa pr., 35, e-mail: emoe@omgups.ru).

Denis I. Popov (Omsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Electrical machines and general electrical engineering, Omsk State Transport University (644046, Rus-

sia, Omsk, Marksa pr., 35, e-mail: popovomsk@yandex.ru)..

Artyom V. Litvinov (Omsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior lecturer, Department of Locomotives, Omsk State Transport University (644046, Russia, Omsk, Marksa pr., 35, e-mail: artyom_hawk@mail.ru).