

Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Пикалов В.В.

Липецкий государственный технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ПЛАВНОГО ПУСКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

В работе рассмотрен способ пуска асинхронного электродвигателя с фазным ротором. Предложенная система состоит из асинхронного электродвигателя, в цепь ротора которого включен двухзвенный преобразователь частоты на базе автономного инвертора напряжения. К выходу инвертора подключается частотно-зависимое параметрическое устройство (индукционное сопротивление). Индукционное сопротивление представляет собой устройство, состоящее из индуктора и магнитопровода. В основе его принципа действия лежит явление поглощения электромагнитной энергии магнитопроводом реостата и преобразование ее в тепловую энергию. Чем больше частота тока, протекающего по обмоткам сопротивления, тем выше поглощаемая магнитопроводом мощность и электрические параметры индукционного сопротивления. Влияя на электрические параметры магнитопровода индукционного сопротивления, можно влиять на характеристики электродвигателя. В ходе работы было произведено сравнение индукционного сопротивления с последовательно соединенными между собой реостатом и реактором. Также для связи реостат и реактор было подобрано оптимальное соотношение между активной и индуктивной частями. По результатам компьютерного имитационного моделирования сделаны выводы о возможности замены индукционного сопротивления на реостат с последовательно соединенным реактором. Наиболее оптимальным будет применение индукционного сопротивления. При включении реостата с реактором потери в активной части будут практически идентичны. Однако при минимальном активном сопротивлении потребуются учитывать значения выходного тока инвертора и подбирать ключи, позволяющие кратковременную работу с перегрузками или брать ключи большей мощности. При большой активной составляющей происходит уменьшение рабочей скорости из-за того, что изменение частоты не влияет на ее значение в отличие от индукционного сопротивления.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, фазный ротор, преобразователь частоты, индукционное сопротивление, реактор, имитационное моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

На конвейерах и других подъемно-транспортных механизмах металлургического производства применяются системы электропривода с асинхронными двигателями с фазным ротором (АДФР) с параметрическим управлением [1-4]. Одним из вариантов схемы пуска является достаточно простая схема с частотно-зависимым индукционным сопротивлением (ИС), включенным в цепь ротора [5-8].

Индукционное сопротивление (ИС) представляет собой трехфазное устройство, состоящее из массивного магнитопровода и фазных обмоток. Известны разные конструкции магнитопровода индукционных сопротивлений, работающих в пусковом режиме при частоте тока ротора от 50 до 4-5 Гц, при этом наиболее распространенной является конструкция, содержащая три полых трубчатых стержня, соединенных ярмом. Вследствие поверхностного эффекта, определяющего электромагнитные процессы в массивных ферромагнитных телах, толщина стенки трубчатого магнитопровода составляет около 5 мм [9]. Обмотка располагается на трубчатых стержнях и обычно является однослойной. В основе принципа действия индукционного сопротивления лежит явление поглощения электромагнитной энергии массивным магнитопроводом и преобразование ее в тепловую энергию. Чем больше частота тока, протекающего по обмоткам ИС, тем выше поглощаемая магнитопроводом мощность, определяющая электрические параметры индукционного сопротивления. Характер изменения частоты и величины тока в обмотках ИС определяет величину

комплексного активно-индуктивного сопротивления данного устройства и влияет на характеристики электродвигателя [10].

В [11, 12] предложен способ пуска АДФР, основанный на введении в цепь ротора двигателя преобразователя частоты с регулируемой выходной частотой, к выходу которого подключен ИС. Рассмотрим систему пуска асинхронного электродвигателя с фазным ротором, показанную на **рис. 1**. Она состоит из электродвигателя, двухзвенного преобразователя частоты на базе автономного инвертора напряжения, блока косвенного вычисления скорости, блока управления инвертором и частотно-зависимого индукционного сопротивления.

Особенности работы схемы и ее основные характеристики приведены в работах [13-16]. Замкнутая система управления выходной частотой инвертора, максимальное значение которой составляет около 700 Гц, позволяет регулировать выпрямленный ток ротора и формировать требуемые пусковые характеристики АДФР со стабилизацией пускового момента. Повышенная частота тока в обмотках ИС определяет использование в конструкции магнитопровода тонкостенных (1-2 мм) трубчатых стержней. Расчет конструктивных параметров нелинейного ИС выполняется с учетом параметров АДФР и требует учета изменения напряженности электромагнитного поля на поверхности магнитопровода ИС.

В данной работе исследуется возможность замены нелинейного индукционного сопротивления на последовательно соединенные линейные элементы – реостат и реактор и нахождение оптимального соотношения активной и индуктивной части в зависимости от заданной базовой выходной частоты инвертора, равной 700 Гц.

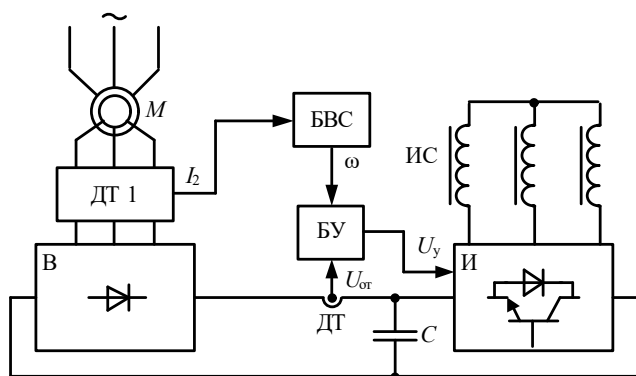


Рис. 1. Система пуска АД с ФР

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Исследование проводится с помощью компьютерной имитационной модели в программном пакете MatLab Simulink. Для замеров взята точка во время разгона электродвигателя в момент времени 0,5 с.

Рассмотрим осциллограммы тока в обмотке статора, обмотке ротора электродвигателя и в звене постоянного тока на выходе выпрямителя, представленные на рис. 2. В рассматриваемой модели использовался приведенный асинхронный электродвигатель, в нем цепь обмотки ротора приведена к параметрам цепи обмотки статора. Из полученных осциллограмм токов видно, что ток в статоре электродвигателя больше, чем ток в обмотке ротора, это связано с потерями в магнитной системе электродвигателя. Величина тока на выходе выпрямителя равна величине тока в цепи рото-

ра электродвигателя.

В процессе работы системы электропривода идет обмен энергией между емкостью в звене постоянного тока и индукционным сопротивлением через обратные диоды IGBT-ключей. Рассмотрим осциллограммы токов на выходе выпрямителя, на входе инвертора и в цепи конденсатора, они приведены на рис. 3. Из них видно, что конденсатор значительно поднимает величину входного тока инвертора и, как следствие, его мощность.

Это привело к выбору индукционного сопротивления в качестве частотно-параметрического регулятора, обладающего возможностью ограничивать ток за счет изменения своего активного сопротивления в зависимости от частоты протекающего тока.

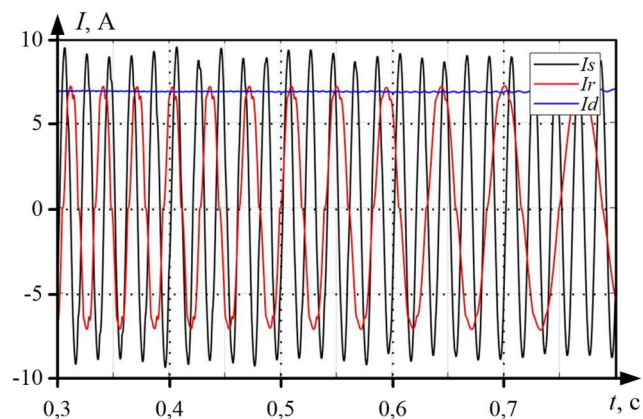


Рис. 2. Осциллограммы токов в обмотках

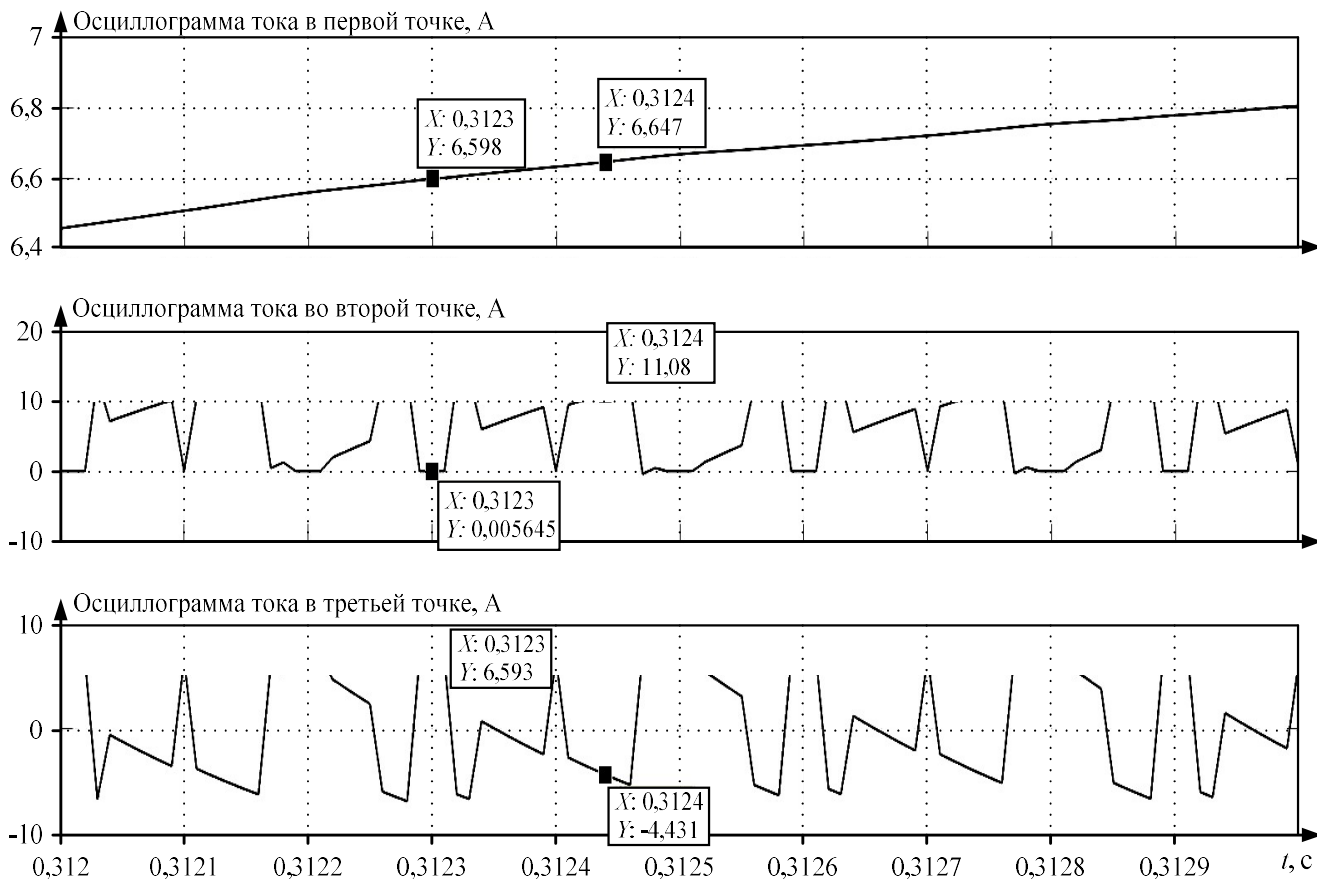


Рис. 3. Осциллограммы токов, протекающих в звене постоянного тока

# РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим графики изменения момента и скорости двигателя во времени, показанные на **рис. 4 и 5**, заменив индукционное сопротивление на реактор и последовательно соединенный реостат. И сравним полученные осциллограммы по скорости и моменту с осциллограммами, полученными при включении индукционного сопротивления.

Задав сопротивление реостата, равное 2 Ом, и индуктивность реактора, равную 0,0013 Гн, полученные осциллограммы по скорости и моменту будут совпадать с осциллограммами при подключенном индукционном сопротивлении. Однако это приводит к увеличению величины тока на выходе инвертора на 10 А и, как следствие, приводит к увеличению тепловых потерь. Изменим параметры в следующую сторону, активное сопротивление уменьшим в 2 раза до 1 Ом, а индуктивное увеличим до 0,0026 Гн. Видим, что осциллограммы по скорости и моменту особо не изменились, однако величина тока на выходе инвертора возрастет почти в два раза. При увеличении сопротивления реостата в два раза до 4 Ом и уменьшении индуктивности до 0,00065 Гн произойдет уменьшение выходного тока инвертора.

Максимальное действующее значение выходного тока инвертора при включенном индукционном сопротивлении равно 15,6 А, при сопротивлении реостата 2 Ом равно 24,3 А, при сопротивлении реостата 1 Ом равно 40,2 А, при сопротивлении реостата 4 Ом равно 15,8 А.

Рассчитаем потери на активной части индукционного сопротивления и реостата по формуле  $P=I^2R$ . Полученные результаты отображены на **рис. 6**.

Можно сказать, что наиболее оптимальным является применение индукционного сопротивления. При включении реостата с реактором потери в активной части будут практически идентичны. Однако при минимальном активном сопротивлении потребуется учитывать значения выходного тока инвертора и подбирать ключи, позволяющие кратковременную работу с перегрузками или брать ключи большей мощности, что приведет к увеличению стоимости преобразователя частоты. При большой активной составляющей происходит уменьшение рабочей скорости из-за того, что изменение частоты не влияет на ее значение в отличие от индукционного сопротивления.

Определим угол между векторами тока и напряжения ротора в момент времени 0,5 с в зависимости от изменений значений реостата и реактора. Результаты измерений приведены в **таблице**.

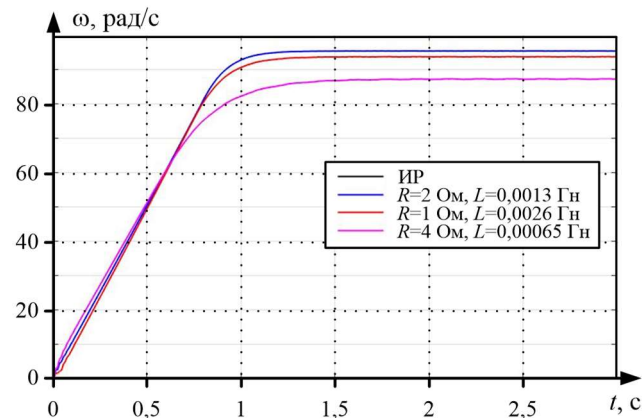


Рис. 4. Осциллограммы скорости

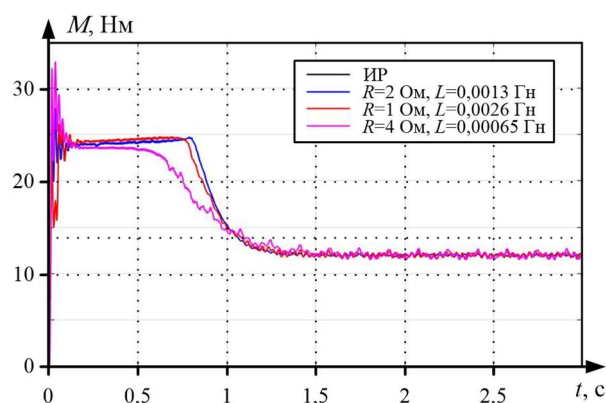


Рис. 5. Осциллограммы момента

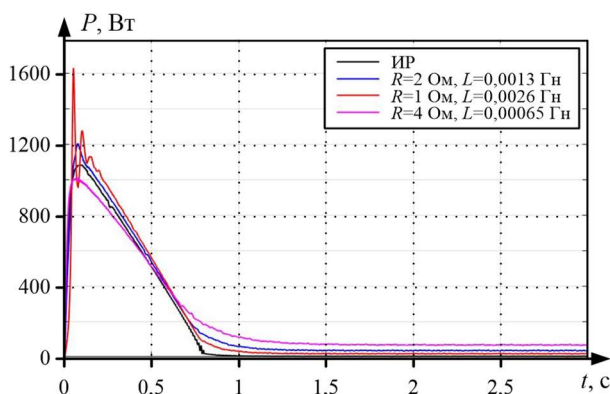


Рис. 6. Осциллограммы потерь

## Амплитуда и угол поворота векторов тока напряжения

Опыт	Величина	Амплитуда
R=4 Ом, L=0,00065 Гн	Напряжение	76
	Ток	6,8
R=2 Ом, L=0,0013 Гн	Напряжение	73
	Ток	7,2
R=1 Ом, L=0,0026 Гн	Напряжение	74
	Ток	7,6

Наиболее оптимальное соотношение активной и индуктивной частей приводит к углу между векторами тока и напряжения в диапазоне 8-12 градусов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены два варианта реализации пуска АДФР с помощью преобразователя частоты, включенного в цепь ротора и частотно-зависимого параметрического устройства. В обоих случаях возможно ограничение тока, протекающего через ключи инвертора в момент пуска, как следствие, управление пусковым моментом электродвигателя. Обеспечивается плавный разгон с заданным пусковым моментом. Однако для систем электропривода, требующих регулирования скорости, больше подойдет индукционное сопротивление в качестве частотно-параметрического устройства. А для систем электропривода с отсутствием регулирования скорости возможно применение связки последовательно соединенных реостата и реактора с выводом их из роторной цепи после разгона электродвигателя.

*Статья написана при поддержке гранта ЛГТУ №9 «Создание электродугового плазмотрона с системами автоматизации».*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мещеряков В.Н., Финеев А.А. Система асинхронного электропривода с частотно-параметрическим управлением для крановых механизмов // Промышленная энергетика. 2004. № 6. С. 32–33.
2. Lesan S., Smiai M.S., Shepherd W. Control of wound rotor induction motor using thyristors in the secondary circuits // IEEE Transactions on Industry Applications. 1996. Vol. 32. No. 2. Pp. 335–344. doi: 10.1109/28.491482
3. Modeling and analyse of induction motor drive system with consideration of dc bus stabilization and control performance / J. You, M. Liu, J. Ma, H. Jia // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC-ECCE Asia 2016. IEEE, 2016. Pp. 1362–1367. doi: <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2016.7512488>
4. Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor / V. Meshcheryakov, T. Sinyukova, A. Sinyukov, A. Boikov, R. Mukhametzhaynov // High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference. E3S Web of Conferences, 2020. Pp. 1–5. doi: 10.1051/e3sconf/202017801001
5. Муравьев А.А., Бойков А.И. Системы управления асинхронной машиной с фазным ротором с вентильными преобразователями в цепи ротора // Современные сложные системы управления: материалы XII Международной научно-практической конференции. Липецк: ЛГТУ, 2017. С. 159–163.
6. Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Муравьев А.А. Система пуска асинхронного электродвигателя с фазным ротором // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2017. С. 204–208.
7. Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Пикалов В.В. Способ плавного пуска асинхронного электродвигателя с фазным ротором // XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации»: сб. тр. М.: МИФИ, 2019. С. 98–99.
8. Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive / V. Meshcheryakov, D. Kukishev, A. Boikov, A. Evseev // X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). IEEE, 2018. Pp. 1–5. doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571784
9. Мещеряков В.Н., Морозов С.В., Теличко Л.Я. Расчет параметров индукционных сопротивлений для асинхронных двигателей с фазным ротором // Изв. вузов СССР. Электромеханика. 1989. № 3. С. 50–52.
10. Мещеряков В.Н. Расчет статических характеристик асинхронного электродвигателя с нелинейным индукционным сопротивлением в цепи ротора // Техническая электродинамика. 1991. № 2. С. 81–83.
11. Пат. 2661343 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/63. Способ управления асинхронным двигателем с фазным ротором / Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Ласточкин Д.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет». № 2017103049; заявл. 30.01.2017; опубл. 16.07.2018.
12. Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Ласточкин Д.В. Способ управления асинхронным двигателем с фазным ротором // Изобретатели и рационализаторы Липецкой области: сборник научных разработок и изобретений. Липецк: ЛГПУ, 2018. С. 29–34.
13. Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Ласточкин Д.В. Система плавного пуска асинхронного двигателя с фазным ротором // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №1(42). С. 24–29. doi: 10.18503/2311-8318-2019-1(42)-24-29
14. Электропривод на базе асинхронной машины с индукционным сопротивлением в цепи ротора, подключенным через вентильные элементы / В.Н. Мещеряков, А.И. Бойков, В. В. Пикалов, А. А. Муравьев, Д. В. Ласточкин // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. №2. С. 60–66.
15. The Soft Starting System for an Induction Motor with an Induction Resistance in the Wound Rotor Circuit / V.N. Meshcheryakov, A.I. Boikov, A.A. Muravyev, V.V. Pikalov // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2019. Pp. 1–5. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934280
16. Frequency-parametric control electric drive system based on induction motor with wound rotor / V.N. Meshcheryakov, A.I. Boikov, A.A. Muravyev, V.V. Pikalov // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2019. Pp. 1–5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867644

Поступила в редакцию 21 мая 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SOFT-START SYSTEMS OF AN INDUCTION ELECTRIC MOTOR WITH A PHASE ROTOR

Victor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electric Drive, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: [mesherek@stu.lipetsk.ru](mailto:mesherek@stu.lipetsk.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>

Andrei I. Boikov

Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer, Department of Electric Drive, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: [aboikov2013@gmail.com](mailto:aboikov2013@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0032-0683>

Vladimir V. Pikalov

Teaching Assistant, Department of Electric Drive, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: [wreditels@mail.ru](mailto:wreditels@mail.ru)

The paper considers a method for starting an induction electric motor with a phase rotor. The proposed system consists of an induction electric motor in the rotor circuit where a two-link frequency converter based on an autonomous voltage inverter is included. A frequency-dependent parametric device (induction resistance) is connected to the output of the inverter. The induction resistance is a device consisting of an inductor and a

magnetic circuit. Its principle of operation is based on the phenomenon of electromagnetic energy absorption by the magnetic core of the rheostat and its conversion into thermal energy. The higher is the frequency of the current flowing through the resistance windings, the higher is the power absorbed by the magnetic circuit and the electrical parameters of the induction resistance. By influencing the electrical parameters of

the induction resistance magnetic circuit, it is possible to influence the characteristics of the electric motor. In the course of the work, the induction resistance was compared with a rheostat and a reactor connected in series with each other. Also, the optimal ratio between the active and inductive parts was selected for the node of the rheostat and the reactor. Based on the results of computer simulation, conclusions are made about the possibility of replacing the induction resistance with a rheostat with a series-connected reactor. The most optimal will be the use of induction resistance. When the rheostat is switched on with the reactor, the losses in the active part will be almost identical. However, with a minimum active resistance, it will be necessary to take into account the values of the output current of the inverter and select keys that allow short-term operation with overloads or take keys of higher power. With a large active component, the operating speed decreases due to the fact that changing the frequency does not affect its value, unlike the induction resistance

**Keywords:** induction electric motor, phase rotor, frequency converter, induction resistance, reactor, simulation modeling.

#### REFERENCES

1. Meshcheryakov V.N., Fineev A.A. Induction electric drive system with frequency-parametric control for crane mechanisms. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2004, no. 6, pp. 32-33. (In Russian)
2. Lisan S., Smiai M. S., Shepherd W. Control of wound rotor induction motor using thyristors in the secondary circuits. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, no. 2, pp. 335-344. doi: 10.1109/28.491482
3. You J., Liu M., Ma J., Jia H. 2016. Modeling and analyse of induction motor drive system with consideration of dc bus stabilization and control performance. In 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). IEEE Press, 2016, pp. 1362–1367. doi: <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2016.7512488>
4. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Boikov A., Mukhametzhano R. Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference. E3S Web of Conferences, 2020, pp. 1-5. doi: 10.1051/e3sconf/202017801001
5. Muravyev A.A., Boykov A.I. Control systems of an induction machine with a phase rotor with valve converters in the rotor circuit. *Sovremennye slozhnye sistemy upravleniya: materialy XII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [XII International Scientific and Practical Conference "Modern Complex Control Systems"]. Lipetsk, LSTU Publ., 2017, pp. 159-163. (In Russian)
6. Meshcheryakov V.N., Boykov A.I., Muravyev A.A. Starting system of an induction electric motor with a phase rotor. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy: mezhdunar. sb. nauch. trudov* [International scientific collection works "Energy and electrotechnical systems"]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2017, pp. 204-208. (In Russian)
7. Meshcheryakov V.N., Boykov A.I., Pikalov V.V. A method for soft-starting an induction electric motor with a phase rotor. *XXVIII Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii"* [XXVIII International Scientific and Technical Conference "Modern technologies in problems of control, automation and information processing" collection of papers]. Moscow, MEPhI Publ., 2019, pp. 98-99. (In Russian)
8. Meshcheryakov V., Kukishev D., Boikov A., Evseev A. Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive. 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). IEEE, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571784
9. Meshcheryakov V.N., Morozov S.V., Telichko L.Ya. Calculation of parameters of induction resistances for induction motors with a phase rotor. *Izv. vuzov SSSR, Elektromekhanika* [Proceedings of Universities of the USSR, Electromechanics], 1989, no. 3, pp. 50-52. (In Russian)
10. Meshcheryakov V.N. Calculation of static characteristics of an induction electric motor with nonlinear induction resistance in the rotor circuit. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], 1991, no. 2, pp. 81-83. (In Russian)
11. Meshcheryakov V.N., Boykov A.I., Lastochkin D.V. *Sposob upravleniya asinhronnym dvigatelem s faznym rotorom* [Method of control of induction motor with phase rotor]. Patent RF, no. 2661343, 2018.
12. Meshcheryakov V.N., Boykov A.I., Lastochkin D.V. Method of control of induction motor with phase rotor. *«Izobreteniya i ratsionalizatory Lipetskoy oblasti» sbornik nauchnykh razrabotok i izobreteniy* ["Inventors and innovators of the Lipetsk region" collection of scientific developments and inventions]. Lipetsk, LSPU Publ., 2018, pp. 29-34. (In Russian)
13. Meshcheryakov V.N., Boykov A.I., Lastochkin D.V. System soft start of the induction motor with phase rotor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 24-29. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2019-1(42)-24-29
14. Meshcheryakov V.N., Boykov A.I., Pikalov V.V., Muravyev A.A., Lastochkin D.V. Electric drive on the basis of the induction machine with an induction resistance in the rotor circuit connected through valve elements. *Izvestiya SPBGUTU LETI* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University], 2019, no. 2, pp. 60-66. (In Russian)
15. Meshcheryakov V.N., Boikov A.I., Muravyev A.A., Pikalov V.V. The Soft Starting System for an Induction Motor with an Induction Resistance in the Wound Rotor Circuit. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934280
16. Meshcheryakov V.N., Boikov A.I., Muravyev A.A., Pikalo V.V. Frequency-parametric control electric drive system based on induction motor with wound rotor. International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867644

Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Пикалов В.В. Исследование систем плавного пуска асинхронного электродвигателя с фазным ротором // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 3(52). С. 47-51. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-47-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-47-51)

Meshcheryakov V.N., Boikov A.I., Pikalov V.V. Soft-Start Systems of an Induction Electric Motor with a Phase Rotor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 3(52), pp. 47-51. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-47-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-47-51)