

Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Ласточкин Д.В.

Липецкий государственный технический университет

СИСТЕМА ПЛАВНОГО ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

В электроприводе, выполненном на базе асинхронного двигателя с фазным ротором, предложено регулировать ток ротора с помощью выпрямительно-инверторного блока, при этом вход выпрямителя подключен к выводам обмотки ротора двигателя, а выход инвертора, выполненного на базе IGBT-транзисторов с обратными диодами, – к частотно-зависимому индуктивно-активному сопротивлению, в звено постоянного тока включен емкостный фильтр. В системе электропривода реализован плавный пуск асинхронного двигателя с фазным ротором с возможностью регулирования и поддержания постоянства пускового момента с обеспечением требуемого ускорения. Такую систему электропривода предложено использовать на конвейерах металлургических производств, зачастую не требующих регулирования скорости, но обеспечивающих пусковые режимы с заданным темпом разгона, в том числе и при полной загрузке конвейера. Система электропривода сочетает некоторые свойства асинхронного вентильного каскада и систем параметрического управления. Описана работа системы управления инвертором, реализующая стабилизацию тока ротора асинхронного электродвигателя за счет изменения частоты на выходе инвертора напряжения в функции выпрямленного тока ротора двигателя. Частотно-зависимое индуктивно-активное сопротивление, названное индукционным сопротивлением, содержит массивный магнитопровод с тремя трубчатыми стержнями, соединенными ярмом, на каждом из стержней размещена однослойная фазная обмотка. Толщина стенок трубчатых стержней не превышает глубины проникновения электромагнитного поля в массивный ферромагнитный материал. Приведены результаты экспериментальных исследований частотных характеристик индукционного сопротивления. Разработана математическая модель системы электропривода, проведено компьютерное моделирование динамических процессов с использованием пакета прикладных программ MATLAB Simulink. Доказана возможность реализации предложенного способа управления процессом пуска асинхронного двигателя со стабилизацией пускового момента.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, пусковой момент, выпрямитель, инвертор, фильтр, индукционное сопротивление.

ВВЕДЕНИЕ

На конвейерах металлургических производств, в том числе и на механизмах, не требующих регулирования скорости, достаточно широко применяются системы электропривода на базе асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР). Это объясняется тяжелыми условиями пуска, поскольку электропривод должен обеспечить пуск нагруженного конвейера. Известные системы параметрического резисторного и импульсно-резисторного пуска АДФР обеспечивают ограничение пускового тока за счет рассеивания энергии скольжения на резисторных элементах, что определяет низкую энергоэффективность данных пусковых устройств [1–3].

Наиболее экономичный способ ограничения тока ротора в АДФР, основанный на введении противоЭДС в цепь ротора, реализуется в системе асинхронного вентильного каскада (АВК), имеющего выпрямительно-инверторный блок, передающий энергию скольжения через согласующий трансформатор в трехфазную питающую сеть. Однако этот хорошо изученный способ управления АДФР обеспечивает приемлемые технико-экономические показатели электропривода только при небольшом (20–25%) диапазоне изменении скорости и не в состоянии обеспечить необходимые пусковые характеристики [4, 5]. Системы АВК с последовательным возбуждением не обеспечивают требуемую для механизмов конвейерного типа повышенную перегрузочную способность [6–8].

В разработанной системе электропривода предложено ограничивать ток ротора, используя выпрями-

тельно-инверторный блок, содержащий конденсаторный фильтр в звене постоянного тока, полностью управляемый инвертор на базе IGBT-транзисторов с обратными диодами, к выходу которого подключено частотно-зависимое индукционное сопротивление [9].

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Силовая часть электропривода (рис. 1) содержит асинхронный двигатель с фазным ротором (М), обмотка статора которого подключена к питающей сети, выводы обмоток ротора подключены к входу трехфазного нерегулируемого мостового выпрямителя (В). Выход нерегулируемого выпрямителя, к которому также подключен конденсатор (С), соединен с входом регулируемого трехфазного инвертора (И). В звено постоянного тока включен датчик тока (ДТ). К выходу инвертора подключен индукционный резистор (ИР). Выход датчика тока соединен с входом блока управления (БУ) частотой выходного тока инвертора.

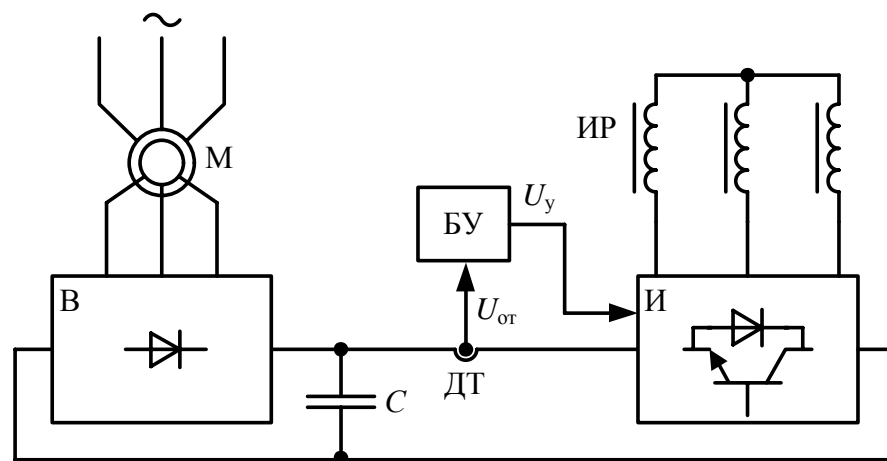


Рис. 1. Силовая часть электропривода

Представленный на **рис. 2** блок управления частотой выходного тока инвертора выполнен следующим образом: он содержит формирователь сигналов (Ф), имеющий количество выходных каналов, соответствующее количеству ключевых элементов инвертора, выход формирователя сигналов соединен с управляющим входом инвертора, вход формирователя сигналов соединен с выходом регулятора частоты (РЧ) переменного тока на выходе инвертора, вход которого соединен с выходом первого узла сравнения 1, положительный вход которого соединен с блоком задания максимальной частоты (БЗМЧ), а отрицательный вход первого узла сравнения 1 соединен с выходом блока ограничения (БО), вход которого соединен с выходом интегрального блока регулятора тока (И), вход которого соединен с выходом второго узла сравнения 2, положительный вход которого соединен с блоком задания выпрямленного тока (БЗТ), а отрицательный вход второго узла сравнения 2 соединен с выходом датчика тока.

Работа рассмотренной системы управления АДФР была исследована с помощью компьютерного математического моделирования в программном пакете MatLab Simulink [10]. Электропривод работает следующим образом.

При подаче напряжения на обмотку статора в обмотке ротора наводится ЭДС, выпрямленное напряжение ротора поступает на вход инвертора (**рис. 3**) и определяется выражением [11]:

$$E_{dp} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_{2k} s - \frac{3}{\pi} z_r I_d, \quad (1)$$

где E_{2k} – ЭДС роторной цепи АДФР; s – скольжение; z_r – полное сопротивление роторной цепи; I_d – ток, протекающий в звене постоянного тока.

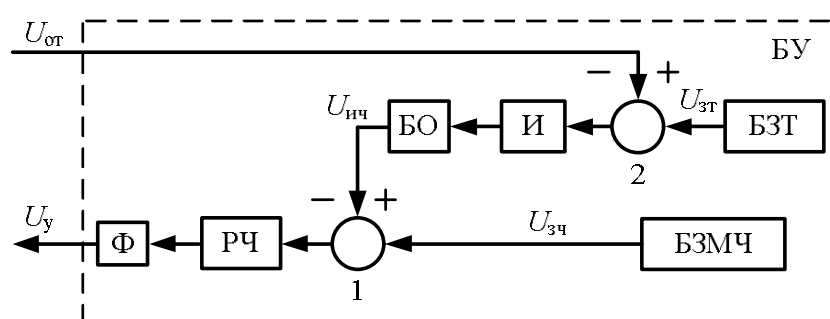


Рис. 2. Блок управления инвертором

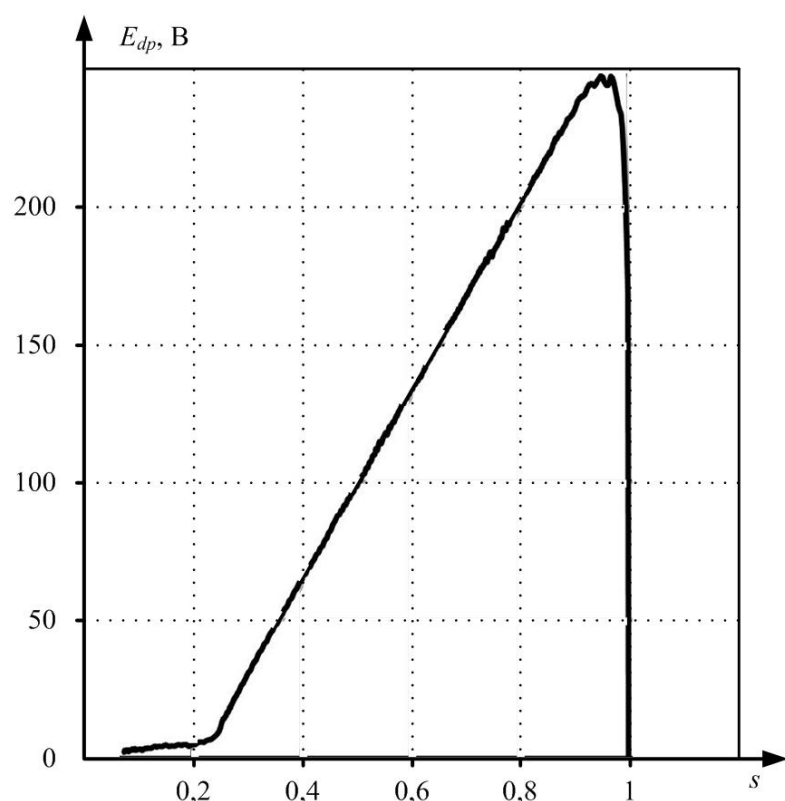


Рис. 3. Зависимость выпрямленного напряжения роторной цепи АДФР от скольжения

Система управления инвертором вырабатывает сигнал задания максимальной частоты, который сравнивается с сигналом, поступающим от интегрального блока (регулятора тока). Результирующий сигнал задания на частоту выходного тока обеспечит максимальную частоту тока на выходе открывшегося инвертора, при этом полное комплексное сопротивление индукционного резистора будет максимальным, согласно [12–14]:

$$\underline{Z}_M = Z_1 \frac{uw^2}{l_\Sigma} e^{j\varphi}, \quad (2)$$

где Z_1 – модуль полного электрического сопротивления единичного квадрата поверхности магнитопровода; u – периметр стержня; w – число витков; l_Σ – эквивалентная длина фазного магнитопровода.

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_e \omega}{\gamma}}, \quad (3)$$

где μ_e – магнитная проницаемость на поверхности магнитопровода; ω – круговая частота поля; γ – удельная электрическая проводимость материала.

Активная и индуктивная составляющие определяются с помощью соотношений [15–17]:

$$r_m = 0,86 Z_m; \quad (4)$$

$$x_m = 0,53 Z_m. \quad (5)$$

После открытия инвертора, по цепи, состоящей из обмотки ротора, нерегулируемого выпрямителя, датчика тока, регулируемого инвертора, индукционного резистора, начинает протекать ток. Одновременно происходит заряд фильтрующего конденсатора в звене постоянного тока. На **рис. 4** показана зависимость изменения полного комплексного сопротивления ИР от частоты выходного тока инвертора.

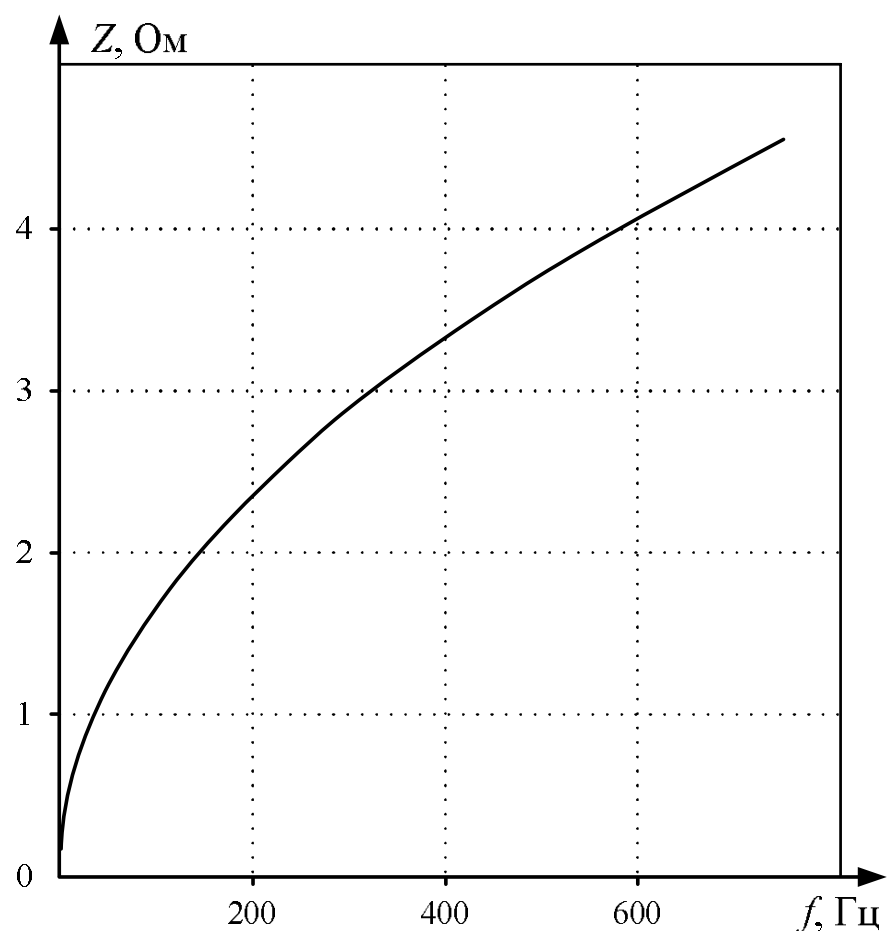


Рис. 4. Зависимость полного комплексного сопротивления ИР от частоты тока на выходе инвертора

Ток в выпрямленной цепи можно рассчитать по формуле

$$I_d = \frac{E_{dp} - E_{du} - \Delta U_{B\Sigma}}{R_{\text{ЭКВ}}}, \quad (6)$$

где E_{du} – противоЭДС инвертора в выпрямленной цепи; $\Delta U_{B\Sigma}$ – суммарное падение напряжения на вентиллях схемы; $R_{\text{ЭКВ}}$ – суммарное сопротивление, приведенное к цепи постоянного тока [18],

$$R_{\text{ЭКВ}} = r_2^* + x_p^* + x_{\text{ис0}}^* + x_\mu^* + r_\mu^*; \quad (7)$$

$$r_2^* = 2r_p; \quad (8)$$

$$x_p^* = \frac{3x_p s}{\pi}; \quad (9)$$

$$x_{\text{ис0}}^* = \frac{3x_{\text{ис0}}(f/f_6)}{\pi}; \quad (10)$$

$$x_\mu^* = \frac{3x_\mu \sqrt{f/f_6}}{\pi}; \quad (11)$$

$$r_\mu^* = 2r_\mu \sqrt{f/f_6}, \quad (12)$$

где r_2^* – приведенное активное сопротивление ротора; x_p^* – приведенное реактивное сопротивление ротора; $x_{\text{ис0}}^*$ – приведенное индуктивное сопротивление обмотки индукционного реостата; x_μ^* – приведенное индуктивное сопротивление магнитопровода индукционного реостата; r_μ^* – приведенное активное сопротивление магнитопровода индукционного реостата; f – текущая частота на выходе инвертора; f_6 – максимальная частота на выходе инвертора.

ПротивоЭДС инвертора, в первом приближении, численно равна падению напряжения на индукционном сопротивлении:

$$E_{du} = Z_{\text{ис}} \cdot k_{\text{сх}} \cdot I_d, \quad (13)$$

где $Z_{\text{ис}}$ – полное комплексное сопротивление ИР; $k_{\text{сх}}$ – коэффициент приведения напряжения мостовой схемы к цепи постоянного тока.

При прохождении тока в выпрямленной цепи через датчик тока, сигнал U_{OT} с датчика тока поступает на отрицательный вход второго узла сравнения 2, а от блока задания выпрямленного тока поступает сигнал U_{3T} на положительный вход узла сравнения 2. Сигнал рассогласования $\Delta U_T = U_{3T} - U_{OT}$ поступает на вход интегрального блока, который вырабатывает сигнал желаемого изменения частоты $U_{ИЧ}$, этот сигнал ограничивается блоком ограничения.

При изменении скорости асинхронного двигателя в процессе пуска на первом узле сравнения 1 производится сравнение сигнала задания максимальной частоты $U_{3МЧ}$ и сигнала желаемого изменения частоты $U_{ИЧ}$, определяется рассогласование $\Delta U_{\text{ч}} = U_{3МЧ} - U_{ИЧ}$. Блок ограничения сигнала $U_{ИЧ}$ настраивают так, чтобы сигнал $\Delta U_{\text{ч}}$ на входе блока регулятора частоты был всегда положительным. На **рис. 5** показана зависимость тока в выпрямленной цепи от скольжения ротора АДФР, из

которой видно, что система управления инвертором обеспечивает его поддержание на заданном уровне.

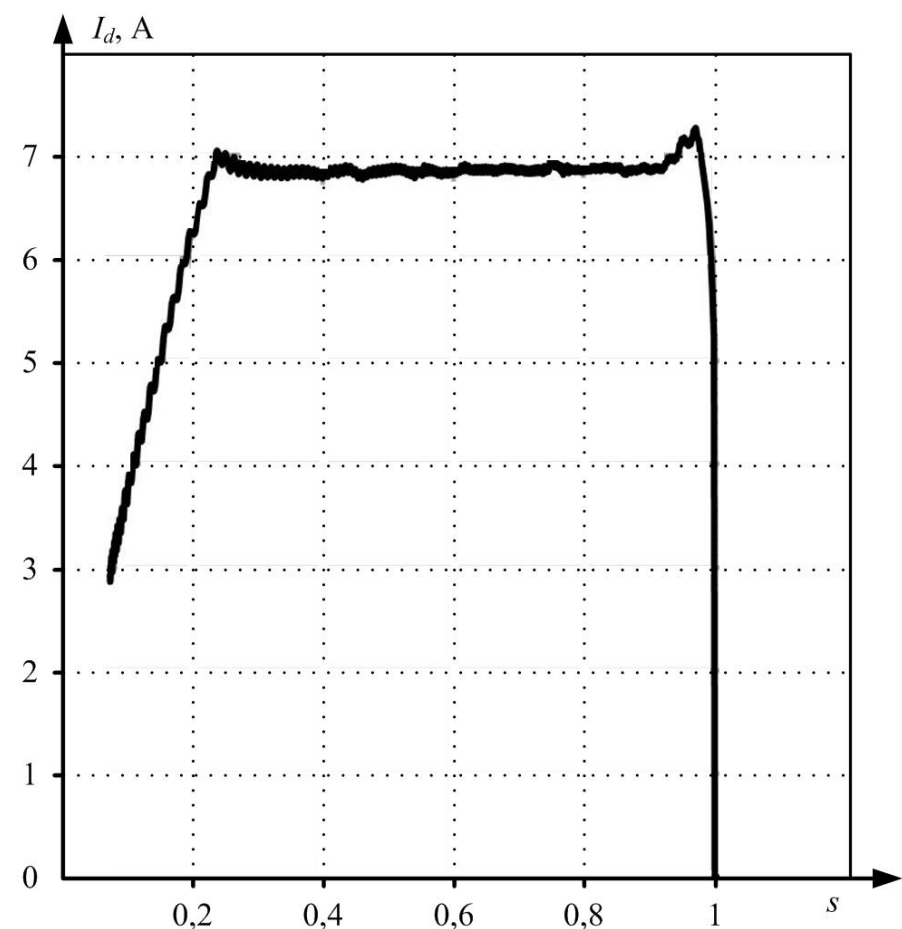


Рис. 5. Зависимость тока в выпрямленной цепи от скольжения

По мере разгона асинхронного двигателя происходит уменьшение ЭДС ротора, поэтому для поддержания постоянства тока ротора необходимо уменьшать вводимую противоЭДС инвертора. Это достигается путем уменьшения частоты тока на выходе инвертора, вследствие чего уменьшается сопротивление магнитной системы индукционного резистора [12-17], влияющее на результирующий ток в цепи ротора. После достижения двигателем скорости, близкой к скорости на естественной механической характеристике, частота тока на выходе инвертора устанавливается минимальной или равной нулю, для этого открывают только два ключевых вентильных элемента – один в анодной, а другой в катодной, группах вентилей инвертора, и по двум фазным обмоткам индукционного реостата будет протекать постоянный ток. В этом случае добавочное сопротивление, введенное в цепь ротора асинхронного двигателя, будет минимальным. Необходимый темп уменьшения частоты на выходе инвертора в процессе пуска задают исходя из желаемого темпа разгона электропривода путем соответствующей настройки постоянной времени интегрального блока. Для получения пониженной скорости вращения асинхронного двигателя необходимо устанавливать соответствующую частоту тока на выходе инвертора. На **рис. 6** показано изменение выходной частоты инвертора в зависимости от скольжения ротора асинхронного электродвигателя.

Была построена динамическая механическая характеристика (**рис. 7**), отображающая зависимость момента на валу электродвигателя от его скорости. Пуск электродвигателя производился под нагрузкой ($M_{\text{нагр}} = M_{\text{над}}$). Видно, что разгон электродвигателя происходит при постоянном значении пускового момента.

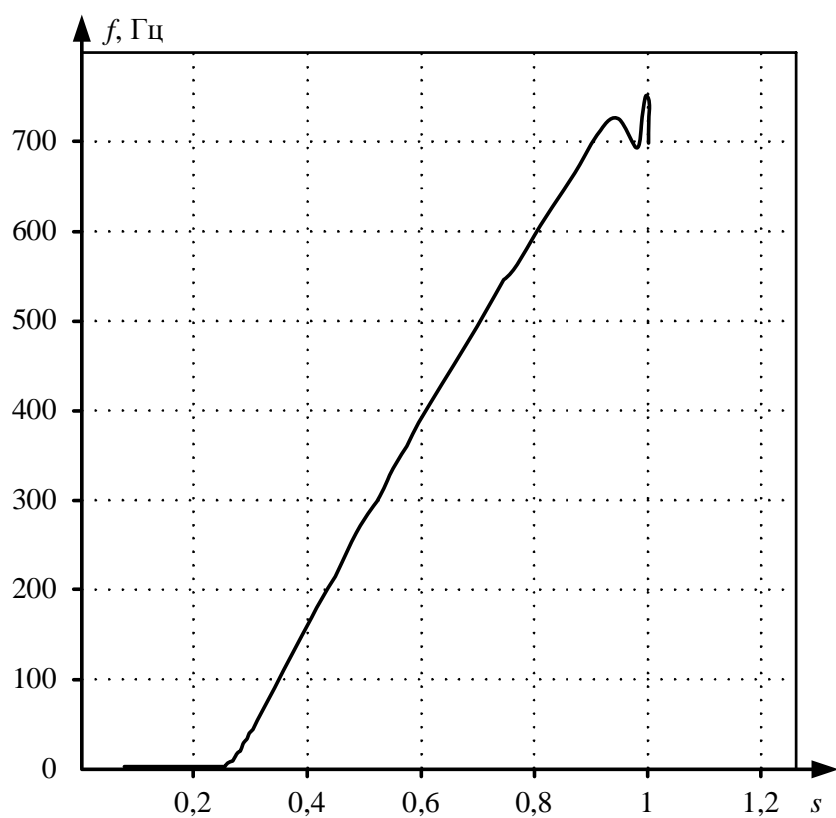


Рис. 6. Зависимость частоты выходного тока инвертора от скольжения

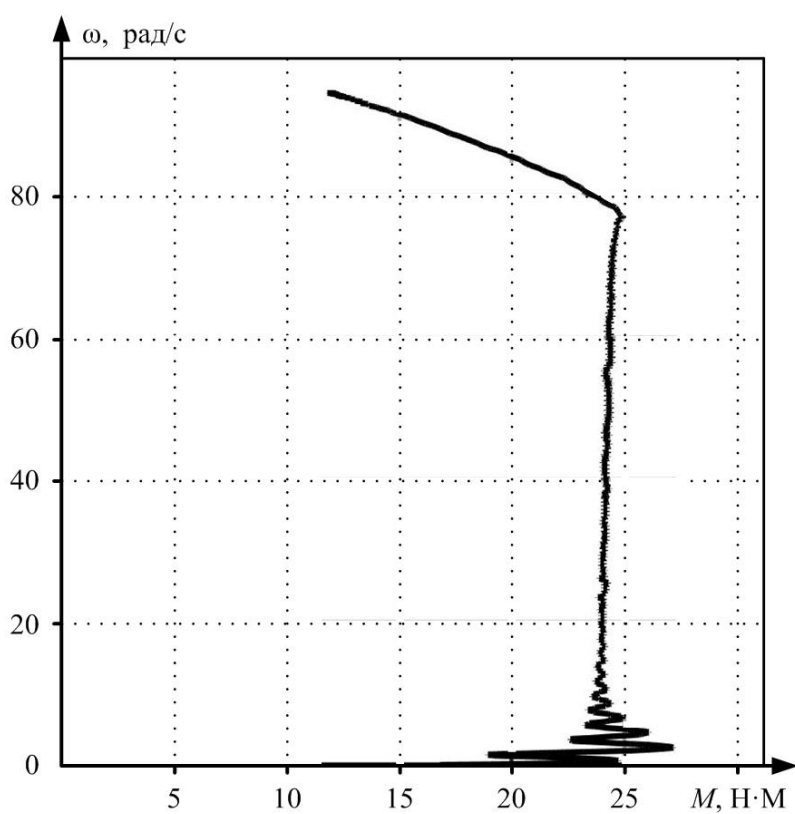


Рис. 7. Динамическая механическая характеристика

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для подтверждения изменения полного комплексного сопротивления индукционного реостата был проведен эксперимент. Схема экспериментальной установки соответствует схеме электропривода, приведенной на **рис. 1**, в которой в звено постоянного тока включен амперметр, частота на выходе инвертора измерялась с помощью частотомера.

В ходе эксперимента для различных значений выпрямленной ЭДС ротора АД с ФР с помощью системы управления инвертором задавалось такое значение частоты выходного тока, чтобы ток, протекающий в выпрямленной цепи, оставался неизменен. Полученные в результате частотные характеристики индукционного резистора приведены на **рис. 8**.

Из **рис. 8** видно, что полученные в результате эксперимента частотные зависимости имеют нелинейный характер.

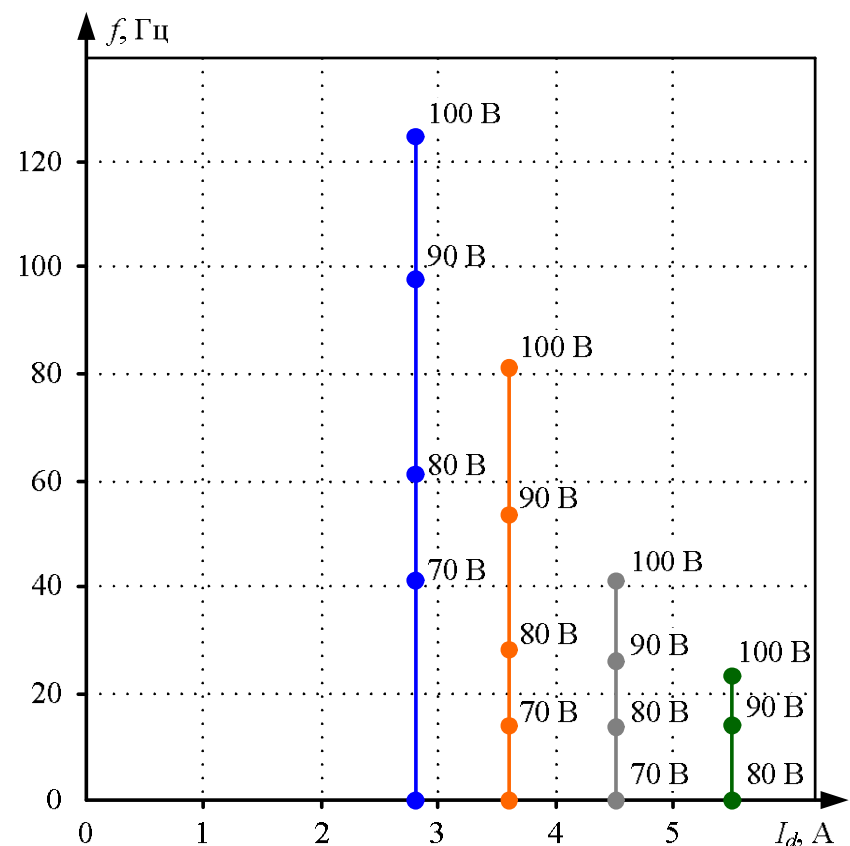


Рис. 8. Экспериментальные частотные зависимости индукционного резистора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущество предлагаемого способа управления асинхронным двигателем с фазным ротором заключается в простоте реализации, т.к. регулируется только одна переменная – частота тока на выходе инвертора.

При построении замкнутого контура регулирования тока в выпрямленной цепи обеспечивается постоянство тока ротора и момента при пуске асинхронного двигателя.

В электроприводе возможно построение двухконтурной системы управления с внешним контуром регулирования скорости двигателя, что позволит получить более качественные динамические характеристики.

Статья написана при поддержке гранта РФФИ №17-48-480492 р_а «Анализ, математическое моделирование и оптимизация управления электромеханическими системами с электроприводами переменного тока мехатронных устройств, манипуляторов и грузоподъемных механизмов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. 256 с.
2. Jiang You, Minghao Liu, Jiarui Ma, Hongjie Jia Modeling and Analyse of Induction Motor Drive System with Consideration of DC Bus Stabilization and Control Performance // 8th International Power Electronics and Motion Control Conference. 2016. Pp. 1362–1368.
3. Dargad R., Dubey G. Control of Induction Motor Using of Saturistor with High Eddy Current Loss // Journal–EL. 1975. Vol.56. №10. Pp. 51–56.
4. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронно вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: Энергия, 1979. 200 с.
5. Асинхронно-вентильный крановый электропривод / Хватов С.В., Грязнов В.И., Крюков О.В., Федоров О.В. // Электродвигатели переменного тока подъемно-транспортных механизмов. Суздаль: ВНИПТИЭМ, 1988. С. 46–48.
6. Шулаков Н.В., Медведев Е.Н. Асинхронный вентильный каскад с последовательным возбуждением двигателя // Изв. вузов. Электромеханика. 1988. С. 47–54.

7. Мещеряков В.Н., Федоров В.В. Асинхронно-вентильный каскад с инвертором в цепи статора и общим звеном постоянного тока // *Электротехника*. 1998. № 6. С. 47–50.
8. Hengameh Kojooyan-Jafari, Lluís Monjo, Felipe Corrales, Joaquín Pedra Parameter Estimation of Wound-Rotor Induction Motors From Transient Measurements // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2014. V.10. №2. Pp. 300–308.
9. Пат. 2661343 Российская Федерация, МПК H02P 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». Оpubл. 17.07.2018.
10. Плеханов М.С. Модель асинхронного электродвигателя с массивным ферромагнитным ротором в режиме минимального скольжения // *Сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием: Инженерия для освоения космоса*. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. С. 66–70.
11. Муравьев А.А., Бойков А.И. Системы управления асинхронной машиной с фазным ротором с вентильными преобразователями в цепи ротора // *Материалы XII междуна-*
- родной научно-практической конференции: Современные сложные системы управления. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2017. С. 159–163.
12. Нейман Л.Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. М.;Л.: Госэнергоиздат, 1949. 190 с.
13. Власов В.Г. Экспериментальные исследования и методика расчета асинхронных двигателей с индукционным сопротивлением в цепи ротора // *Электротехническая промышл. Сер. Электропривод*. 1967. №293. С. 3–6.
14. Nanda J., Mathew M. Constant starting torque of induction motor Impedance Control—A Novel Approach // *Institution of Engineers of India Journal*. 1979. Vol. 59, №5. Pp. 278–283.
15. Воскобойников Б.А. Применение индукционных реостатов для крановых электроприводов // *Пром. энергетика*. 1976. №11. С. 25–28.
16. Шумков Е.Б., Епифанов В.П., Завьялов Н.С. Энергетические особенности электроприводов с индукционными реостатами // *Промышленная энергетика*. 1979. №1. С. 26–28.
17. Pat. №1577863 UK, INT. Cl. H 03F 9/04. Saturable reactors / Logan R. 1988.
18. Мещеряков В.Н., Морозов С.В., Теличко Л.Я. Расчет параметров индукционных сопротивлений для асинхронных двигателей с фазным ротором // *Изв. вузов. Электромеханика*. 1989. № 3. С. 50–52.

Поступила в редакцию 09 января 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SYSTEM OF SOFT START FOR INDUCTION MOTOR WITH 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. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>.

Andrey I. Boikov

Assistant, Department of Electric Drive, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: aboikov2013@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0032-0683>.

Denis V. Lastochkin

Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: kaf-ep@stu.lipetsk.ru.

In the electric drive designed on the basis of an asynchronous motor with a phase rotor it is proposed to regulate the rotor current using the rectifier-inverter unit. The input of the rectifier is connected to the terminals of the rotor winding of the motor and the output of the inverter performed on the basis of IGBT-transistors with reverse diodes is connected to the frequency-dependent inductive-active resistance. A capacitive filter is included in the DC link. In the electric drive system, the installed soft-start of the asynchronous motor with a phase rotor is implemented with the possibility of regulating and maintaining the constancy of the starting torque to ensure the required acceleration. It is proposed to use such an electric drive system on conveyors of metallurgical production, which often do not require speed control, but providing starting modes with a predetermined rate of acceleration including when the conveyor is fully loaded. The electric drive system combines some properties of asynchronous valve cascade and parametric control systems. The operation of the inverter control system is described, it implements stabilization of the rotor current of an induction motor by changing the frequency at the output of the voltage inverter as a function of the rectified current of the motor rotor. Frequency-dependent inductive-active resistance, referred to as induction resistance, contains a massive magnetic core with three

tubular rods connected by a yoke and each rod has a single-layer phase winding. The wall thickness of the tubular rods does not exceed the depth of penetration of the electromagnetic field into the massive ferromagnetic material. The results of experimental studies of the frequency characteristics of the induction resistance are presented. The mathematical model of the electric drive system is developed, computer simulation of dynamic processes is carried out using the MATLAB Simulink application software package. The possibility of implementing the proposed method of controlling the process of starting an induction motor with the stabilization of the starting torque has been proven.

Keywords: induction motor with phase rotor, starting torque, rectifier, inverter, filter, induction resistance.

REFERENCES

1. Braslavskij I.Ja., Ishmatov Z.Sh., Poljakov V.N. *Energosberegajushhij asinhronnyj elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric drive]. Moscow, Akademija Publ., 2004, 256 p. (In Russian)
2. Jiang You, Minghao Liu, Jiarui Ma, Hongjie Jia Modeling and Analyse of Induction Motor Drive System with Consideration of DC Bus Stabilization and Control Performance. 8th Inter-national Power Electronics and Motion Control

- Conference, 2016, pp. 1362–1368.
3. Dargad R., Dubey G. Control of Induction Motor Using of Saturistor with High Eddy Current Loss. *Journal–EL*, 1975, no. 10 (56), pp. 51–56.
 4. Onischenko G.B., Lokteva I.L. *Asinhronno ventilnyie kaskady i dvigateli dvoynogo pitaniya* [Asynchronously valve stages and dual power motors]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 200 pp. (In Russian)
 5. Hvatov S.V., Grjaznov V.I., Krjukov O.V., Fedorov O.V. Asynchronous valve crane electric drive. *Elektrodvigateli peremennogo toka podjomno-transportnyh mehanizmov* [Electric motors of alternating current of lifting and transport mechanisms], 1988, pp. 46–48. (In Russian)
 6. Shulakov N.V., Medvedev E.N. Asynchronous valve cascade with sequential excitation of the motor. *Izvestija vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of the universities. Electrical engineering], 1988, pp. 47–54. (In Russian)
 7. Meshherjakov V.N., Fedorov V.V. Asynchronously-valve cascade with the inverter in the stator circuit and a common DC link. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 1998, no. 6, pp. 47–50. (in Russian)
 8. Hengameh Kojooyan-Jafari, Llurs Monjo, Felipe Corcoles, Joaquin Pedra Parameter Estimation of Wound-Rotor Induction Motors From Transient Measurements. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, no. 2(10), pp. 300–308.
 9. Meshherjakov V.N., Boikov A.I., Lastochkin D.V. *Sposob upravlenija asinhronnym dvigatelem s faznym rotorom* [Method of control of asynchronous motor with phase rotor], Patent RF, no. 2661343, 2018.
 10. Plehanov M.S. Model of induction motor with massive ferromagnetic rotor in the minimum slip mode. *Sbornik nauchnyh trudov IV Vstrossijskogo molodezhnogo Foruma s mezhdunarodnym uchastiem: Inzhenerija dlja osvoenija kosmosa*. [Collection of scientific works of the IV all-Russian youth Forum with international participation: Engineering for space exploration], 2016, pp. 66–70. (in Russian)
 11. Muravyev A.A., Boikov A.I. Control systems of an asynchronous machine with a phase rotor with valve converters in the rotor circuit. *Materialyi XII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Sovremennye slozhnyie sistemyi upravleniya* [Proceedings of the XII international scientific and practical conference: HTCS 17], 2017, pp. 159–163. (In Russian)
 12. Nejman L.R. *Poverhnostnyj jeffekt v ferromagnitnyh telah* [Surface effect in ferromagnetic bodies]. Moscow; Leningrad, Gosjenergoizdat Publ., 1949, 190 p. (In Russian)
 13. Vlasov V.G. Experimental studies and methods of calculation of induction motors with induction resistance in the rotor circuit. *Elektrotehnicheskaja promyshl. ser. elektroprivod* [Electrical industry. Series: Electric Drive], 1967, no. 293, pp. 3–6. (In Russian)
 14. Nanda J., Mathew M. Constant starting torque of induction motor Impedance Control–A Novel Approach. *Institution of Engineers of India Journal*, 1979, no. 5 (59), pp. 278–283.
 15. Voskoboynikov B.A. The application of induction resistors for crane electric drives. *Promyshlennaja jenergetika* [Industrial power engineering], 1976, no. 11, pp. 25–28. (In Russian)
 16. Shumkov E.B., Epifanov V.P., Zavjalov N.S. Energy features of electric drives with induction resistances. *Promyshlennaja jenergetika* [Industrial power engineering], 1979, no.1, pp. 26–28. (In Russian)
 17. Logan R. Saturable reactors. Patent UK, no. 1577863, 1988.
 18. Mescheryakov V.N., Morozov S.V., Telichko L.Ya. Calculation of parameters of induction of resistance to asynchronous motors with wound rotor. *Izestija vuzov SSSR* [Proceedings of Universities of the USSR], 1989, no. 3, pp. 50–52. (In Russian)

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. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-24-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-24-29)

Meshcheryakov V.N., Boikov A.I., Lastochkin D.V. System of Soft Start for Induction Motor with Phase Rotor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 24-29. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-24-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-24-29)