

УДК 621.313.333.1

В. Н. Мещеряков, А. И. Бойков, В. В. Пикалов, А. А. Муравьев, Д. В. Ласточкин  
Липецкий государственный технический университет «ЛГТУ»

## **Электропривод на базе асинхронной машины с индукционным сопротивлением в цепи ротора, подключенным через вентильные элементы**

*Актуальность исследования обусловлена интенсивным развитием систем регулируемого электропривода переменного тока, в составе которых наряду с частотно-регулируемыми асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором (АД с КЗР) находят свою область применения асинхронные электродвигатели с фазным ротором (АД с ФР), используемые на механизмах подъемно-транспортного назначения. Если при проведении модернизации электропривода с расширением диапазона регулирования скорости АД с ФР не заменяют на АД с КЗР, то обмотку ротора закорачивают, а обмотку статора запитывают от преобразователя частоты (ПЧ). Однако преобразователь частоты генерирует на статор несинусоидальное напряжение, приводящее к возникновению высших гармоник тока, что негативно сказывается на сроке службы АД с ФР, рассчитанного на питание от промышленной сети. Вследствие вышеизложенного актуальна задача совершенствования систем регулируемого электропривода на базе электродвигателя с фазным ротором в направлении создания гибридных систем частотно-параметрического управления. В работе предложена система электропривода на базе асинхронного электродвигателя с фазным ротором, имеющая улучшенные показатели за счет внедрения новых схемных решений и алгоритмов управления, обеспечивающих управление двигателем по цепи ротора. Описан принцип действия индукционного сопротивления, введенного в цепь ротора через преобразователь частоты, изменяющего свои параметры в зависимости от частоты протекающего через него тока. Предложен способ регулирования скорости электродвигателя, заключающийся в плавном изменении введенного в цепь ротора добавочного индуктивно-активного сопротивления, соединенного с ротором через преобразователь частоты. Рассмотрена методика приведения сопротивлений обмотки ротора и индукционного сопротивления к звену постоянного тока. Методом математического моделирования в программном пакете MatLab Simulink проверена работоспособность предложенной системы электропривода. В результате компьютерной симуляции были получены механические и энергетические характеристики описанной системы электропривода. На основании данных, полученных в результате моделирования, изучены свойства данной системы электропривода.*

**Асинхронный электродвигатель, фазный ротор, параметрический регулятор,  
индукционное сопротивление, преобразователь частоты, автономный инвертор  
напряжения, программный пакет Matlab Simulink**

Совершенствование систем электропривода, как в целом, так и их отдельных узлов, происходит непрерывно, например внедряются в производство усовершенствованные полупроводниковые приборы и преобразователи, развиваются микропроцессорные устройства автоматического управления. Сочетание всех перечисленных устройств позволяет создавать на базе различных двигателей системы автоматического регулируемого электропривода с улучшенными показателями.

Хотя большинство электроприводов переменного тока строятся на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [1]–[3], на некоторых механизмах, например подъемно-транспортных, нашли свое применение асинхронные двигатели с фазным ротором. Для управления такими двигателями зачастую применяют параметрические системы запуска и регулирования скорости [4]–[7]. Они позволяют реализовать требуемый темп разгона и ограничить пусковые то-

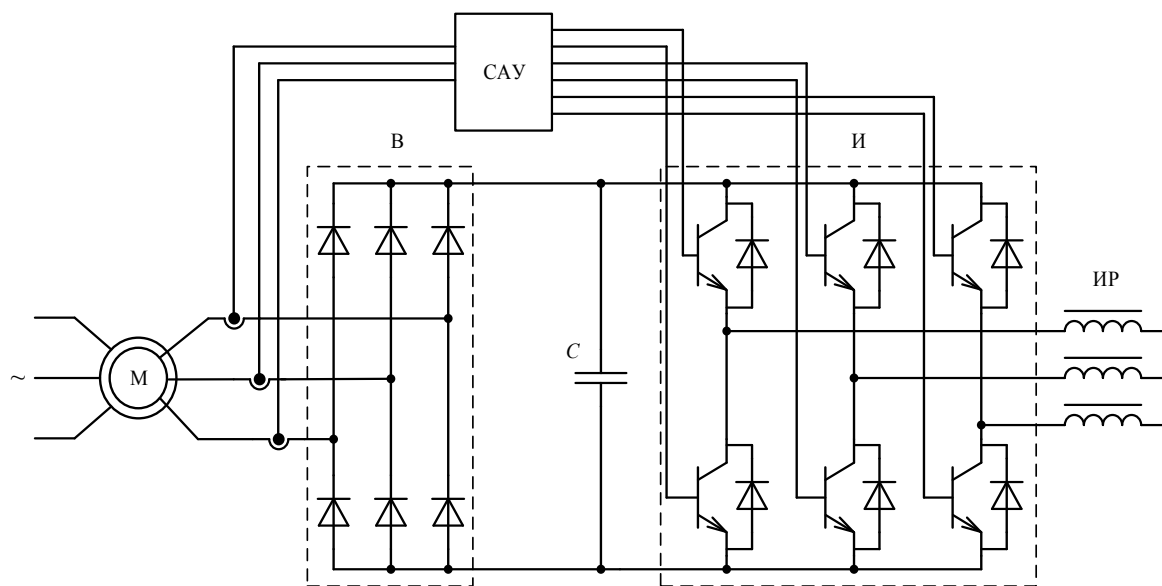


Рис. 1

ки, однако для них характерны большие потери энергии при пуске, перенапряжения, возникающие в роторе и приводящие к межвитковому короткому замыканию.

Остается актуальной разработка простой и надежной системы электропривода, способной осуществить плавный запуск асинхронного электродвигателя с фазным ротором с возможностью дальнейшего регулирования скорости.

Известны конструктивно простые системы параметрического управления асинхронным электродвигателем с фазным ротором, построенные на базе частотно-зависимого индукционного сопротивления, имеющего массивный стальной магнитопровод и фазные обмотки, подключаемые к выводам обмоток ротора электродвигателя [8]–[10]. При изменении скольжения двигателя изменяется частота тока, протекающего по обмоткам индукционного сопротивления, и соответственно изменяется его комплексное сопротивление [11]. Однако в таких системах электропривода не обеспечивается стабилизация пускового момента.

В предложенной системе электропривода (рис. 1) между выводами обмоток ротора и индукционным сопротивлением включен преобразователь частоты со звеном постоянного тока, выполненный на базе автономного инвертора напряжения [12]. Система управления инвертором, содержащая контур регулирования тока ротора, изменяет задание на выходную частоту инвертора, обеспечивая постоянство тока ротора при пуске электродвигателя [13]. Под действием выходного тока инвертора, протекающего по об-

моткам индукционного сопротивления, в его массивном магнитопроводе выделяются потери от вихревых токов и гистерезиса.

Глубина проникновения электромагнитного поля в массивный магнитопровод зависит от частоты тока в обмотках индукционного сопротивления  $\omega$  [14]:

$$n = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_e \gamma}},$$

где  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость материала;  $\mu_e$  – магнитная проницаемость на поверхности магнитопровода.

Эквивалентное комплексное сопротивление магнитопровода, приведенное к обмотке индукционного сопротивления, определяется по формуле [15]

$$Z_M = Z_1 \frac{uw^2}{l_\Sigma} e^{j\varphi},$$

где  $Z_M$  – полное эквивалентное электрическое

сопротивление магнитопровода;  $Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_e \omega}{\gamma}}$  – мо-

дуль полного электрического сопротивления единичного квадрата поверхности магнитопровода ( $\mu_e$  – магнитная проницаемость на поверхности магнитопровода;  $\omega$  – круговая частота тока ротора;  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость материала);  $u$  – периметр стержня;  $l_\Sigma$  – эквивалентная длина фазного магнитопровода;  $w$  – число витков.

Активная и индуктивная составляющие определяются с помощью соотношений [16]

$$r_m = 0.86Z_m; \quad x_m = 0.53Z_m.$$

Введенный в цепь ротора преобразователь частоты, содержащий мостовой диодный выпрямитель и автономный инвертор напряжения, служит для ротора электродвигателя источником добавочного напряжения. Протекающие в таком случае в цепи ротора электромагнитные процессы могут быть описаны с использованием методики, разработанной для систем асинхронно-вентильного каскада [17].

Аналитическое описание электромагнитных процессов в асинхронном электродвигателе, работающем по предложенной схеме, в векторной форме для ортогональной подвижной самоориентирующейся системы координат  $gi$ , представляется системой уравнений [17, с. 44–52], [18]

$$\begin{cases} U_1 = L_s \frac{d\bar{i}_1}{dt} + L_m \frac{d\bar{i}_2}{dt} + j\omega_g L_s \bar{i}_1 + j\omega_g L_m \bar{i}_2 + r_1 \bar{i}_1; \\ -U_2 = L_r \frac{d\bar{i}_2}{dt} + L_m \frac{d\bar{i}_1}{dt} + j\omega_{gs} L_r \bar{i}_2 + \\ + j\omega_{gs} L_m \bar{i}_1 + r_2 \bar{i}_2; \\ M = -\frac{3}{2} p_n L_m [\bar{i}_1, \bar{i}_2], \end{cases}$$

где  $U_1$  – напряжение на статоре асинхронной машины;  $U_2$  – добавочное напряжение в цепи ротора;  $L_s, L_r$  – индуктивности цепи статора и ротора;  $L_m$  – взаимная индуктивность;  $M$  – электромагнитный момент;  $p_n$  – число полюсов электродвигателя.

Полученная система нелинейных дифференциальных уравнений достаточна для разрешения относительно любой из переменных  $\bar{i}_1, \bar{i}_2, M$ . Принимая во внимание, что  $\bar{i}_2 = i_2$ , и учитывая, что в установившихся режимах производные от перемен-

ных величин равны нулю, разрешив систему уравнений относительно  $i_2$ , получим [17, с. 63–70]–[19]:

$$\begin{cases} U_1 s \cos \delta - U_2 \frac{L_s}{L_m} = I_2 \left( \frac{r_2 L_s}{L_m} + \frac{r_1 s L_r}{L_m} \right); \\ -U_1 s \sin \delta - \frac{r_1}{\omega_0 L_m} U_2 = \\ = I_2 \left( \frac{r_1 r_2}{\omega_0 L_m} - \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m^2} s \omega_0 \right), \end{cases}$$

где  $s$  – скольжение асинхронного электродвигателя;  $\delta$  – угол между векторами  $\bar{i}_1, \bar{i}_2$ ;  $\omega_0$  – частота вращения магнитного поля статора;  $I_2$  – действующее значение тока в цепи ротора.

Однако поскольку в предлагаемой системе электропривода через разные элементы схемы протекает переменный ток разной частоты, удобнее всего использовать в расчетах ток в выпрямленной цепи, приведя все элементы схемы к цепи выпрямленного тока.

Схема замещения роторной цепи, приведенной к звену постоянного тока, представлена на рис. 2, где  $E_{dp}$  – приведенное к звену постоянного тока ЭДС роторной цепи;  $I_d$  – ток, протекающий в звене постоянного тока;  $C$  – конденсатор в звене постоянного тока;  $r_2^*$  – приведенное активное сопротивление ротора;  $x_p^*$  – приведенное реактивное сопротивление ротора;  $x_{и.с0}^*$  – приведенное индуктивное сопротивление обмотки индукционного реостата;  $x_\mu^*$  – приведенное индуктивное сопротивление магнитопровода индукционного реостата;  $r_\mu^*$  – приведенное активное сопротивление магнитопровода индукционного реостата.

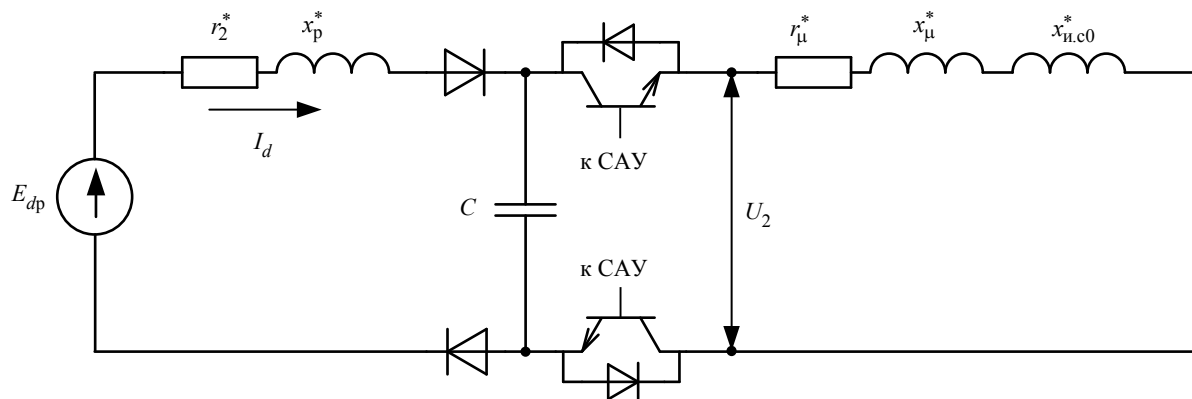


Рис. 2

Уравнение равновесия ЭДС в роторном контуре имеет вид [17, с. 63–70]

$$E_{2k} s \cos \delta = I_2 r_{2*} x_p + U_2,$$

где  $r_{2*} = \frac{r_2}{x_p}$  – сопротивление цепи ротора в относительных единицах;  $U_2$  – добавочное напряжение в цепи ротора.

Данное равенство представляет собой уравнение проекций ЭДС на ось  $g$  для роторного контура [17]. Поскольку все векторные величины на стороне выпрямленного тока ротора направлены вдоль оси  $g$ , можно осуществить переход от фазных переменных к переменным, приведенным к цепи выпрямленного тока [17, с. 63–70]:

$$1.35 E_p s - U_2 = I_d R_{\text{экв}}.$$

Эквивалентное суммарное сопротивление цепи выпрямленного тока  $R_{\text{экв}}$  определяется по выражениям

$$R_{\text{экв}} = r_2^* + x_p^* + x_{\text{и.с}0}^* + x_{\mu}^* + r_{\mu}^*;$$

$$r_2^* = 2r_p; \quad x_p^* = \frac{3x_{p0}s}{\pi};$$

$$x_{\text{и.с}0}^* = \frac{3x_{\text{и.с}0}(f/f_0)}{\pi};$$

$$x_{\mu}^* = \frac{3x_{\mu 0}\sqrt{f/f_0}}{\pi};$$

$$r_{\mu}^* = 2r_{\mu 0}\sqrt{f/f_0},$$

где  $f$  – текущая частота на выходе инвертора;  $f_0$  – максимальная частота на выходе инвертора;  $r_2$  – сопротивление ротора;  $x_{\text{и.с}0}$  – индуктивное сопротивление обмотки индукционного реостата;  $x_{\mu 0}$  – базовое индуктивное сопротивление магнитопровода индукционного реостата;  $r_{\mu 0}$  – базовое активное сопротивление магнитопровода индукционного реостата.

Добавочное напряжение  $U_2$  в первом приближении численно равно падению напряжения на индукционном сопротивлении:

$$U_2 = Z_{\text{и.с}} k_{\text{сх}} I_d.$$

Следовательно, ток в выпрямленной цепи

$$I_d = \frac{1.35 E_p s}{R_{\text{экв}} + Z_{\text{и.с}} k_{\text{сх}}},$$

где  $Z_{\text{и.с}}$  – полное сопротивление индукционного резистора;  $k_{\text{сх}}$  – коэффициент трехфазной мостовой схемы выпрямления.

Выпрямленное напряжение ротора с учетом падения напряжения на коммутацию

$$E_{\text{др}} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} \cdot E_{2k} s - \frac{3}{\pi} x_r I_d.$$

Зависимость электромагнитного момента от выпрямленного тока имеет вид

$$M = \frac{1.17}{\omega_0} I_d \sqrt{E_p^2 2x_p^2 I_d^2}.$$

Для исследования рассматриваемой схемы была собрана компьютерная модель в программном пакете MatLab Simulink для двигателя МТН-011-6 (рис. 3). Каждый блок модели представляет собой виртуальное представление какого-либо физического объекта (например, двигателя, диода, резистора) или математического действия (от простого сложения до дифференциальных уравнений). Дифференциальные уравнения, описывающие каждый блок модели, компилируются в единую систему и рассчитываются, облегчая процесс математического моделирования [20].

Блок Voltage Source служит источником напряжения для асинхронной машины с регулируемой частотой и амплитудой. Измерение фазного значения напряжения в статорной и роторной цепях осуществляется датчиками напряжения Voltage Sensor\_1 и Voltage Sensor\_2. Для определения фазного тока используются датчики тока Current Sensor\_1 и Current Sensor\_2. Блок Torque задает нагрузочный момент машины. Блоки  $w$ ,  $a$  и  $trq$  – датчики скорости и момента. Преобразователь частоты состоит из трех подсистем: Rectifier моделирует трехфазный мостовой неуправляемый выпрямитель; Inverter моделирует трехфазный инвертор на IGBT-транзисторах с обратными диодами; CS управляет ключами инвертора с помощью ШИМ-модуляции и задания значения сопротивления блока V\_Resistor. Ток и напряжения звена постоянного тока определяются с помощью блоков Current Sensor\_3 и Voltage Sensor\_3. Подсистема V\_Resistor – это модель индукционного сопротивления, изменяющего свое сопротивление от частоты тока на выходе инвертора. В блоке Slover Configuration выбирается метод расчета дифференциальных уравнений и задается относительная погрешность.

В качестве результатов математического моделирования на рис. 4 представлена динамическая характеристика электропривода, показыва-

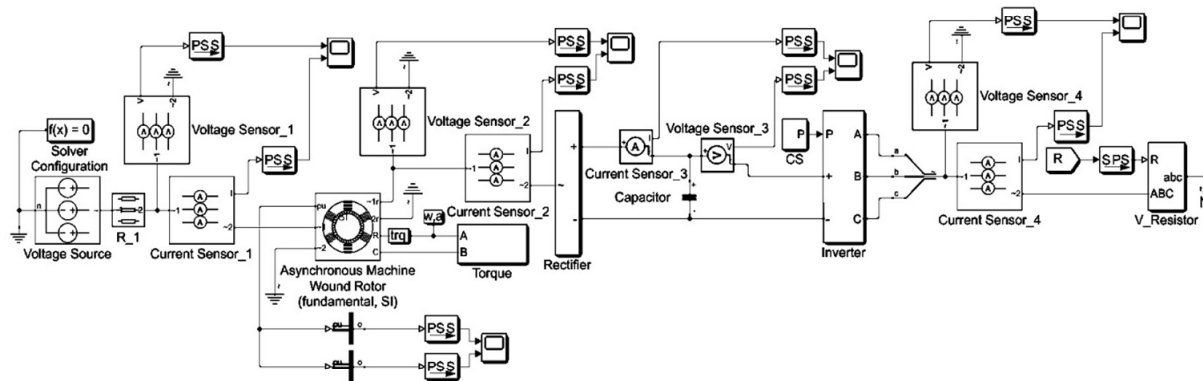


Рис. 3

ющая зависимость скорости от времени для различных значений статического момента. Разгон электропривода происходит под нагрузкой за время  $t \approx 1.1$  с до точки установившейся работы. В начальный момент времени частота тока на выходе инвертора зависит от нагрузки и равняется 300, 1000, 1700 Гц, соответствующих нагрузке  $2 M_H$ ,  $1.5 M_H$ ,  $1 M_H$ . По окончании разгона в точке установившегося режима частота тока на выходе инвертора составляет 5 Гц вне зависимости от текущей нагрузки. В момент времени  $t_1 = 1.5$  с происходит переход на пониженную скорость за счет увеличения частоты выходного тока инвертора до 100 Гц.

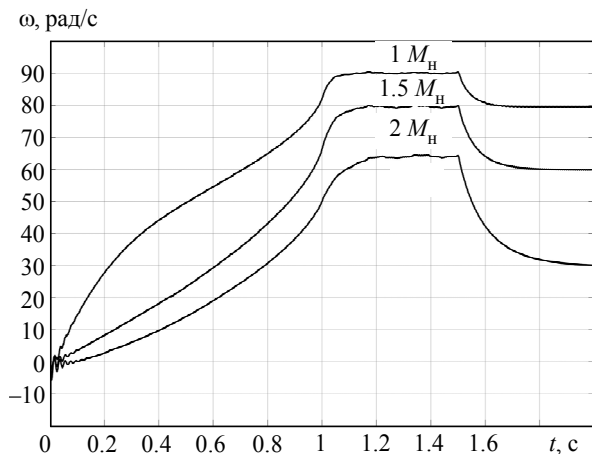


Рис. 4

Система управления инвертором обеспечивает поддержание постоянства тока ротора изменением выходной частоты инвертора в функции скорости. Форма мгновенных значений кривых тока в роторе электродвигателя не отличается от классического вентильного каскада. Зависимость, приведенная на рис. 5, демонстрирует изменение действующего значения тока роторной цепи от времени. На рис. 6 представлены динамические механические характеристики электропривода,

показывающие зависимость момента двигателя от времени при различных значениях момента нагрузки. Видно, что поддержание постоянства тока в цепи ротора позволяет обеспечить примерное постоянство момента. В момент времени  $t_1 = 1.5$  с изменяется сигнал задания скорости и происходит переход на механическую характеристику с пониженной скоростью.

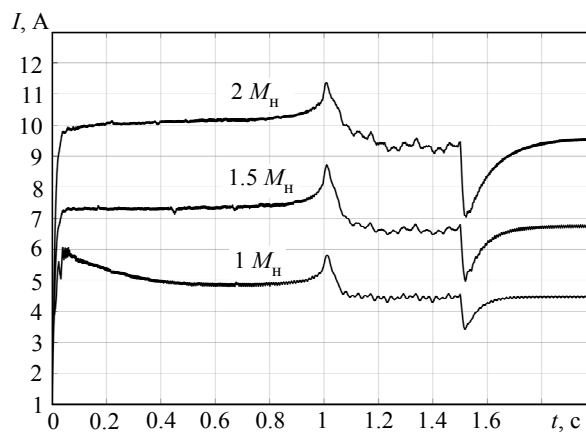


Рис. 5

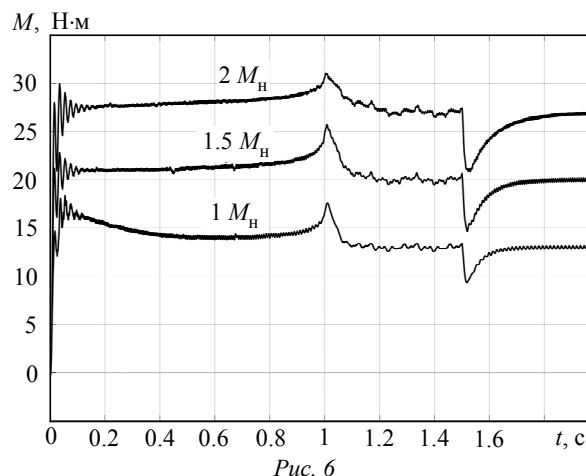


Рис. 6

На рис. 7 совмещены динамические механические характеристики по скорости и моменту, где в зоне 1 происходит разгон электропривода до точки установившейся работы, а в зоне 2 тормо-

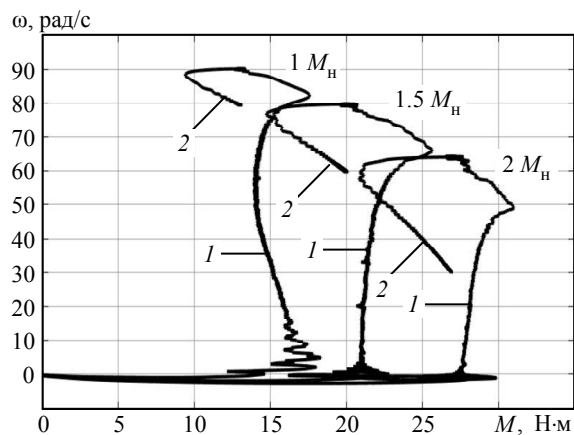


Рис. 7

жение с переходом на пониженную скорость при выходной частоте инвертора 100 Гц.

Проанализировав полученные результаты, можно отметить, что данная система электропривода обладает следующими преимуществами:

- система способна обеспечить плавный пуск электродвигателя под нагрузкой и характеризуется простотой и надежностью, так как регулируется один параметр: частота тока на выходе инвертора. Следует учитывать то, что в зависимости от значения статического момента изменяется верхний предел задания частоты;

- индукционное сопротивление имеет меньшие габариты по сравнению с классическим активным сопротивлением, что является преимуществом перед системами электропривода с широтно-импульсным коммутатором в звене постоянного тока;

- возможно глубокое регулирование скорости вниз от основной, однако данный режим работы сопровождается потерями в виде тепловой энергии, выделяющейся на индукционном сопротивлении;

- отсутствуют перенапряжения в роторной цепи.

В дальнейшем авторы планируют перейти от трехфазного инвертора к однофазному, что позволит уменьшить массогабаритные показатели установки и коммутационные потери на силовых элементах.

Предлагаемая система электропривода может применяться при проведении модернизации электроприводов на базе асинхронных электродвигателей с фазным ротором.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boldea I., Moldovan A., Tutelea L. Scalar V/f and I-f control of AC motor drives: An overview // 2015 Intl Aegean Conf. on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conf. on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION). Side, 2015. P. 8–17.

2. 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 // 8<sup>th</sup> Intern. Power Electronics and Motion Control Conf. Hefe, 2016. P. 1362–1368.

3. Peña J. M., Díaz E. V. Implementation of V/f scalar control for speed regulation of a three-phase induction motor. Arequipa: ANDESCON, 2016. P. 1–4.

4. Схемы импульсно-векторного управления электроприводом переменного тока / А. В. Валов, Т. А. Функ, А. М. Журавлев, Н. Ю. Сидоренко // Электротехника. 2014. № 10. С. 27–29.

5. Усынин Ю. С., Валов А. В. Импульсное управление асинхронным двигателем с фазным ротором // Вестн. южно-уральского государственного ун-та. Сер.: Энергетика. 2007. № 8. С. 24–26.

6. Lesan S., Smiai M. S., Shepherd W. Control of wound rotor induction motor using thyristors in the secondary circuits // Industry Applications Society Annual Meeting. 1996. Vol. 32, № 2. P. 335–344.

7. Basu P. R. A Variable speed induction motor using thyristors in the secondary circuit // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1971. Vol. PAS-90, № 2. P. 509–514.

8. On the speed control of wound-rotor induction motors using rotor impedance control / M. Ayyadurai, B. P. Singh, C. S. Jha, R. Arockiasamy // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1979. Vol. PAS-98, № 5. P. 1489–1496.

9. Shepherd W., Slemon G. R. Rotor impedance control of the wound-rotor induction motor // Trans. of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems. 1959. Vol. 78, № 3. P. 807–814.

10. Мещеряков В. Н., Финеев А. А. Система асинхронного электропривода с частотно-параметрическим управлением для крановых механизмов // Промышленная энергетика. 2004. № 6. С. 32–33.

11. Финеев А. А. Системы асинхронного электропривода с частотно-параметрическим управлением:

дис. ... канд. техн. наук / Липецкий гос. техн. ун-т. Липецк, 2004. 135 с.

12. Муравьев А. А., Бойков А. И. Системы управления асинхронной машиной с фазным ротором с вентильными преобразователями в цепи ротора // Материалы XII междунар. науч.-практ. конф.: Современные сложные системы управления / Липецкий гос. техн. ун-т. Липецк, 2017. С. 159–163.

13. Мещеряков В. Н., Копяев Ю. П., Ласточкин Д. В. Анализ инверторов тока и напряжения с системами реального управления // Вестн. вузов Черноземья. 2016. № 2. С. 13–18.

14. 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.

15. Власов В. Г., Иванов В. Л., Тимофеева Л. И. Взрывозащищенный тиристорный электропривод переменного тока. М.: Энергия, 1977. 160 с.

16. Мещеряков В. Н. Расчет статических характеристик асинхронного электродвигателя с нелинейным индукционным сопротивлением в цепи ротора // Техн. электродинамика. 1991. № 2. С. 81–83.

17. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л. Асинхронно вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: Энергия, 1979. 200 с.

18. Parameter estimation of wound-rotor induction motors from transient measurements / H. Kojoooyan-Jafari, L. Monjo, F. Corrales, J. Pedra // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2014. Vol. 10, № 2. P. 300–308.

19. Плеханов М. С. Модель асинхронного электродвигателя с массивным ферромагнитным ротором в режиме минимального скольжения // Сб. науч. тр. IV Всерос. молод. форума с междунар. участием: Инженерия для освоения космоса. Томск: Изд-во Нац. иссл. Томского политех. ун-та, 2016. С. 66–70.

20. Терехин В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (MatLab 7.0.1). Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2010. 292 с.

---

V. N. Meshcheryakov, A. I. Boikov, V. V. Pikalov, A. A. Muravyev, D. V. Lastochkin  
*Lipetsk State Technical University «LSTU»*

## THE ELECTRIC DRIVE ON THE BASIS OF THE INDUCTION MACHINE WITH AN INDUCTION RESISTANCE IN THE ROTOR CIRCUIT CONNECTED THROUGH VALVE ELEMENTS

*The relevance of the research is based on the intensive development of controlled AC drive, in which composition frequency-regulated induction motors with a squirrel-cage rotor (AD with SCR) and induction motors with a wound rotor (AD with WR) used for the lifting and transport mechanisms find their application field. At the stage of the modernization of the electric drive with the extension of the speed regulation range, the AD with WR is not replaced on an AD with SCR, then the winding of the rotor is short-circuited, and the stator winding is fed from a frequency converter (FC). However, the frequency converter generates a non-sinusoidal voltage on the stator, leading to the appearance of high-order harmonics, which negatively affects the service life of the AD with WR, designed for power supply from the industrial network. Therefore, the task of improving the systems of an adjustable electric drive based on an electric motor with a phase rotor in the direction of creating hybrid systems of frequency-parametric control is relevant. In work development of new electric drive systems based on an induction motors with a phase rotor having improved performance by introducing new circuit solutions and control algorithms that provide motor control via the rotor circuit. Research results: the principle of operation of the induction resistance, introduced into the rotor circuit through a frequency converter, changing its parameters depending on the frequency of the current flowing through it, is described. A method for controlling the speed of the electric motor, which consists in a smooth change of the additional inductive-active resistance introduced into the rotor circuit connected to the rotor through a frequency converter, is proposed. The technique reduce to the rotor winding resistance and induction resistance to the DC link is applied. The efficiency test of the proposed electric drive system in the software package MatLab Simulink through the method of mathematical modelling, is performed. On the basis of computer simulation mechanical and power characteristics of the described electric drive system were obtained. On the grounds of the data obtained as a result of modelling the properties of the electric drive system are studied.*

**Asynchronous motor, phase rotor, parametric controller, inductive resistance, frequency converter, autonomous voltage inverter, software package MATLAB Simulink**

---