

УДК 62-83

Моделирование режимов внутренней рекуперации энергии в асинхронном электроприводе

А.Н. Андреев, Е.В. Несговоров, Д.А. Колесниченко, Т.В. Королев

ФГБОУВПО «Вологодский государственный технический университет», г. Вологда, Российская Федерация
E-mail: aanccs@mail.ru, e.nesg@mail.ru, dimakolesnichenko@gmail.com, t333@bk.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В известных источниках генераторный режим работы в системе «асинхронный двигатель – преобразователь частоты» раскрыт в редуцированном виде, а именно: дается описание статического режима, в то время как режимы торможения со сменой направления потоков энергии и поддержание возбуждения асинхронной машины как генератора практически не рассмотрены. Поэтому вопросы моделирования динамических режимов асинхронного электропривода, а так же проблемы, связанные с рекуперацией энергии в процессе торможения, являются на сегодняшний день весьма актуальными.

Материалы и методы: Модель асинхронной машины построена на базе общепринятой двухфазной модели асинхронного двигателя с введением нелинейности в виде кривой намагничивания, полученной экспериментальным путем.

Результаты: Приведены уточненные математические модели асинхронного двигателя с учетом кривой намагничивания и асинхронного привода в целом, полученные в ходе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований на физической модели результаты показали, что реализованная модель с высокой точностью описывает динамические процессы генераторных режимов асинхронного электропривода в режиме внутренней рекуперации.

Выводы: Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований на физической модели показали, что реализованная модель с высокой точностью описывает динамические процессы генераторных режимов асинхронного электропривода. Доказано, что для описания генераторных режимов асинхронного электропривода возможно использование базовой уточненной двухфазной модели. Теоретически и практически доказана возможность применения внутренней рекуперации в асинхронном электроприводе при решении задач повышения энергоэффективности.

Ключевые слова: асинхронная машина, асинхронный частотно-регулируемый электропривод, внутренняя рекуперация.

Computer simulation of internal energy recovery modes in asynchronous electric drive

A.N. Andreev, E.V. Nesgovorov, D.A. Kolesnichenko, T.V. Korolev

Vologda State Technical University, Vologda, Russian Federation
E-mail: aanccs@mail.ru, e.nesg@mail.ru, dimakolesnichenko@gmail.com, t333@bk.ru

Abstract

Background: The known literature sources only partially describe the generating modes of the system "asynchronous motor - inverter" covering the static mode and not touching upon the braking mode accompanied by a change in the energy flow direction and maintaining excitation of the asynchronous machine as a generator. Therefore, the problems of simulating dynamic modes of induction electric drives as well as those connected with energy recovery caused by friction are quite urgent nowadays.

Materials and methods: The induction machine model is based on the standard two-phase induction motor model with the introduction of non-linearity in the form of a magnetization curve obtained experimentally.

Results: The paper contains asynchronous motor verified mathematical models taking into account the magnetization curve and the asynchronous drive as a whole. The results obtained in the computer modeling and experimental studies on the physical model show that the built model describes the dynamic processes in the asynchronous electric drive in the internal recovery mode quite precisely.

Conclusions: The results of computer simulation and experimental research on the physical model have showed that the model accurately describes the dynamic processes in the generator mode of the asynchronous electric drive. It has been proved that it is possible to use the improved basic two-phase model to describe the generator modes of the asynchronous electric drive. It was also proved theoretically and practically that it is possible to use internal energy recovery in the asynchronous electric drive to solve energy efficiency problems.

Key words: asynchronous machine, frequency-controlled asynchronous electric drive, internal energy recovery.

Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода в приложениях, где он ранее практически не применялся, основывает-

ся на современных достижениях в области силовой электроники и микропроцессорной техники. Использование такого электропривода при-

водит к улучшению эксплуатационных, энергетических и точностных характеристик, а также к повышению надежности и безопасности. По сравнению с нерегулируемыми электроприводами переменного тока, частотно-регулируемый привод обеспечивает экономию электроэнергии при использовании рациональных алгоритмов управления технологическими процессами.

В контексте текущих тенденций инновационного развития современной России в области энергоэффективности и энергосбережения актуальной становится задача модернизации существующих типов электроприводов для отдельных классов механизмов, где это представляется наиболее возможным и менее затратным с точки зрения реализации. Для механизмов со значительными приведенными к валу двигателя моментами инерции, механизмов с активным моментом и режимами работы с большим количеством ускорений и замедлений, таких как: транспортные средства (троллейбусы, автомобили); подъемно-транспортные механизмы (лифты, краны, лебедки); кузнечно-прессовое оборудование и др., – существуют режимы работы, в которых асинхронная машина переходит в генераторный режим, что сопровождается преобразованием механической или потенциальной энергии в электрическую с последующим рассеянием на тормозных резисторах.

Увеличение эффективности этого класса агрегатов возможно путем рекуперации энергии в сеть [2]. Этот способ связан с рядом трудностей. Основными из них для перечисленных механизмов являются автономность либо работа в закрытых «сетях», которые не допускают возврат энергии. Альтернативой в данном случае может стать внутренняя рекуперация энергии, под которой понимается локальное преобразование и последующее накопление энергии механизма. Режим внутренней рекуперации потенциально возможен при торможении транспортных средств или спуске груза, в первом случае это преобразование кинетической энергии, во втором – потенциальной в электрическую энергию внутреннего накопителя (конденсатора), подключаемого в звено постоянного тока преобразователя частоты. Таким образом, предлагаемый подход к повышению энергоэффективности связан с минимальными затратами, состоящими в увеличении емкости конденсатора, используемого в звене постоянного тока, и в изменении закона управления или алгоритма модуляции в генераторных режимах работы электрической машины. Величина емкости накопителя определяется величиной накапливаемой кинетической или потенциальной энергии конкретного механизма с учетом коэффициента эффективности внутренней рекуперации.

В силу вышесказанного этот подход представляется достаточно эффективным для пе-

речисленных выше объектов (транспорт, грузоподъемное оборудование и др.).

Для подтверждения эффективности предлагаемого способа была разработана математическая модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода для генераторных режимов работы.

Так как классическая двухфазная модель асинхронной машины в ряде случаев при моделировании генераторных режимов работы ведет себя неадекватно либо просто не работает, была использована уточненная модель, учитывающая кривую намагничивания машины [3].

Ниже представлена система уравнений в двухфазной неподвижной относительно статора системе координат, выраженная через токи статора и потокосцепления ротора и дополненная кривой намагничивания машины:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + \sigma(\psi_\mu) L_1(\psi_\mu) \frac{d}{dt} i_1 + R_2 \frac{(L_\mu(\psi_\mu))^2}{L_2(\psi_\mu)^2} i_1 - \\ - R_2 \frac{L_\mu(\psi_\mu)}{L_2(\psi_\mu)^2} \psi_2 + \frac{L_\mu(\psi_\mu)}{L_2(\psi_\mu)} j \omega \psi_2, \\ 0 = \frac{R_2}{L_2(\psi_\mu)} \psi_2 - \frac{R_2 L_\mu(\psi_\mu)}{L_2(\psi_\mu)} i_1 + \frac{d}{dt} \psi_2 - j \omega \psi_2, \\ M_{эм} - M_c = J \frac{d}{dt} \omega; \\ \psi_\mu = \frac{L_{\sigma 2} i_1 + \psi_2}{1 + \frac{L_{\sigma 2}}{L_\mu(\psi_\mu)}}; \\ \psi_1 = L_{\sigma 1} i_1 + \psi_\mu; \\ \sigma(\psi_\mu) = 1 - \frac{L_\mu(\psi_\mu)^2}{L_1(\psi_\mu) L_2(\psi_\mu)}; \\ M_{эм} = \frac{3}{2} p_\tau \frac{L_\mu(\psi_\mu)}{L_2(\psi_\mu)} \operatorname{Im}(\bar{\Psi}_2^* \cdot \bar{i}_1), \end{cases} \quad (1)$$

где индекс «*» соответствует сопряженному комплексному числу.

При этом принят ряд допущений, а именно:

- статор и ротор имеют симметричные обмотки;
- воздушный зазор является одинаковым по всей длине окружности магнитной системы;
- отсутствуют токи нулевой последовательности;
- отсутствует гистерезис;
- индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора постоянны и не зависят от основного магнитного потока машины.

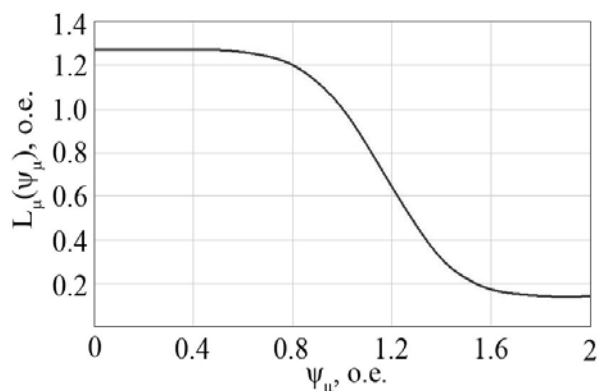


Рис. 1. Экспериментальная зависимость индуктивности намагничивания от потока сцепления намагничивания (относительные единицы) для асинхронной машины WD100LR

Для нахождения кривой намагничивания исследуемой машины, параметры которой приведены в табл. 1, согласно [3] проведены экспериментальные исследования, в которых снята зависимость $i_{\mu}(\psi_{\mu})$. Полученная функция аппроксимирована сплайнами третьего порядка и трансформирована в зависимость $L_{\mu}(\psi_{\mu})$, изображенную на рис. 1.

В предположении, что магнитный поток машины не может измениться мгновенно на выбранном достаточно малом временном шаге интегрирования, можно считать «запаздывание» расчета индуктивности намагничивания от потока сцепления намагничивания допустимым и не влияющим на качественные и количественные результаты компьютерного моделирования.

Таблица 1. Параметры исследуемой машины

Тип машины	WD100LR
R_1	2,483 (Ом)
R_2	1,631 (Ом)
$L_{\sigma 1}$	0,008 (Гн)
$L_{\sigma 2}$	0,013 (Гн)
L_{μ}	0,231 (Гн)
J	$8,7 \cdot 10^{-3}$ (кг·м ²)
P	2

Далее в среде графического моделирования [4] базовая модель асинхронной машины трансформируется согласно системе уравнений (1), с учетом снятой ранее кривой намагничивания. На рис. 2 приведена схема блока, отвечающего за расчет индуктивности намагничивания как функции потока сцепления намагничивания.

На основе анализа алгоритмов управления преобразователя частоты, на базе которого строится в дальнейшем экспериментальная установка, в графической модели создается система управления с алгоритмами векторной (симплексной) модуляции с возможностью *U/f*-регулирувания или IR-компенсации.

При разработке модели системы управления асинхронного электропривода, адекватной реальной системе, в соответствии с заданной частотой формируется эквивалентный вектор напряжения, по которому определяется текущий сектор [5]. По номеру сектора определяется направление обхода – по часовой или против часовой стрелки, чем обеспечивается сокращение количества коммутаций ключей. По амплитуде и углу эквивалентного вектора напряжения определяются необходимые временные интервалы работы транзисторных вентилялей в тех или иных состояниях. Времена определяются, согласно [5], следующим образом:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{U_{зад}}{U_{эп}} \sin(\theta^> - \theta_u), \\ t_2 = \frac{U_{зад}}{U_{эп}} \sin(\theta_u - \theta^<), \\ t_0 = 1 - t_1 - t_2, \\ U_{эп} = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (2)$$

Для ограничения величины токов в переходных процессах реализован задатчик интенсивности сигнала частоты.

Внешний вид модели системы управления представлен на рис. 3. Графическая модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода представлена на рис. 4.

Результаты компьютерного моделирования режимов торможения частотно-регулируемого асинхронного электропривода представлены на рис. 5. Полученная зависимость наглядно демонстрирует рост величины напряжения в звене постоянного тока во время снижения частоты инвертора, что свидетельствует о преобразовании механической энергии в электрическую и ее накоплении в конденсаторе.

Для сравнения различных режимов торможения и оценки эффективности преобразования и накопления энергии введено понятие коэффициента возврата энергии.

Коэффициент возврата энергии – количественная оценка, показывающая, насколько эффективно энергия, накопленная в механизме, преобразуется в электрическую энергию накопителя при внутренней рекуперации; находится как отношение изменения электрической энергии к изменению энергии механизма:

$$K_{возв} = \frac{\Delta W_{эл}}{\Delta W_{мех}} = \frac{\frac{C}{2} |U_2^2 - U_1^2|}{\frac{J}{2} |\omega_2^2 - \omega_1^2|}. \quad (3)$$

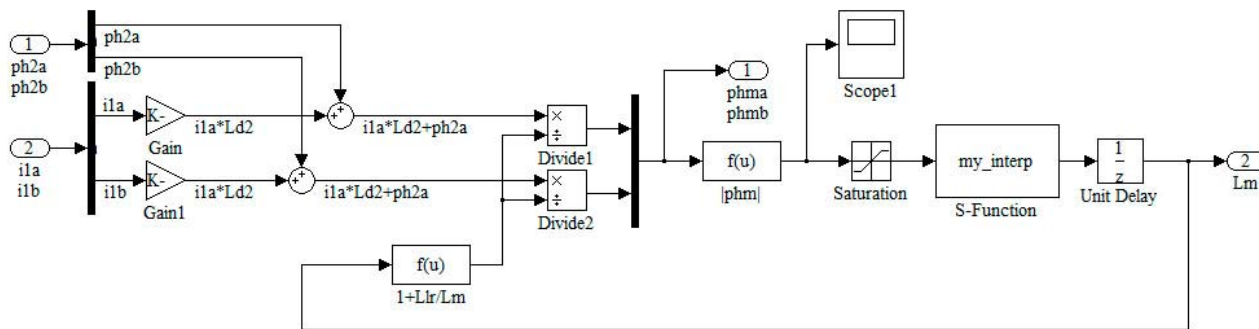


Рис. 2. Схема блока расчета потокосцепления намагничивания и индуктивности намагничивания для асинхронной машины

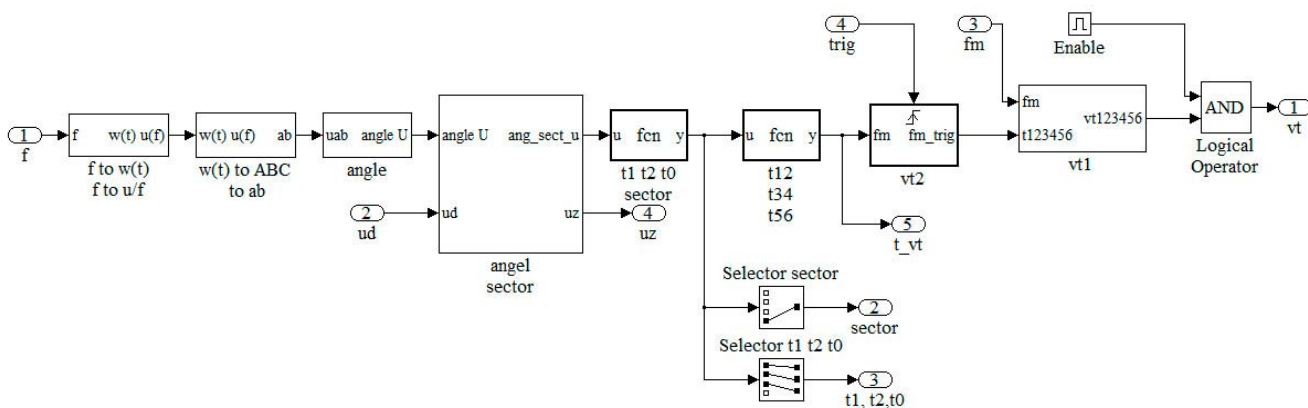


Рис. 3. Общий вид модели системы управления, реализующей симплексные алгоритмы модуляции

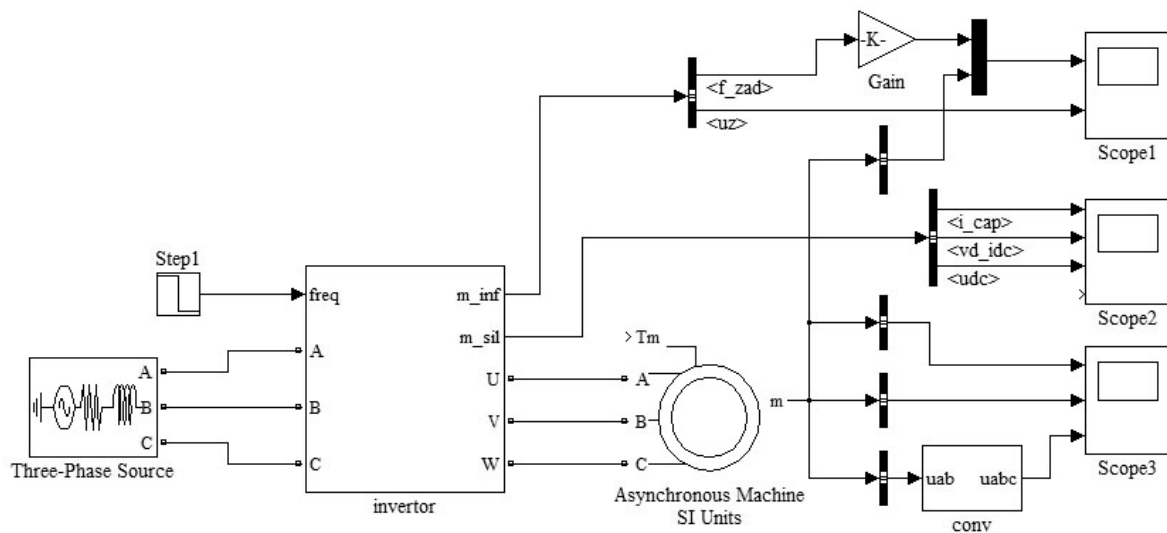


Рис. 4. Общий вид модели асинхронного электропривода

Таблица 2. Параметры измерительного комплекса

Тип	Описание	Основные параметры	Метрологические характеристики
LEM LA-100	датчик тока	$I = \pm 100 \text{ A}, f \leq 100 \text{ кГц}$	Точность преобразования - $\pm 0,45\%$; Нелинейность - $< 0,15 \%$
LEM LV-25p	датчик напряжения	$U = \pm 1000 \text{ В}, f \leq 20 \text{ кГц}$	Точность преобразования - $\pm 0,8\%$; Нелинейность - $< 0,2 \%$
Lcard L783M	система сбора данных	$f_{\text{дискр}} = 3 \text{ МГц}$	Основная приведенная погрешность - 1%

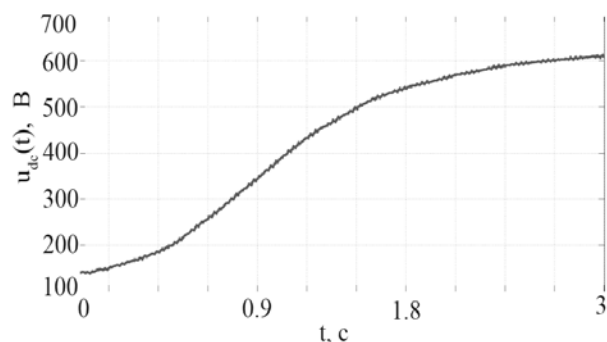


Рис. 5. Кривая среднеквадратичного значения напряжения звена постоянного тока преобразователя частоты при переходе с 50 Гц на 30 Гц, полученная в результате компьютерного моделирования

Для подтверждения результатов математического моделирования в лаборатории кафедры Управляющих и вычислительных систем ВоГТУ создан экспериментальный стенд на основе общепромышленного преобразователя частоты фирмы Omron. В установке предусмотрена возможность изменения емкости конденсатора и отключение датчика, измеряющего величину напряжения звена постоянного тока преобразователя, по которому в случае превышения порогового значения происходит отключение преобразователя. Функциональная схема установки представлена на рис. 6, а ее внешний вид на рис. 7.

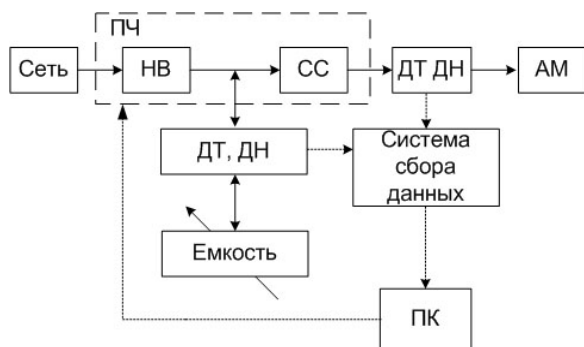


Рис. 6. Функциональная схема экспериментальной установки: ПЧ – преобразователь частоты; НВ – неуправляемый выпрямитель; СС – силовая сборка транзисторов; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; АМ – асинхронная машина; ПК – персональный компьютер; Емкость – сборка конденсаторов с возможностью регулирования величины емкости



Рис. 7. Внешний вид экспериментальной установки

Для измерения электрических величин токов фаз и тока накопителя и аналогичных величин напряжения использованы датчики фирмы Lem на основе эффекта Холла с расширенным частотным диапазоном измерения и повышенной точностью. Для сбора и передачи информации в персональный компьютер использована универсальная плата ввода-вывода фирмы Lcard. Параметры измерительных устройств и их метрологические характеристики с кратким пояснением сведены в табл. 2. Относительная погрешность канала тока составляет $\pm 1,9\%$, канала напряжения – $\pm 2,3\%$, чем гарантируется достоверность последующих экспериментальных данных.

В ходе проведенных экспериментальных исследований были сняты зависимости токов и напряжений фаз машины и величина тока и напряжения звена постоянного тока преобразователя частоты. График последнего представлен на рис. 8. В ходе экспериментальных исследований максимальная величина коэффициента возврата составила 48 %, что значительным образом может увеличить эффективность для описанного класса механизмов.

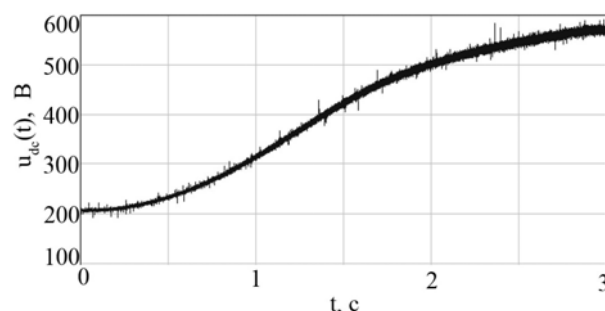


Рис. 8. Экспериментальная кривая среднеквадратичного значения напряжения звена постоянного тока преобразователя частоты при переходе с 50 Гц на 30 Гц

Заключение

Уточненная математическая модель асинхронной машины, учитывающая нелинейность кривой намагничивания, дает достаточно достоверные результаты, описывающие процесс внутренней рекуперации энергии в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе, что подтверждено экспериментальными исследованиями. В ходе эксперимента подтверждена возможность реализации предложенного метода снижения энергозатрат за счет системы рекуперации, а также показана его эффективность.

Список литературы

1. Андреев А.Н., Колесниченко Д.А. Внутренняя рекуперация в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // Труды VII Междунар. (VIII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводе / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – С. 265–268.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для студентов высш. учеб. заведений. – 2-е изд., испр. – М.: Изд. центр «Академия», 2007. – 272 с.

3. **Андреев А.Н., Несговоров Е.В., Колесниченко Д.А.** Исследование расчетной модели самовозбуждения асинхронной машины // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 51–54.

4. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems, Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

5. **Шрейнер Р.Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

References

1. Andreev, A.N., Kolesnichenko, D.A. Vnutrennyaya rekuperatsiya v chastotno-reguliruemom asinkhronnom elektroprivode [Internal energy recovery in frequency-controlled asynchronous electric drives]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (VIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Collected Works of the VIIth International

(VIIIth All-Russian) Scientific and Practical Conference on Automated Electric Drives]. Ivanovo, 2012, pp. 265–268.

2. Sokolovskiy, G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC drives with frequency regulation]. Moscow, Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 1982. 272 p.

3. Andreev, A.N., Nesgovorov, E.V., Kolesnichenko, D.A. Issledovanie raschetnoy modeli samovozbuzhdeniya asinkhronnoy mashiny [Studying of the self-excitation theoretical model of the asynchronous machine]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 4, pp. 51–54.

4. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems, Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems, Simulink]. Moscow, DMK Press; Saint-Petersburg, Piter, 2008. 288 p.

5. Shreyner, R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives with solid state frequency converters]. Ekaterinburg, URO RAN, 2000. 654 p.

Андреев Александр Николаевич,

Вологодский государственный технический университет,
кандидат технических наук, доцент кафедры управляющих и вычислительных систем,
e-mail: aancs@mail.ru

Несговоров Евгений Валерьянович,

Вологодский государственный технический университет,
кандидат технических наук, доцент кафедры управляющих и вычислительных систем,
e-mail: e.nesg@mail.ru

Колесниченко Дмитрий Александрович,

Вологодский государственный технический университет,
аспирант кафедры управляющих и вычислительных систем,
e-mail: dimakolesnichenko@gmail.com

Королев Тимур Викторович,

Вологодский государственный технический университет,
старший преподаватель кафедры управляющих и вычислительных систем,
e-mail: t333@bk.ru