

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА****УДК 621. 314.522, 621.316.717****ВЛИЯНИЕ УСТРОЙСТВ ПЛАВНОГО ПУСКА АСИНХРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА РАБОТУ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ****INFLUENCE SOFT STARTER ASYNCHRONOUS MOTORS  
EMPLOYMENT POWER SUPPLY SYSTEMS**

**Соколов Игорь Александрович.**  
 канд.техн.наук, доцент, e-mail: [skelvin@mail.ru](mailto:skelvin@mail.ru)  
**Sokolov I.A.**  
 C.Sc. (Engineering), Associate Professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Российская Федерация  
 T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Аннотация:** Актуальность работы: Проблемы, связанные с прямым включением в сеть асинхронных электродвигателей (АД) с короткозамкнутым ротором, широко освещены, а негативные последствия прямого включения настолько серьёзны, что на сегодняшний день существуют множество устройств, предназначенных для решения этой проблемы. Для нерегулируемых электроприводов наибольшее распространение получили устройства, называемые Soft Starter, устройства плавного пуска (УПП), а также устройства безударного пуска (УБП), которые позволяют изменять величину питающего напряжения электродвигателя. Однако и эти устройства не лишены недостатков. Основным источником проблем является влияние работы силовых полупроводниковых ключей на характер изменения напряжения и тока в силовой кабельной сети, а через неё и на работу других потребителей, находящихся в той же системе электроснабжения. Таким образом, задача оценки возможного негативного влияния устройства плавного пуска на работу соседних потребителей, находящихся в той же системе электроснабжения, является актуальной.

Цель работы: Прогноз и анализ динамических процессов, протекающих в АД, находящихся в единой системе электроснабжения для режимов последовательного запуска АД. Сопоставление динамики (механических и электрической составляющих) двух технологий запуска АД: прямого включения в сеть и включение через УПП.

Методы исследований: Основаны на использовании математических моделей: электромеханической системы 3-х фазного АД, протяжённой разветвленной кабельной сети и УПП. Имитационные модели реализованы средствами MatLab (SimuLink).

Результаты: Продемонстрированы главные отличия двух технологий запуска АД и приведен сравнительный анализ их влияния на соседних потребителей, находящихся с ними в единой системе электроснабжения.

**Abstract:** The urgency of the discussed issue: The issues of direct power connection mode the squirrel-cage induction motors covered extensively, and the negative effects of direct connection is so serious, that there are many devices today, intended to solve this problem. For non-controlled asynchronous electric drives the most widely used devices called Soft Starter and unstressed start device, which allow to change the value of the supply voltage of induction motor. However, these devices are not without disadvantages. The main source of problems is the impact of the work of power semiconductor switches on the character of change of voltage and current in the power cabling, and through it to the work of other consumers in the same power supply system. So the issue, of evaluating soft starter possible negative impact to the work of other consumers in the same power supply system, is actual

The main aim of the study: Forecast and analysis of dynamic processes, occurring in the induction motors in the same power supply system for induction motors sequential start modes. A comparison of the dynamics (mechanical and electrical components) of the two induction motor start technologies: direct power connection mode and connection with soft starter.

The methods used in the study: Based on the use of a mathematical model of electromechanical system 3-phase IM, extended branched cable network and soft starter. Simulation models are implemented by means of MatLab (SimuLink).

*The results: Demonstrate the main differences between the two tech start-up of induction motors and comparative analysis of their impact to the work of other consumers in the same power supply system.*

**Ключевые слова:** 3-х фазный асинхронный электродвигатель, режим пуска, устройство плавного пуска, взаимное влияние через систему электроснабжения.

**Keywords:** 3-phase asynchronous motor, start mode, the soft starter, mutual influence through the power supply system.

**Введение.** Проблема пуска асинхронных электродвигателей (АД) с короткозамкнутым ротором путем прямого включения его в сеть общеизвестна. Для решения этой проблемы широко используются устройства с названием Soft Starter или устройства плавного пуска (УПП).

Принцип действия УПП, его математическая модель, а также имитационные модели электропривода, включающего в себя: тиристорный регулятор напряжения, 3-х фазный асинхронный электродвигатель (корректно работающий в условиях несимметричного питающего напряжения), а также нагрузочный момент сопротивления в виде вентиляторной нагрузке подробно описаны и снабжены исчерпывающим иллюстративным материалом в работе Ещина Е.К. [1].

Для прогноза и анализа инструментальными средствами системы динамического моделирования MatLab (SimuLink) построим имитационную модель типовой схемы электроснабжения с несколькими активными потребителями электроэнергии. Для чистоты эксперимента и максимально корректного сравнения двух технологий пуска сделаем все АД участвующие в вычислительном эксперименте одинаковыми (АД ВРП160М4 мощностью 30 кВт с параметрами  $R_{sa}$ ,  $R_{sb}$ ,  $R_{sc}=0.516$  Ом;  $R_{ra}$ ,  $R_{rb}$ ,  $R_{rc}=0.406$  Ом;  $X_{sa}$ ,  $X_{sb}$ ,  $X_{sc}=1.419$  Ом;  $X_{ras}$ ,  $X_{rb}$ ,  $X_{rc}=1.109$  Ом;  $X_m=35.0$  Ом;  $p=2$ ;  $GD^2=0.7$  кГм<sup>2</sup>). Длины сегментов разветвленной кабельной сети, активное, индуктивное и емкостное сопротивление, также сделаем одинаковыми ( $L_k=0.3$  км;

$R_k=0.382$  Ом;  $X_k=0.0735$  Ом;  $C_k=0.1$  мкФ/км). Укрупненная S- модель представлена на рисунке 1.

Модель строилась таким образом, чтобы группируемые типовые модули в блоки SubSystem были максимально приближенны, по внешнему виду, к принципиальной электрической схеме типовой системы электроснабжения.

Из схемы на рисунке 1 видно, что АД AD\_1 подключен к питающей сети через УПП, а остальные электродвигатели AD\_2, AD3 и AD\_4 подключены через обычные пусковые устройства (ПУ) (Starter 1 – Starter 4). При этом ПУ в этой имитационной модели являются идеальными переключателями (см. рисунок 2), то есть в них не отражены такие явления как неодновременность замыкания фаз, «отскок контакта», электрическая дуга и прочие физические явления присущие реальному коммутирующему устройству, подключающему АД в силовую цепь.

Суть моделируемого эксперимента состоит в последовательном запуске АД в следующие моменты времени: AD\_2 запускается через 0,05 сек с момента начала вычислительного эксперимента (неодновременный запуск модели и первого двигателя позволяет увидеть на рисунке 4 «просадку» напряжения в процессе пуска AD\_2), запуск двигателя происходит по технологии «прямое включение в сеть» (Direct On Line - DOL). AD\_3 запускается через 0,25 сек с момента начала

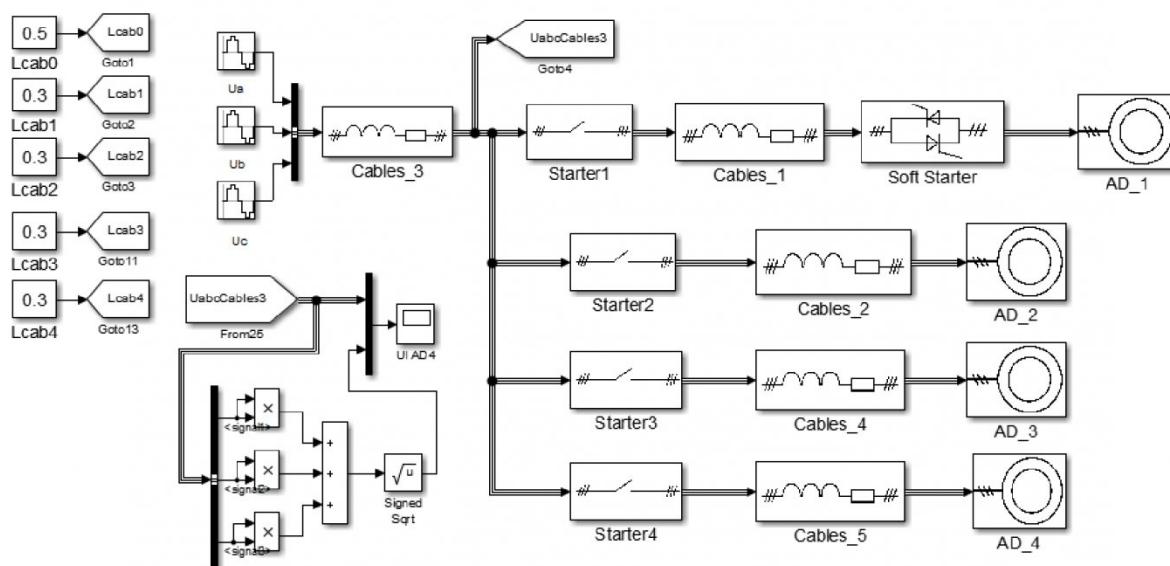


Рис. 1. Модель разветвленной системы электроснабжения построенной средствами SimuLink.

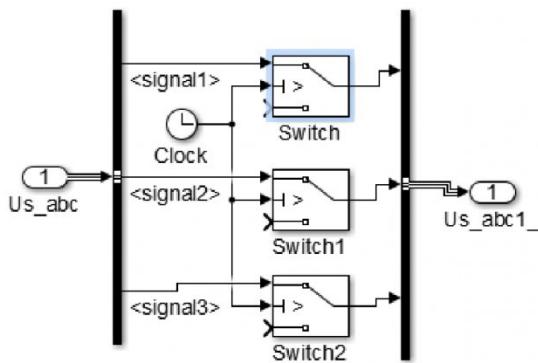


Рис. 2. Модель пускателя Starter 1 - 4

вычислительного эксперимента и запуск двигателя происходит также по технологии DOL, затем запускается AD\_1 через 0,45сек с момента начала вычислительного эксперимента, запуск двигателя происходит по технологии «плавного пуска» (Soft Start –SS) и последним запускается AD\_4 через 0,6 сек с момента начала вычислительного эксперимента и запуск двигателя происходит также по технологии DOL.

Поскольку все АД находятся в единой системе электроснабжения, то есть присутствует общий участок кабельной сети (в этой конкретной модели Cables\_3), то все двигатели во время своей ра-

боты, а особенно во время пуска будут оказывать значительное влияние на всю систему электроснабжения и работу соседних АД поскольку они соизмеримы по мощности.

Продемонстрировать и проанализировать это влияние, оценить степень негативного воздействия на соседних потребителей, двух различных технологий запуска АД, основная цель этой работы.

На рисунке 3 отражены динамические изменения значений электромагнитных моментов всех АД, участвующих в вычислительном эксперименте.

Механические компоненты привода, как видно из рисунка 3, при пуске по технологии DOL испытывают крайне негативные воздействие: значительные колебания момента с амплитудой, превышающей номинальное значение электромагнитного момента в несколько раз. Видно значительное влияние двигателя, находящегося в режиме пуска на характер изменения электромагнитного момента двигателя, почти завершившего пуск. В этом вычислительном эксперименте это запуск AD\_3, на разгоняющийся AD\_2 этот эпизод эксперимента выделен штриховой пунктирной линией.

На рисунке 4 можно увидеть в том же временном диапазоне изменение питающего напряжения (мгновенные значения в каждой фазе и амплитудное значение вектора напряжения).

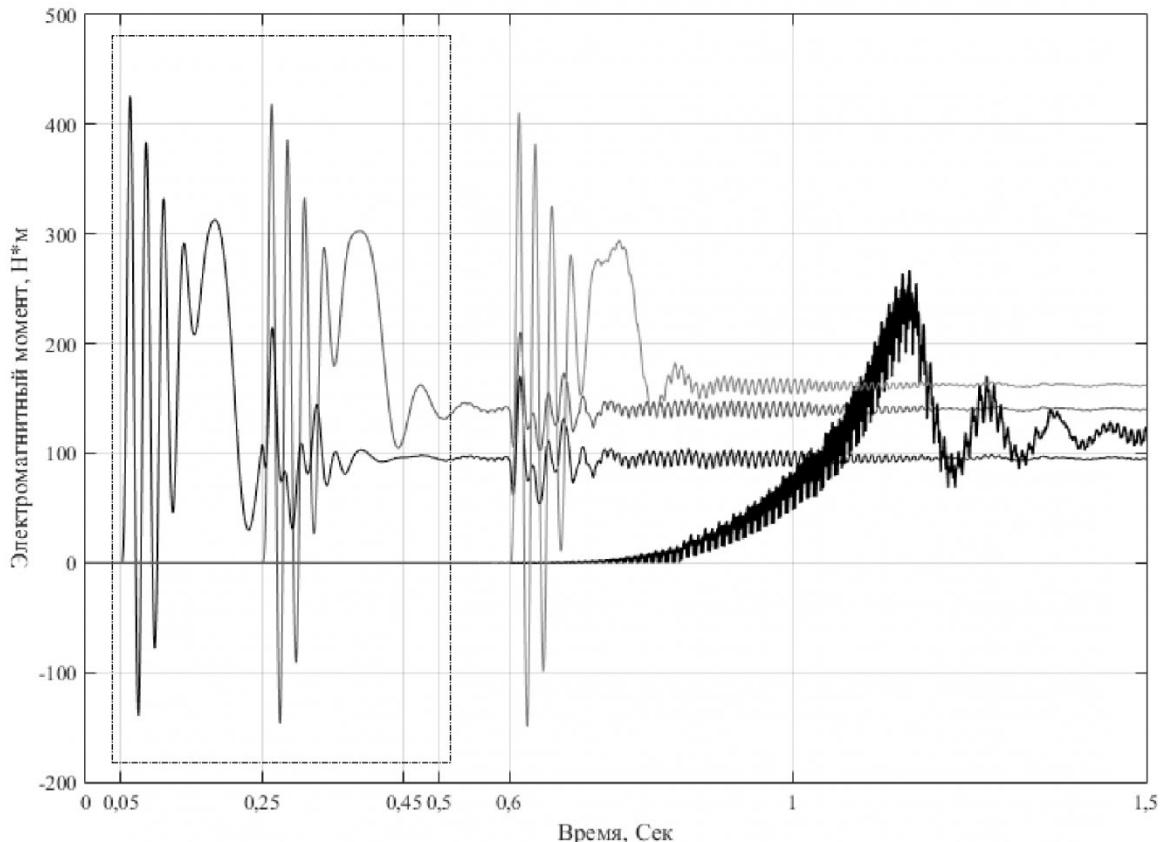


Рис. 3. Диаграммы электромагнитных моментов AD\_1 – AD\_4.

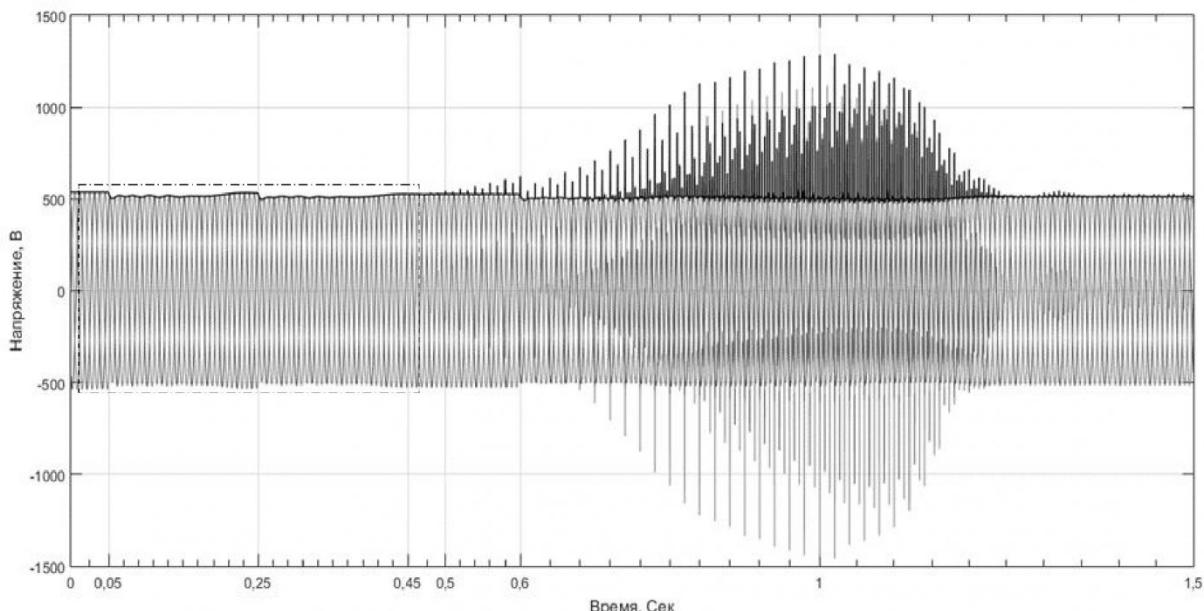


Рис. 4. Диаграммы мгновенных значений напряжений  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  и амплитудное значение вектора напряжения

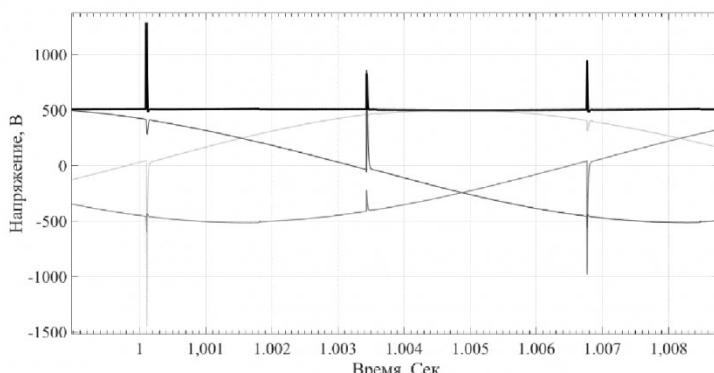


Рис. 5. Перенапряжения в общем участке кабельной сети Cables\_3 (мгновенных значений напряжений  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  и амплитудное значение вектора напряжения)

Как видно, амплитудные значения пиков перенапряжений составляют почти трехкратное превышение номинального значения амплитуды питающего напряжения, а частота возникающих перенапряжений - 6 всплесков за период.

«Пачки» таких перенапряжений способна создать для изоляции всего комплекса системы электроснабжения значительную опасность повреждения(пробои) изоляции. В том числе и для изоляции других двигателей, находящихся в той же системе электроснабжения. Наиболее уязвимой частью с точки зрения пробоя изоляции являются лобовые части статорных обмоток АД из-за их относительной подвижности. Вероятность повреждения изоляции значительно повышается, причем следует отметить, что, если в общей системе электроснабжения происходит последовательный запуск нескольких АД, то самый неблагоприятный режим запуска окажется у AD\_4, поскольку он, находясь в режиме пуска по технологии «прямого подключения в сеть» имеет все негативные удар-

ные механические воздействия (см. электромагнитный момент на рисунке 3), опять же в первую очередь действующие на статорную обмотку и опять же локализацией негативного воздействия будет лобовая часть обмотки, незакрепленная в пазах и подверженная максимальному динамическому воздействию. Подобное наложение неблагоприятных воздействий может вызвать негативный синергетический эффект.

#### Выводы.

Общеизвестные негативные воздействия УПП (SoftStarter) необходимо рассматривать не только непосредственно на двигатель, запускаемый с помощью УПП, но и на весь комплекс устройств, находящихся в единой системе электроснабжения.

Несимметрия, вызываемая разрывами цепи питания в режиме плавного пуска АД, сопровождается появлением изменяющихся по амплитуде, форме и частоте (300 Гц) пульсаций величины электромагнитного момента электродвигателя,

негативно влияющая на работу соседних потребителей.

Негативные воздействия на электромеханический комплекс в ряде ситуаций не просто накладываются друг на друга, а способны вызвать от-

рицательный синергетический эффект, локализуясь в самом «тонком» месте системы, весьма в неудобном, сточки зрения ремонтопригодности, месте.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ещин Е.К. Моделирование несимметрии трехфазного асинхронного электродвигателя // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2015. №5. С.107-110..
2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. –М.-Л., Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
3. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. - М.: Высш. шк., 2001. - 327 с.
4. Терёхин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.
5. ALTISTART 46 Soft Start Controller User's Manual Instruction Bulletin VD0C32S301B June 1998 Raleigh, NC, USA
6. AuCom Electronics Limited 123 Wrights Road Christchurch, New Zealand. P.O.Box 21-245 Christchurch, New Zealand Phone: +64 3 338-8280 Fax: +64 3 338-8104 E-mail: [salessupport@aucom.co.nz](mailto:salessupport@aucom.co.nz) Internet: <http://www.aucom.co.nz>
7. Пустоветов М., Солтус К., Синявский И. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. LAP Lambert Academic Publishing, 2013, -209 р.
8. Тимошкин В.В. Разработка и исследование наблюдателей угловой скорости для асинхронных электроприводов по схеме ТРН-АД: дис...канд.техн.наук, Томск, НИ ТПУ, 2014.
9. Альтшулер М. Из под удара двигатель выводится устройством УПВБД / Альтшулер М., Шамис М., Матисон А. // Новости электротехники, 4(34) 2005 (<http://news.elteh.ru/arh/2005/34/46.php>)
10. Ansari, D. M. Deshpande. "Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink," Int. J. Eng. Sci. Technol., vol. 2, pp. 1260–1267, 2010.
11. M. H. Moradi and P. G. Khorasani, "A new Matlab simulation of induction motor," 2008 in Australas. Univ. Power Eng. Conf., 2008.
12. H. Sarhan, "Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor Drive," Energy and Power Engineering, vol. 03, no. 02. pp. 107–112, 2011.
13. Lakhya Jyoti Phukon, Neelanjana Baruah "A Generalized Matlab Simulink Model of a Three Phase Induction Motor" in International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (An ISO 3297: 2007 Certified Organization) Vol. 4, Issue 5, May 2015.
14. Manish Kumar Singh, Madhur Chauhan, Amit Kumar Singhal, Nitin Saxena "A Methodology to Develop A Simulink Model of Three Phase Induction Motor" in International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 4, Special Issue 1, February 2014.
15. Stanislav Rusnok, Pavel Sobota, Martin Slivka, Pavel Svoboda "Assessment Transients During Starting of Induction Motor in Matlab Simulink And Verification by Measurement" in Advanced Research in Scientific Areas 2012, International Virtual Conference, Section Electronics, Electrical Systems, Electrical Engineering, 2012, pp.1672-1676.
16. Sifat Shah, A. Rashid, MKL Bhatti "Direct Quadrature (D-Q) Modeling of 3-Phase Induction Motor Using MatLab / Simulink" in Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering Vol. 3, No. 5, May 2012, pp.237-243.
17. Saffet Ayasun and Chika O. Nwankpa "Induction Motor Tests Using MATLAB / Simulink and Their Integration In to Undergraduate Electric Machinery Courses" in IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 48, NO.1, FEBRUARY 2005, pp.37-46.
18. Munira Batool, Aftab Ahmad "Mathematical Modeling And Speed Torque Analysis Of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor Using Matlab Simulink For Electrical Machines Laboratory Mathematical Modeling And Speed Torque Analysis Of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor Using Matlab Simulink For Electrical Machines Laboratory" in International Electrical Engineering Journal (IEEJ) Vol. 4 (2013) No.1, pp. 880-889.
19. Mr. Punit L. Ratnani, Dr. A. G. Thosar "Mathematical Modelling of an 3 Phase Induction Motor Using MATLAB/Simulink" in International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER) Vol. 4 | Iss. 6| June. 2014, pp.62-67.
20. K. L.SHI, T. F.CHAN, Y.K.WONG and S. L. HO "Modelling And Simulation Of The Three-Phase Induction Motor Using Simulink" in Int. J. Elect. Engng. Educ., Vol. 36, pp. 163–172. Manchester U.P., 1999.
21. Mazouz Salahat, Omar Barbarawe, Mohammad AbuZalata, Shebel Asad "Modular Approach for Inves-

tigation of the Dynamic Behavior of Three-Phase Induction Machine at Variation Load” *in Engineering*, 2011, 3, 525-531 Published Online May 2011 (<http://www.scirp.org/journal/eng>).

22. Aleck W. Leedy “Simulink / MATLAB Dynamic Induction Motor Model for Use as A Teaching and Research Tool” *in International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)* ISSN: 2231-2307, Volume-3, Issue-4, September, 2013, pp.102-107

23. Ещин Е.К. О взаимности задач управления состоянием асинхронного электродвигателя // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2014. №2. С.107-110.

24. Однокопылов Г.И. Математическая модель асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы / Однокопылов Г.И., Брагин А.Д. // Известия Томского политехнического университета. Вып. №4, том 323. 2013. С.133-137.

## REFERENCES

1. Eshchin E.K. Modelirovanie nesimmetrii trekhfaznogo asinhronnogo ehlektrodvigatelya // Vestn. KuzGTU, 2015. #5 S.107-110.
2. Kovach K.P., Rats I. Perehodnyie protsessyi v mashinah peremennogo toka. -M.-L., Gosenergoizdat, 1963. 744 s.
3. Kopyilov I. P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin. -M.: Vyssh. shk., 2001. -327 s.
4. TerYohin V.B. Modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink (Matlab 7.0.1): uchebnoe posobie. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2010. – 292 s.
5. ALTISTART 46 Soft Start Controller User’s Manual Instruction Bulletin VD0C32S301B June 1998 Raleigh, NC, USA
6. AuCom Electronics Limited 123 Wrights Road Christchurch, New Zealand. P.O.Box 21-245 Christchurch, New Zealand Phone: +64 3 338-8280 Fax: +64 3 338-8104 E-mail: [salessupport@aucom.co.nz](mailto:salessupport@aucom.co.nz) Internet: <http://www.aucom.co.nz>
7. Pustovetov M., Soltus K., Sinyavskiy I. Kompyuternoe modelirovanie asinhronnyih dvigateley i transformatorov. LAP Lambert Academic Publishing, 2013, -209 p.
8. Timoshkin V.V. Razrabotka i issledovanie nablyudateley uglovoy skorosti dlya asinhronnyih elektroprivodov po sheme TRN-AD: dis...kand.tehn.nauk, Tomsk, NI TPU, 2014.
9. Altshuler M. Iz pod udara dvigatel vyivoditsya ustroystvom UPBVD / Altshuler M., Shamis M., Matison A. // Novosti elektrotehniki, 4(34) 2005 (<http://news.elteh.ru/arh/2005/34/46.php>)
10. Ansari, D. M. Deshpande. “Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink,” *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, pp. 1260–1267, 2010.
11. M. H. Moradi and P. G. Khorasani, “A new Matlab simulation of induction motor,” *2008 in Australas. Univ. Power Eng. Conf.*, 2008.
12. H. Sarhan, “Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor Drive,” *Energy and Power Engineering*, vol. 03, no. 02. pp. 107–112, 2011.
13. Lakhya Jyoti Phukon, Neelanjana Baruah “A Generalized Matlab Simulink Model of a Three Phase Induction Motor” in *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (An ISO 3297: 2007 Certified Organization)* Vol. 4, Issue 5, May 2015.
14. Manish Kumar Singh, Madhur Chauhan, Amit Kumar Singhal, Nitin Saxena “A Methodology to Develop A Simulink Model of Three Phase Induction Motor” in *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 4, Special Issue 1, February 2014.
15. Stanislav Rusnok, Pavel Sobota, Martin Slivka, Pavel Svoboda “Assessment Transients During Starting of Induction Motor in Matlab Simulink And Verification by Measurement” in *Advanced Research in Scientific Areas 2012*, International Virtual Conference, Section Electronics, Electrical Systems, Electrical Engineering, 2012, pp.1672-1676.
16. Sifat Shah, A. Rashid, MKL Bhatti “Direct Quadrature (D-Q) Modeling of 3-Phase Induction Motor Using MatLab / Simulink” in *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering* Vol. 3, No. 5, May 2012, pp.237-243.
17. Saffet Ayasun and Chika O. Nwankpa “Induction Motor Tests Using MATLAB / Simulink and Their Integration In to Undergraduate Electric Machinery Courses” in *IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION*, VOL. 48, NO.1, FEBRUARY 2005, pp.37-46.
18. Munira Batool, Aftab Ahmad “Mathematical Modeling And Speed Torque Analysis Of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor Using Matlab Simulink For Electrical Machines Laboratory Mathematical Modeling And Speed Torque Analysis Of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor Using Matlab Simulink For Electrical Machines Laboratory” in *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)* Vol. 4 (2013) No.1, pp. 880-889.
19. Mr. Punit L. Ratnani, Dr. A. G. Thosar “Mathematical Modelling of an 3 Phase Induction Motor Using MATLAB/Simulink” in *International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)* Vol. 4 | Iss. 6| June.

2014, pp.62-67.

20. K. L.SHI, T. F.CHAN, Y.K.WONG and S. L. HO “Modelling And Simulation Of The Three-Phase Induction Motor Using Simulink” in Int. J. Elect. Enging. Educ., Vol. 36, pp. 163–172. Manchester U.P., 1999.
21. Mazouz Salahat, Omar Barbarawe, Mohammad AbuZalata, Shebel Asad “Modular Approach for Investigation of the Dynamic Behavior of Three-Phase Induction Machine at Variation Load” in *Engineering*, 2011, 3, 525-531 Published Online May 2011 (<http://www.scirp.org/journal/eng>).
22. Aleck W. Leedy “Simulink / MATLAB Dynamic Induction Motor Model for Use as A Teaching and Research Tool” in *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)* ISSN: 2231-2307, Volume-3, Issue-4, September, 2013, pp.102-107
23. Eschin E.K. O vzaimnosti zadach upravleniya sostoyaniem asinhronnogo elektrodvigatelya // Vestn. KuzGTU, 2014. #2 S.107-110.
24. Odnokopyilov G.I. Matematicheskaya model asinhronnogo dvigatelya v nepolnofaznom rezhime raboty / Odnokopyilov G.I., Bragin A.D. // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Vyip. #4, tom 323. 2013. S.133-137.

Поступило в редакцию 15.06.2016

Received 15 July 2016