



## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Т.В. Синюкова<sup>1</sup>, В.Н. Мещеряков<sup>1</sup>, А.В. Синюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Липецкий государственный технический университет,  
г. Липецк, Россия

ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, [mesherek@yandex.ru](mailto:mesherek@yandex.ru), [zeitsn@yandex.ru](mailto:zeitsn@yandex.ru)

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Исследовать существующие способы частотного управления и их влияния на характеристики асинхронного двигателя, в том числе и на энергетические параметры. Рассмотреть новые схемные решения исследуемого типа управления. Составить математическую модель каждого из способов частотного управления. Произвести анализ полученных результатов с позиций формирования механических, электромеханических и энергетических составляющих. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применялся метод компьютерного имитационного моделирования, реализованный средствами Matlab Simulink. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье рассмотрены этапы становления систем управления, с анализом их достоинств и недостатков. Произведено моделирование актуальных на текущий момент систем управления асинхронным двигателем, рассмотрены новые схемные решения. Произведен анализ полученных механических, электромеханических и энергетических характеристик. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Проведенные исследования имеют практическую направленность, так как имитационное моделирование позволяет получить характеристики объекта без дополнительных вложений на его реконструкцию. Выявить оптимальную для данного механизма систему управления в зависимости от предъявляемых к объекту требований. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования на реальных объектах схем с трансформатором в цепи ротора, хорошие показатели по демпфированию колебаний в многодвигательных системах также выявлены у схем данного типа.

**Ключевые слова:** Система управления, электропривод, моделирование, асинхронный двигатель, Matlab.

**Для цитирования:** Синюкова Т.В., Мещеряков В.Н., Синюков А.В. Исследование систем управления для подъемно-транспортных механизмов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 167-181. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-167-181.

## RESEARCH OF FREQUENCY CONTROL SYSTEMS FOR LIFTING AND TRANSPORT MECHANISMS

TV. Sinyukova<sup>1</sup>, VN. Meshcheryakov<sup>1</sup>, AV. Sinyukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, [mesherek@yandex.ru](mailto:mesherek@yandex.ru), [zeitsn@yandex.ru](mailto:zeitsn@yandex.ru)

**Abstract:** *THE PURPOSE.* To investigate the existing methods of frequency control and their influence on the characteristics of the asynchronous motor, including the energy parameters. Consider new circuit solutions of the control type under study. Create a mathematical model of each of the methods of frequency control. To analyze the results obtained from the point of view of the behavior of mechanical, electromechanical and energy components. *METHODS.* When solving this problem, the method of computer simulation modeling, implemented by means of Matlab Simulink, was used. *RESULTS.* In this paper, various aspects of electric drive systems based on asynchronous motors with the use of cascade switching are studied and described, existing connection schemes for such systems are analyzed, and several new options with improved characteristics are proposed. A comparative analysis of various connection schemes is made, the most interesting results of such analysis are presented, and conclusions

are drawn about the future prospects of certain circuit solutions. Electric drive systems were modeled in the Simulink MATLAB environment using software tools to demonstrate the operation parameters of the considered circuits. CONCLUSION. Various schemes for switching on the asynchronous motor in the Simulink Matlab environment were investigated. The results of the study revealed the potential usefulness of using a circuit with a transformer in the rotor circuit, as well as the construction of a multi-motor electric drive with a common transformer and a common frequency converter circuit. The efficiency of parallel connection of rotary circuits of a two-motor electric drive was demonstrated. The methods of returning the sliding energy to the network are also compared, and their effectiveness in a comparative analysis with the operation in the closed-loop rotor mode is demonstrated.

**Keywords:** Control system, electric drive, simulation, asynchronous motor, Matlab.

**For citation:** Sinyukova TV, Meshcheryakov VN, Sinyukov AV. Research of frequency control systems for lifting and transport mechanisms. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1): 167-181. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-167-181.

### Введение

Большинство предприятий разного профиля ставят перед собой задачу экономичного использования электроэнергии.

Асинхронные двигатели заняли прочные позиции во многих отраслях промышленности, составив значительный класс потребителей электрической энергии [1-4].

Данный вид двигателей выпускается в следующем исполнении – с короткозамкнутым ротором и фазным ротором. Весомым недостатком асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, в системах без частотного преобразователя, является большой пусковой ток. Системы такого типа не приемлемы для подъемно-транспортных механизмов, требующих изменения скоростных параметров при пуске и остановке двигателя [5, 6].

Использование асинхронных двигателей с фазным ротором на промышленных объектах позволяет осуществлять регулировку частоты вращения двигателя, за счет применяемого в системах данного типа инструментария, в виде пускорегулирующего реостата вводимого в цепь ротора или реактора, что приводит к снижению пусковых токов, оказывает влияние на параметры момента и вид механической характеристики.

В работе поставлена цель, которая заключается в исследовании способов частотного управления и их влияния на характеристики двигателя, в том числе и на энергетические параметры.

Наиболее часто используемой методикой изменения скорости вращения двигателя является метод, основанный на изменении показателей частоты питания. Востребованность данного способа напрямую связана с достижениями в области вентильных преобразователей. К недостаткам данного решения можно отнести присутствие в выходных параметрах тока с преобразователя частоты несинусоидальности, что негативно влияет на работу двигателя, снижая сроки его эксплуатации, также отрицательными составляющими являются – увеличение размеров и стоимости устройства.

Следующий способ управления частотой вращения основан на регулировании показателей скольжения, данный процесс становится осуществимым за счет присутствия в цепи ротора сопротивления, параметры которого можно изменять. У данного метода также есть достоинства и недостатки. К достоинствам можно отнести простоту конструкции, для реализации не требуется больших финансовых вложений, существенным недостатком являются большие потери энергии на пусковых резисторах, а также необходимость постоянного контроля их состояния с привлечением обслуживающего персонала.

На многих промышленных объектах регулирование скорости до сих пор осуществляется энергозатратным способом посредством ввода или вывода сопротивлений в цепи ротора. Релейно-контакторные схемы благодаря простоте конструкции входящих в ее состав аппаратов, их ремонтнопригодности, отсутствию высокой чувствительности к электромагнитным полям, к температурным перепадам, способностью работать в помещениях с повышенным уровнем пыли до сих пор занимают прочные позиции на промышленных предприятиях. Требования к системам управления постоянно

повышаются, что ведет к поиску новых решений. Снижение потерь энергии можно обеспечить за счет перехода на вентильный управляемый электрический привод. Использование данного решения приведет к энергоэффективности, увеличению диапазона регулирования скорости, повысит качество переходного процесса, позволит осуществлять рекуперацию энергии в сеть, повысит робастность и надежность системы в целом, в том числе увеличит срок службы механических узлов подъемно-транспортных механизмов. В среднем, при использовании данного решения, потребление электрической энергии снижается на 20-30 процентов.

Улучшение показателей регулирования скорости и ее диапазона дает использование импульсно-ключевого управления [7-15].

Для исследования в данной работе взят двигатель с мощностью 30 кВт. Параметры для моделирования систем управления были рассчитаны на основе метода, базирующегося на данных электродвигателя, взятых из каталогов. При моделировании использовалась модель асинхронного двигателя с фазным ротором работающего в режиме короткозамкнутого ротора

### Схемные решения со скалярной системой управления

Первой исследуемой в среде *Matlab Simulink* системой стала система управления асинхронным двигателем с асинхронно-вентильным каскадом, которая позволяет осуществлять возврат энергии в цепь постоянного тока преобразователя (рис. 1). Питание на выпрямитель поступает от источника напряжения. Имеющийся в схеме конденсатор играет роль накопителя энергии поступающей из сети, также в его задачи входит снижение периодически возникающих повышенных показателей постоянного напряжения. В схему введен датчик, контролирующий показатели тока, сигнал с него сравнивается с уставкой регулятора и далее поступает в виде управляющего сигнала на IGBT-транзистор, при закрытом состоянии транзистора диод пропускает ток из цепи ротора. В модели реализован запуск двигателя без нагрузки на валу, регулирование частоты напряжения не предусмотрено.

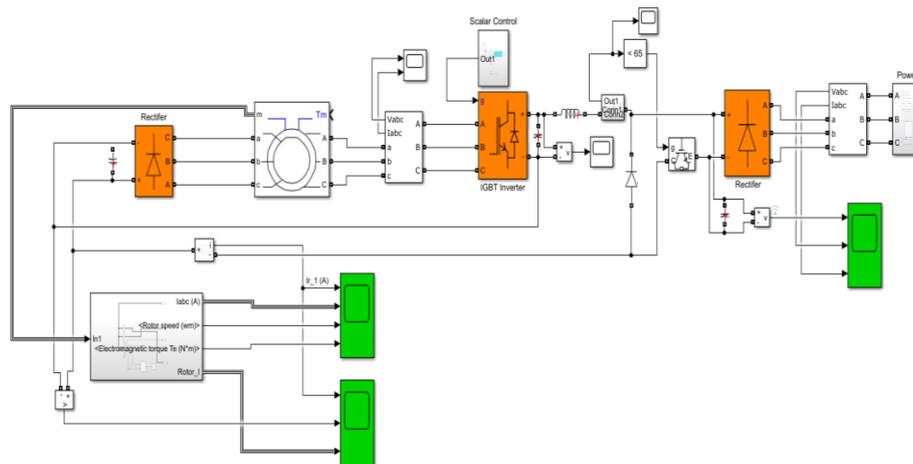


Рис. 1. Модель I  
Fig.1. Model I

На рис. 2 и 3 представлены полученные в результате моделирования характеристики, анализ которых позволяет сделать вывод о том, что рассматриваемое схемное решение является недорогой альтернативой при модернизации в случае использования на реальном объекте прямого или реакторного пуска.

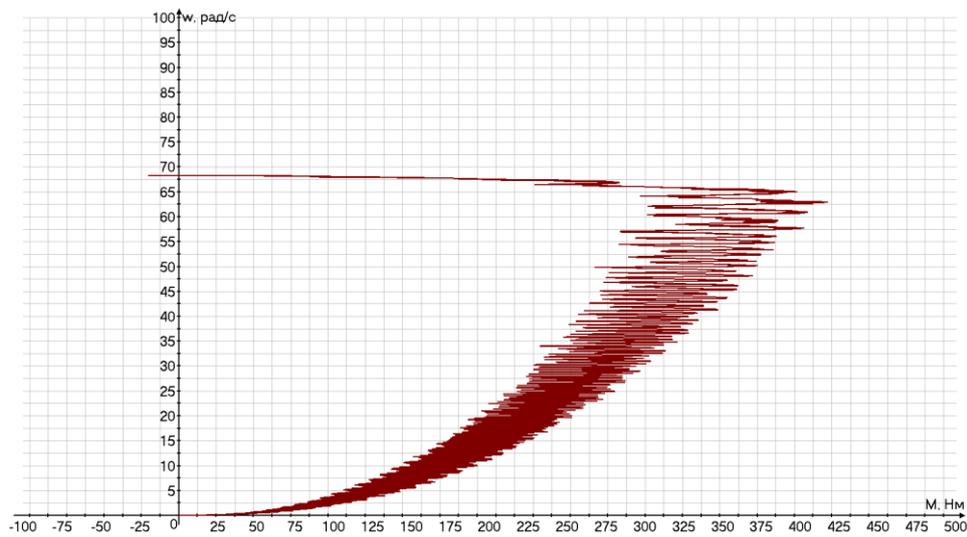


Рис. 2. Зависимость скорости от момента  
*Fig.2. Dependence of the speed on the moment*

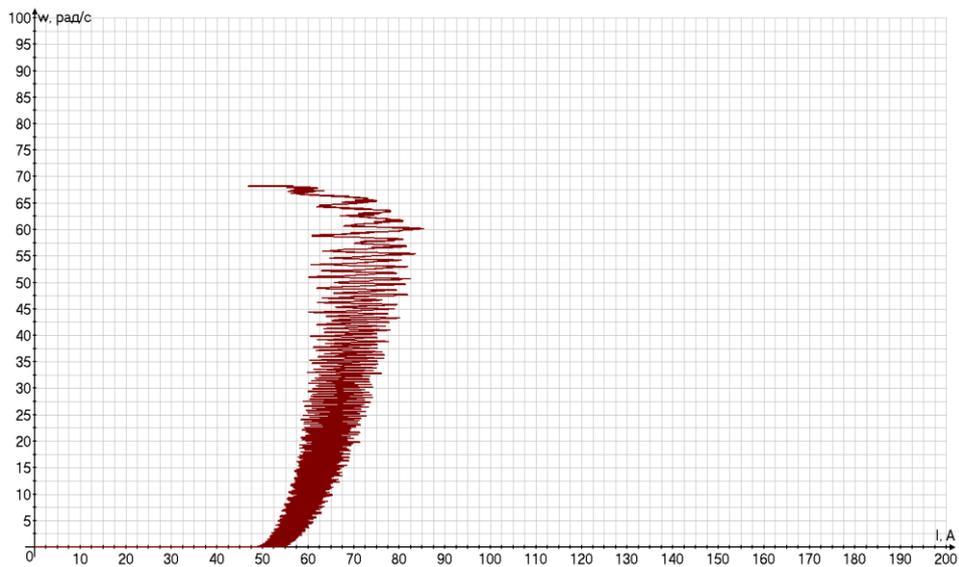


Рис. 3 Зависимость скорости от величины тока  
*Fig.3. Dependence of the speed on the current value*

Характеристика крутящего момента не имеет переменных по знаку колебаний, его нарастание происходит плавно. Использование данной системы управления приводит к снижению токовой нагрузки на двигатель, так как показатели тока статора имеют не сильный скачок при пуске, составляющий 1,2 от тока номинального.

Система управления с асинхронно-вентильным каскадом на базе автономного инвертора тока, в которой возможно изменение частоты подаваемого на статор напряжения представлена на рис. 4.

В данной схеме реализован скользящий тип управления с обратной связью по скорости с изменением частоты в период пуска двигателя. Частота меняется по закону, обеспечивающему режим эффективного скольжения, при котором энергия возвращается в цепь постоянного тока.

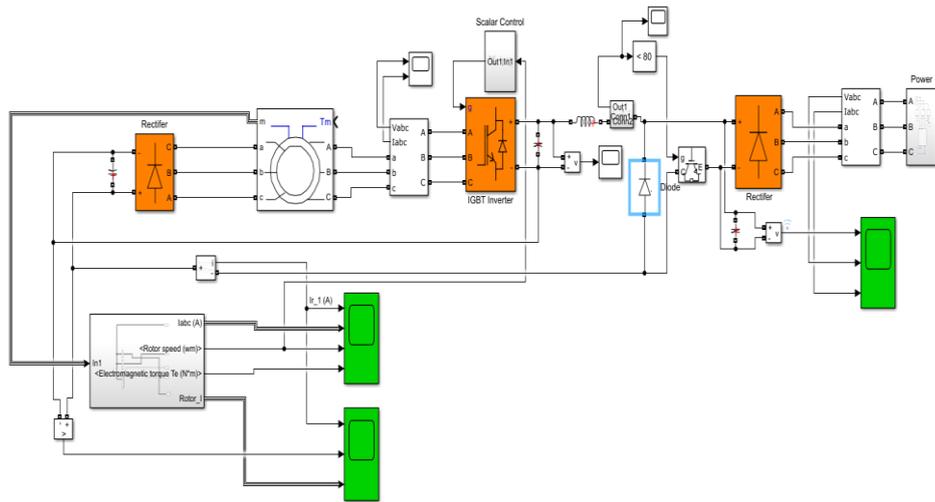


Рис. 4. Модель II  
Fig.4.Model 2

Полученные в результате имитационного моделирования в среде Matlab Simulink характеристики приведены на рис. 5 и 6. На представленном переходном процессе можно увидеть присутствие бросков крутящего момента, переменных по знаку скачков момента не наблюдается, процесс разгона происходит при номинальном значении момента. Пусковой ток превышает значение номинального тока примерно на 50 процентов.

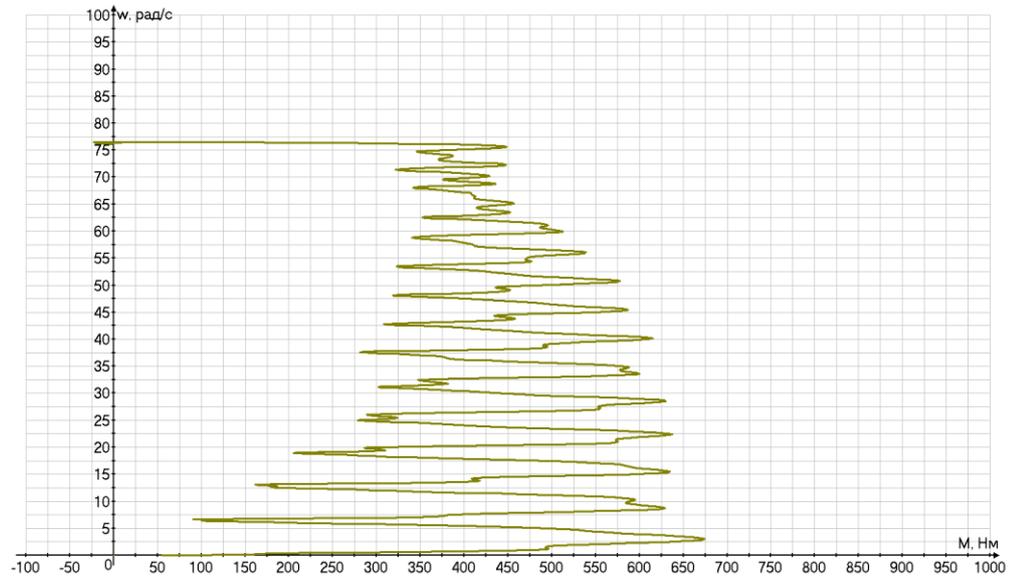


Рис. 5. Зависимость скорости от момента  
Fig.5. Dependence of the speed on the moment

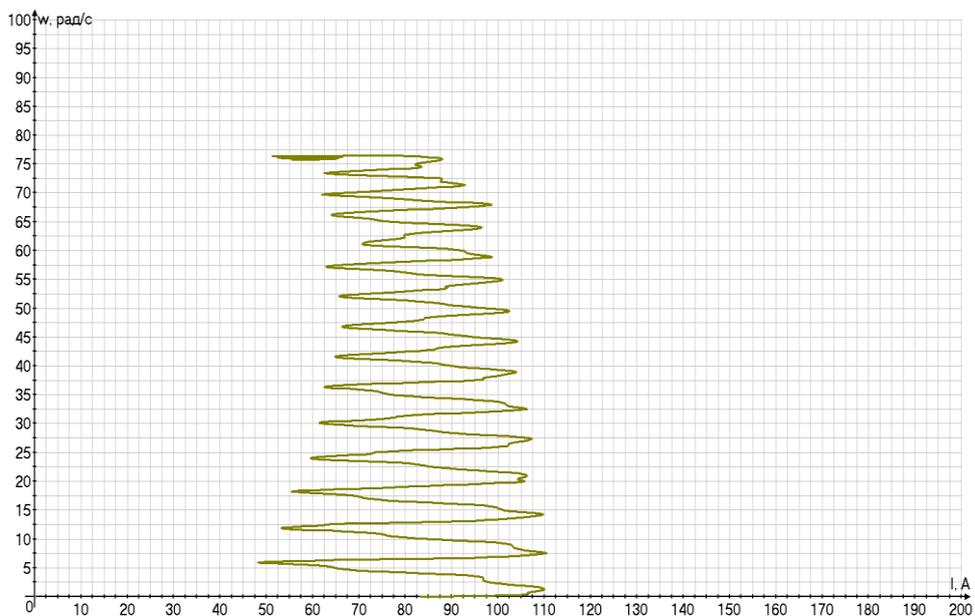


Рис. 6. Зависимость скорости от величины тока  
 Fig.6. Dependence of the speed on the current value

На рис. 7 показан переходный процесс потребляемой двигателем мощности, данные получены при работе двигателя с номинальной нагрузкой.

**Схемные решения с векторной системой управления**

На следующем этапе рассмотрены схемные решения с векторной системой управления. Система содержит релейный регулятор тока статора, реализация емкостного фильтра, подключенного в параллельную с обмоткой статора цепь, осуществлена посредством конденсаторов соединенных в звезду (рис. 8). Схема выполнена на базе автономного инвертора напряжения.

На рис. 9 и 10 представлены характеристики полученные при моделировании рассматриваемой системы. В результате анализа характеристик было выявлено, что значение пускового тока превышает номинальный ток в 2 раза, но данное значение быстро снижаются до номинального параметра. Переходный процесс является «мягко» протекающим, влияние на электрический двигатель пускового тока не значительное. По характеристике зависимости скорости от момента видно, что переходный процесс представляет из себя стандартный частотный пуск. Максимальный момент равен значению момента номинального.

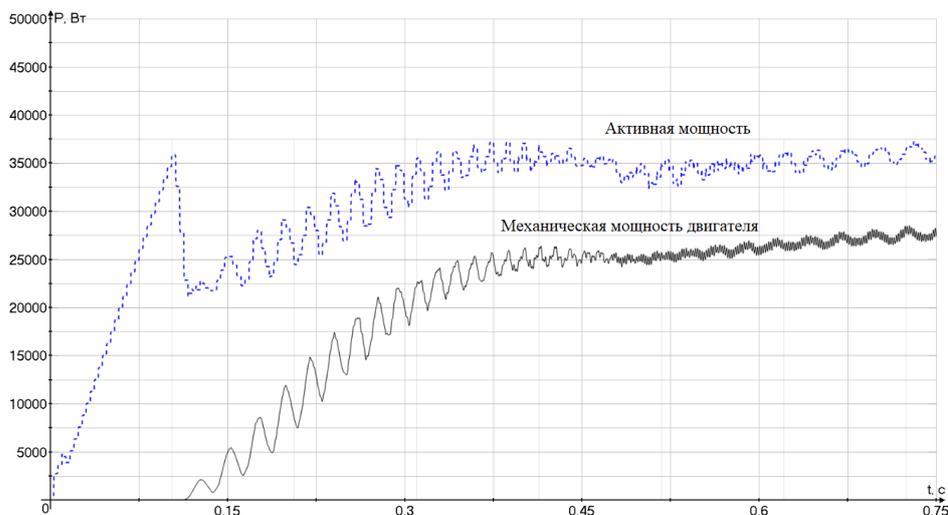


Рис. 7. Зависимость мощности от времени  
 Fig.7. Power versus time dependence

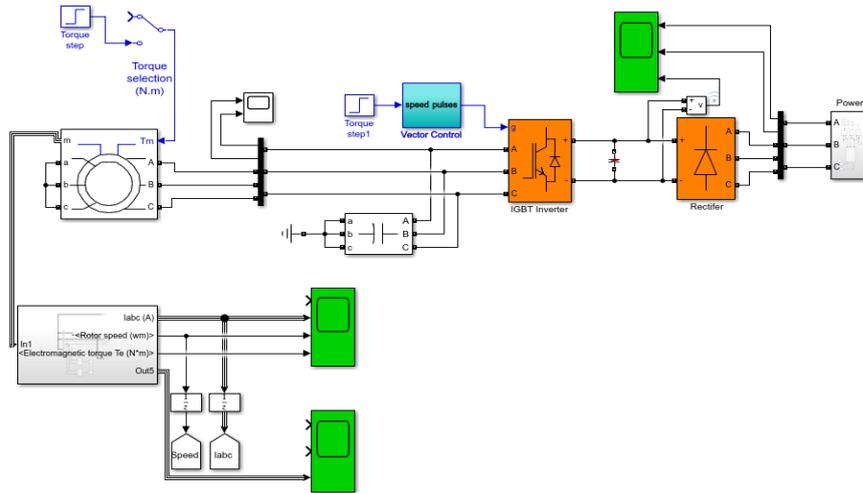


Рис. 8. Модель III

Fig.8. Model.3

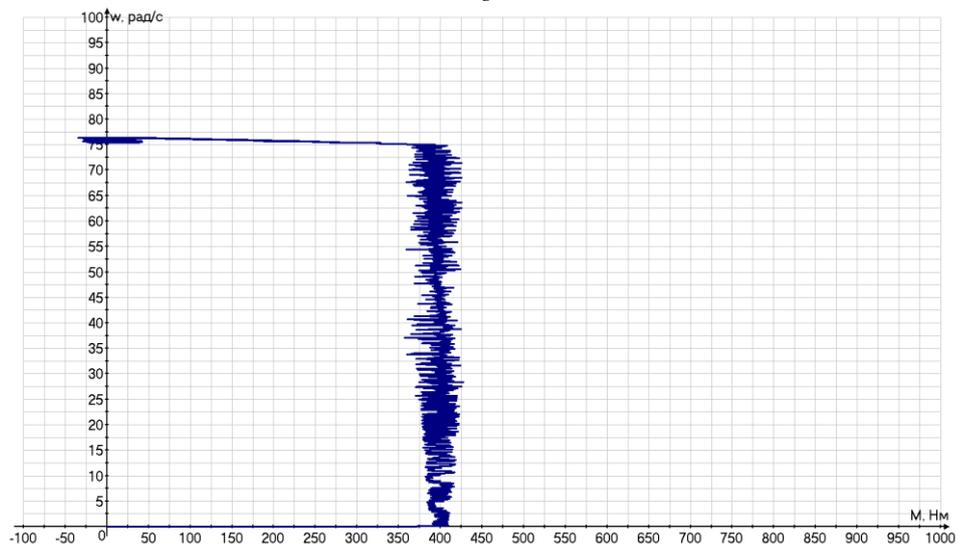


Рис. 9. Зависимость скорости от момента

Fig.9. Dependence of the speed on the moment

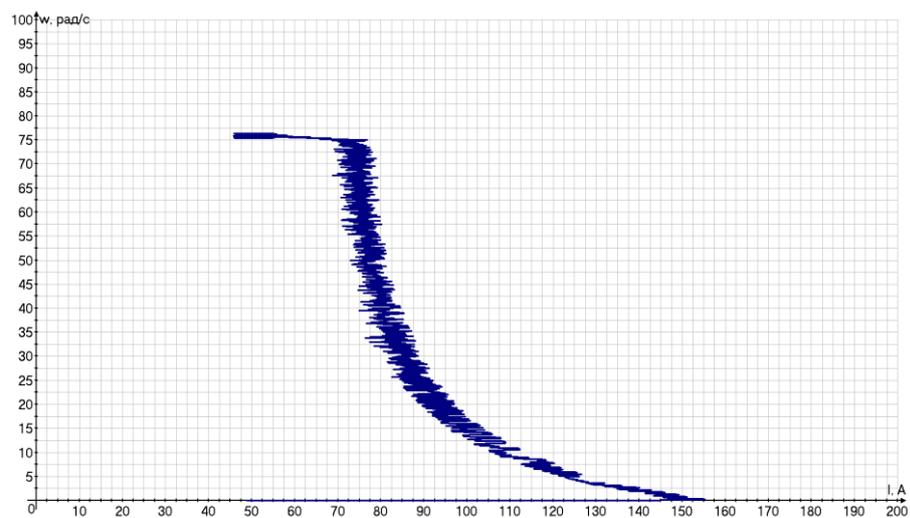


Рис. 10. Зависимость скорости от величины тока

Fig.10. Dependence of the speed on the current value

Следующая исследуемая схема с частотным векторным управлением представлена на рис. 11. Особенность данной системы в подключении ротора в цепь постоянного тока, оно реализовано по каскадной схеме. Модель также выполнена на базе автономного инвертора напряжения. Полученные графики в результате моделирования приведены на

рис. 12 и 13. По сравнению с предыдущим вариантом пуска двигателя, значение пускового тока осталось примерно на том же уровне, но произошло изменение в большую сторону пускового момента примерно на 50 процентов, что говорит о преимуществе данной схемы.

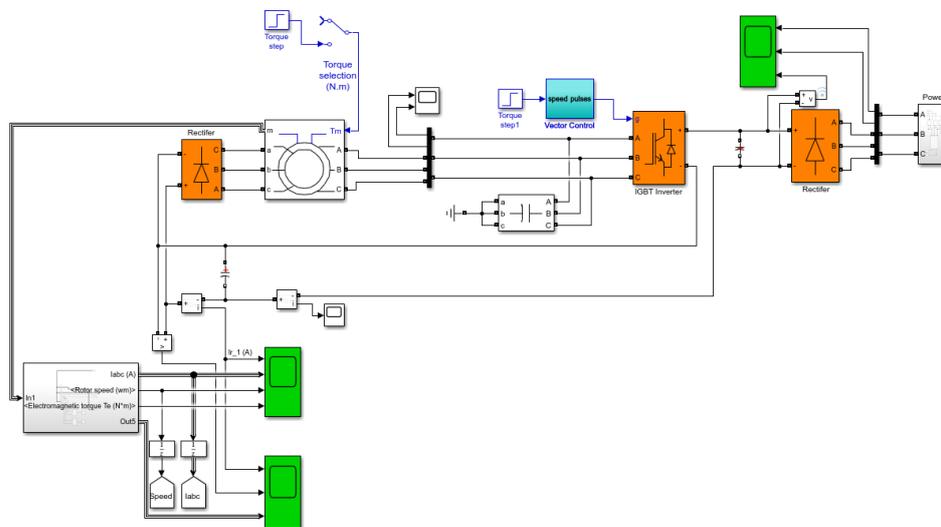


Рис. 11. Модель VI  
Fig.11. Model.6.

### Системы со салярным управлением и трансформатором в цепи ротора

На рис. 14 представлен усовершенствованный вариант системы управления, позволяющий осуществлять возврат энергии в цепь постоянного тока. В схеме присутствует автономный инвертор напряжения и повышающий трансформатор, пуск происходит с постоянным скольжением, система однодвигательная. Коэффициент трансформации в исследуемой модели составляет 1:5, его расширение возможно до значения 1:20.

На рис. 15, 16, 17 представлены результаты моделирования. Нагрузка на валу двигателя в процессе пуска и разгона двигателя равна номинальной. По сравнению со схемным решение содержащим автономный инвертор тока, использование данной системы дает ряд преимуществ, в виде большего значения коэффициента полезной мощности, ускоренного времени выхода на устойчивый режим, при этом колебания отсутствуют, значения тока ниже во всем исследуемом диапазоне, крутящий момент выше.

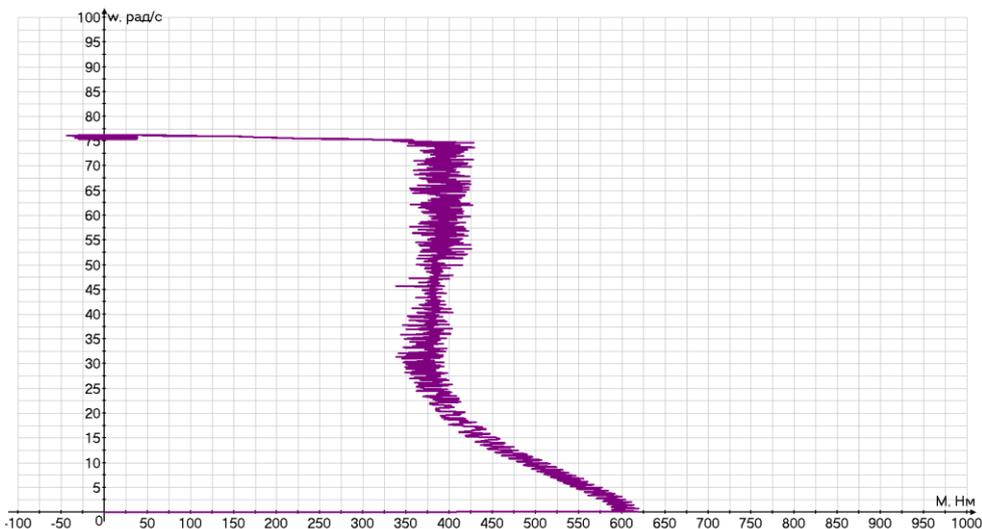


Рис. 12. Зависимость скорости от момента  
Fig.12. Dependence of the speed on the moment

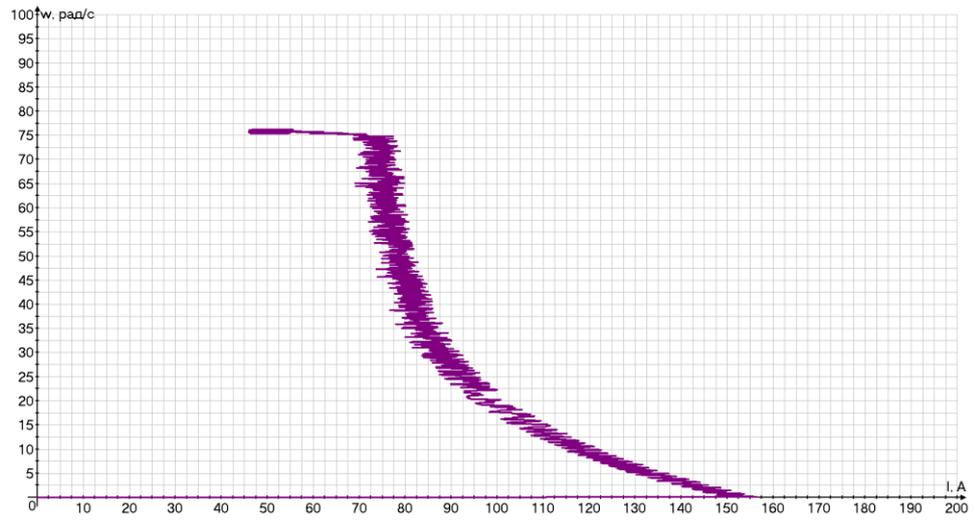


Рис. 13. Зависимость скорости от величины тока  
Fig.13. Dependence of the speed on the current value

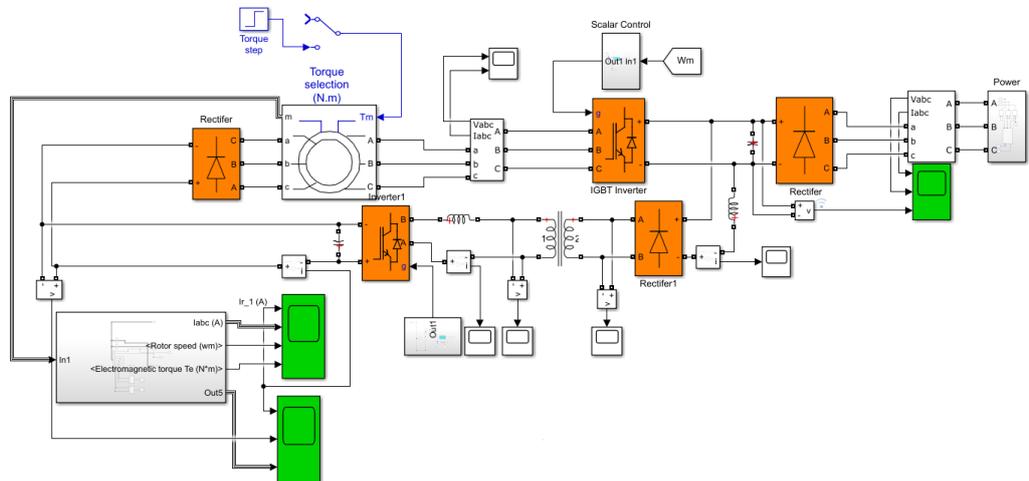


Рис. 14. Модель VII  
Fig.14. Model 7

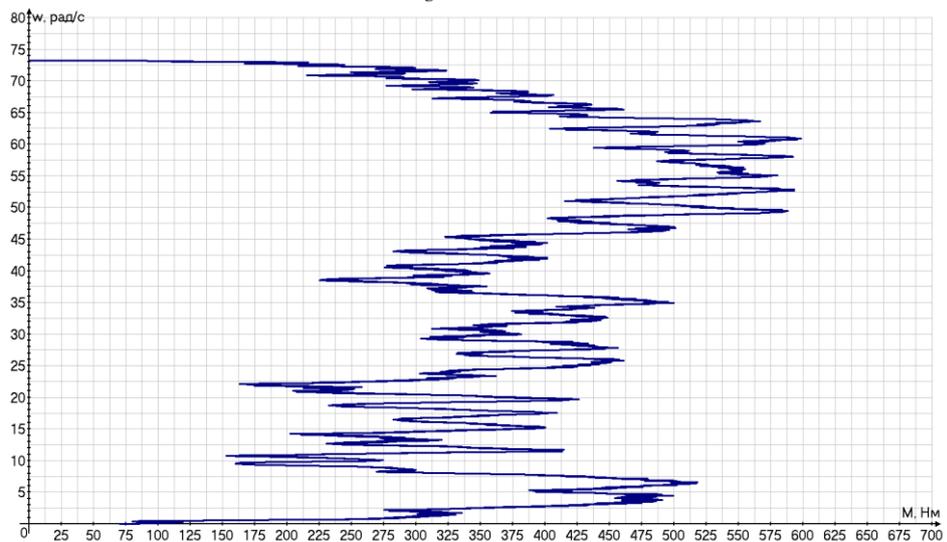


Рис. 15. Зависимость скорости от момента  
Fig.15. Dependence of the speed on the moment

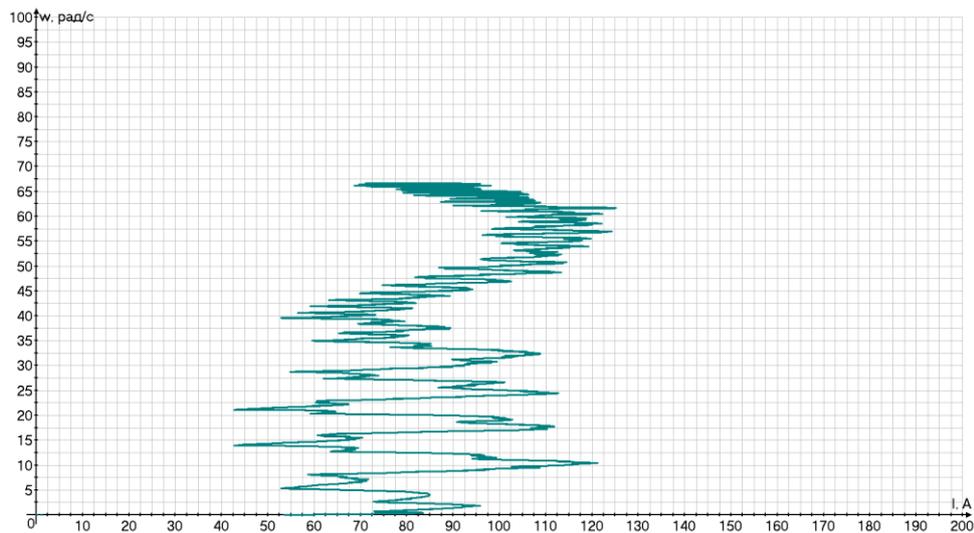


Рис. 16. Зависимость скорости от величины тока

Fig.16. Dependence of the speed on the current value

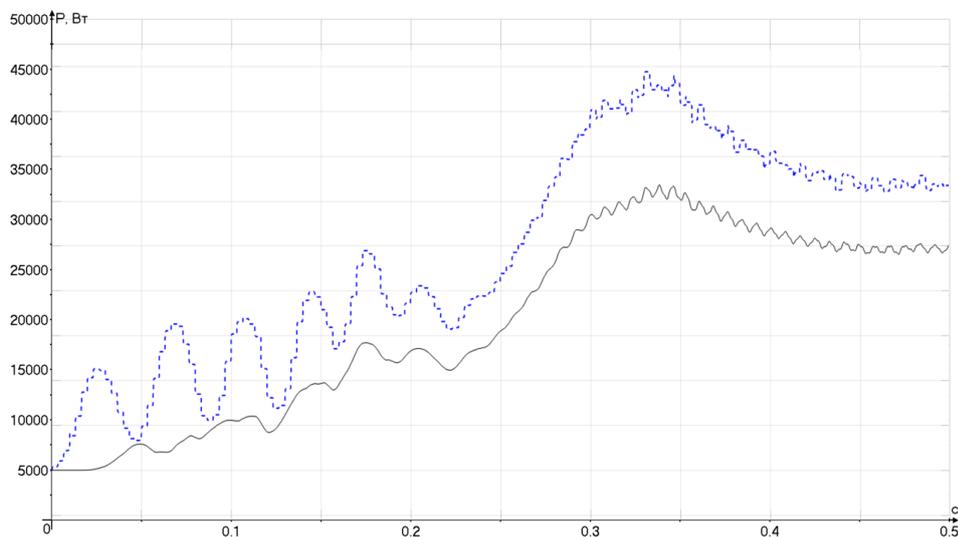


Рис. 17. Зависимость мощности от времени

Fig.17. Power versus time dependence

### Двухмассовая система

Так как частой проблемой многомассовых механизмов является присутствие негативно сказывающихся на систему управления и на сам механизм колебаний, то на следующем этапе рассмотрена система с двумя двигателями, гашение колебаний в которой возможно осуществить путем использования выше рассмотренной системы с трансформатором в цепи ротора.

Модель (рис. 18) представлена двумя однотипными двигателями, отличающимися лишь внутренними параметрами – данными момента инерции и значениями механических потерь. Данная схема представляет интерес с позиций снижения колебаний скорости в системе (рис. 19, 20), поэтому снятие остальных характеристик не производилось. Использование предлагаемого решения позволило демпфировать колебания без усложнения схемы, полученные механические характеристики отличаются плавностью нарастания скорости.

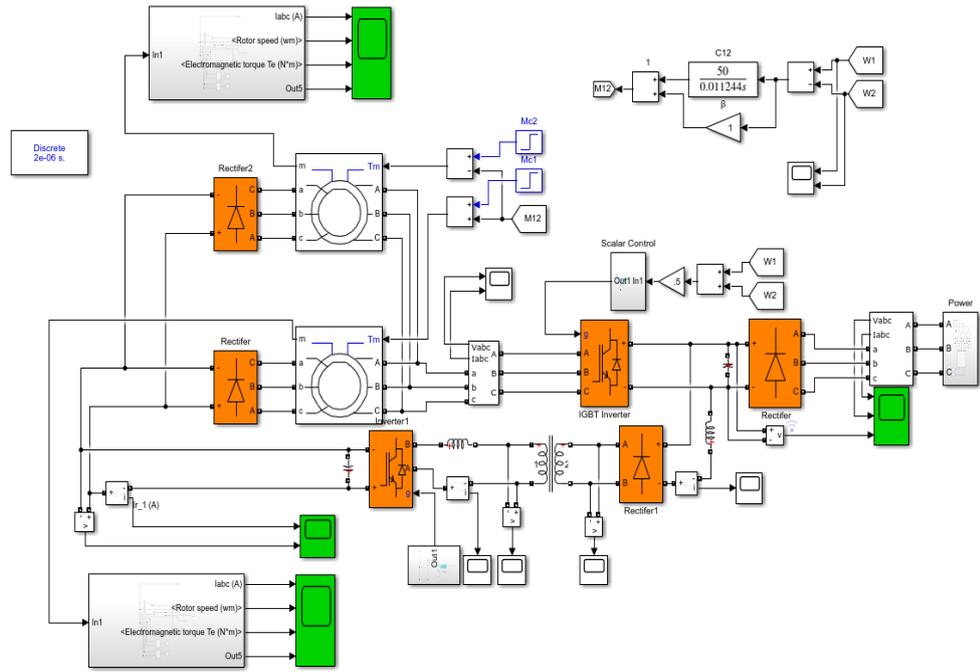


Рис. 18. Модель VIII  
Fig.18. Model.8

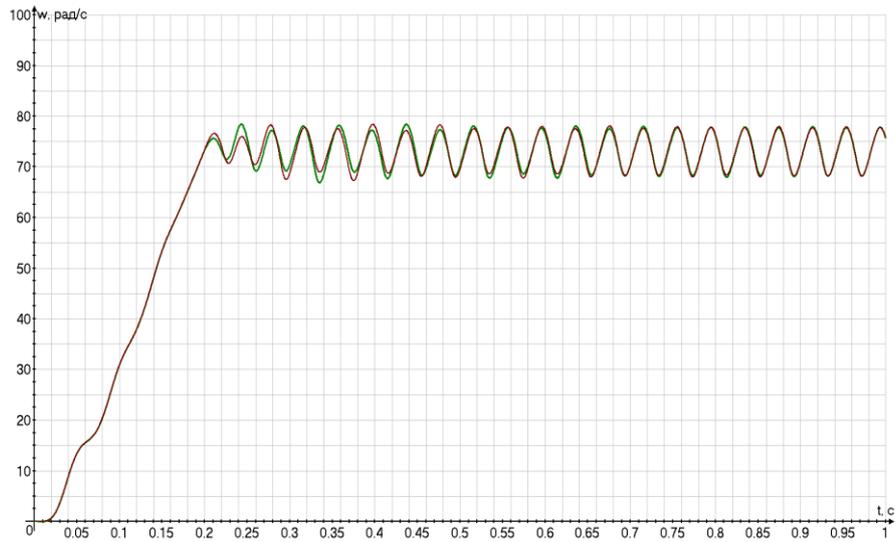


Рис. 19. Зависимость скорости от времени в системе с двумя двигателями без трансформатора  
Fig.19. Speed versus time dependence in a system with two motors without a transformer

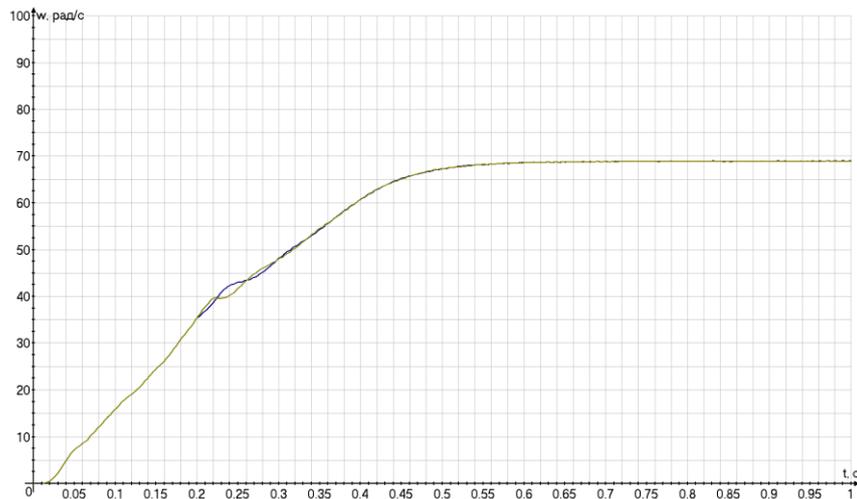


Рис. 20. Зависимость скорости от времени в системе с двумя двигателями с трансформатором  
 Fig.20. The dependence of speed on time in a system with two motors with a transformer

### Результаты и обсуждение

Заключительным этапом исследования стало сравнение энергетических параметров. Для моделирования выбраны две системы.

Первое схемное решение (рис. 21) содержит трехфазный повышающий трансформатор, подключение которого осуществлено посредством сглаживающего дросселя к выпрямителю не имеющему управления, коэффициент трансформации равен пяти. Возврат энергии скольжения в данной системе осуществляется в цепь постоянного тока, расположенную перед инвертором предназначенным для выдачи тока статора.

Второе схемное решение (рис. 22) позволяет осуществлять возврат энергии в трехфазную сеть, здесь расположенный перед трансформатором инвертор осуществляет синхронизацию с напряжением сети, что не допускает временного сдвига напряжения в фазе и исключает переток сети через трансформатор. Для уменьшения скачков тока, снижения скачкообразных перетоков энергии из цепи ротора в питающую сеть в схеме предусмотрен сглаживающий фильтр.

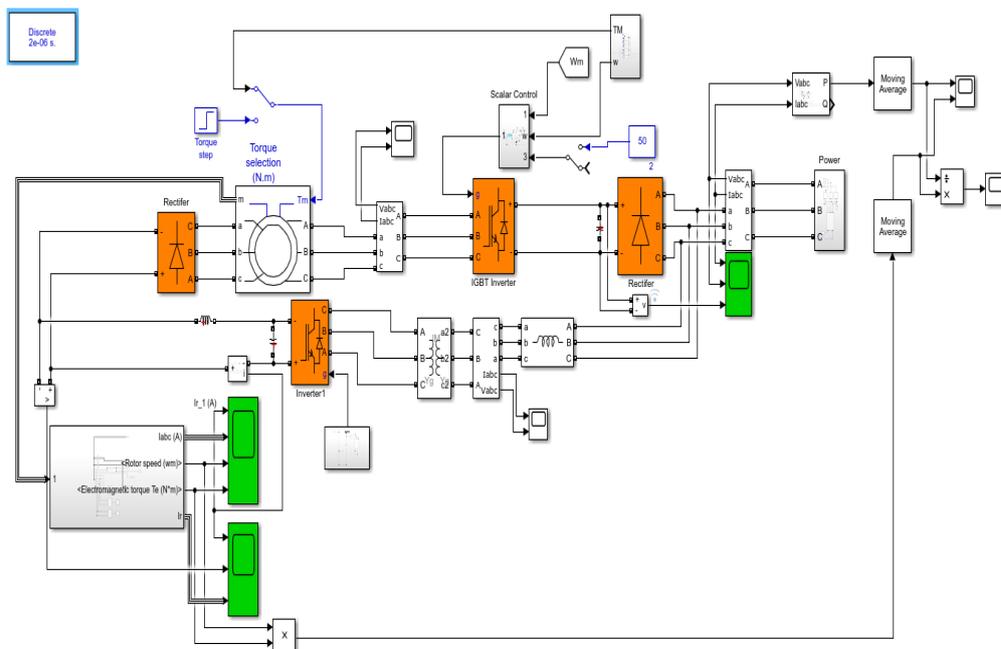


Рис. 21. Модель VIX  
 Fig.21. Model VIX

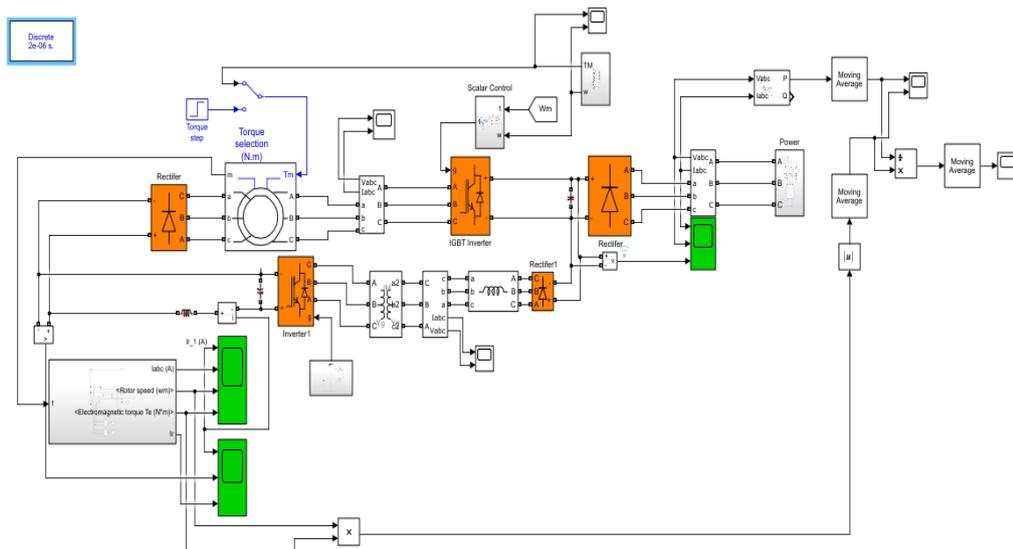


Рис. 22. Модель X  
Fig.22. Model X

Используемые в обоих схемных решениях элементы идентичны.

В данном случае интерес представляют совмещенные результаты моделирования КПД (соотношение между активной энергией, потребляемой из сети и полезной механической энергией формируемой на валу двигателя). Снятие характеристик, представленных на рис. 23, осуществлялось в трех системах:

- системе с асинхронным двигателем работающей в режиме короткозамкнутого ротора с частотным управлением (характеристика 1);
- в системах содержащих асинхронный двигатель с фазным ротором и трехфазный трансформатор включенный в цепь ротора одна из которых осуществляет возвращение энергии в цепь постоянного тока (характеристика 2), вторая – в трехфазную сеть (характеристика 3).

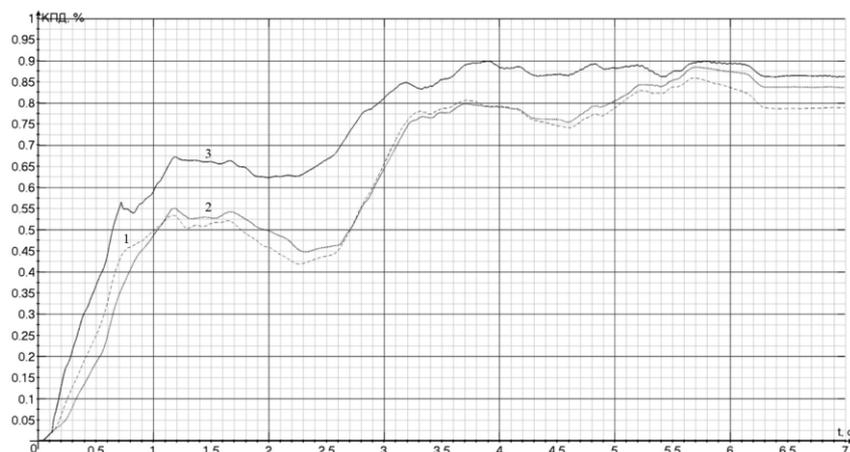


Рис. 23. Совмещенные графики КПД  
Fig.23. Combined efficiency graphs

В системах содержащие трансформатор за счет более высокого регулирования частоты тока статора, происходит появление избыточной энергии скольжения, поэтому сумарный КПД становится больше. Увеличение нагрузки до значений близких к номинальным данным в системе с отдачей энергии в сеть имеет меньшее снижение значений КПД. Схожесть графиков системы содержащий асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с системой с отдачей энергии в цепь постоянного тока связана с присутствием значительных потерь в самом трансформаторе. Система с отдачей энергии в сеть более стабильна, по сравнению с системой с отдачей напряжения в цепь переменного тока, так как не содержит постоянно перезаряжающегося конденсатора.

### Выводы

Произведенное в результате имитационного моделирования исследование имеет практическую направленность, связанную с возможностью исследования системы управления без ее материальной реализации на объекте. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что система с включением трансформатора в цепь ротора зарекомендовала себя хорошо по ряду показателей, в том числе и при использовании в двухдвигательном электроприводе.

### Литература

1. Даденков Д.А., Солоцкий Е.М., Шачков А.М. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 11. С. 117-128.
2. Meshcheryakov V. Sinyukova., T, Sinyukov A., and Vladimirov O. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.
3. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., et al. Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor // High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), Prague, Czech Republic.
4. Abakumov A.M. and Randin D.G.. Research of Dual-Mass Oscillation System with Linear Motor // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEEM), Sochi, Russia. pp. 1–5 (25-27 March 2019).
5. Чебан В.М., Марков М.Ю., Бобрик В.И. Уменьшение пусковых токов асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором // Электричество. 2016. № 3. С. 57-60.
6. Григорьев Н.Д. Уменьшение пусковых токов асинхронных двигателей // Промышленная энергетика. 2010. №12. С. 7-11.
7. Злобин Д.С. Исследование способов уменьшения пускового тока асинхронного двигателя // Студенческий вестник. 2019. № 29-4 (79). С. 62-63.
8. Валов А.В. Энергетические показатели импульсно-векторного управления асинхронным электроприводом с фазным ротором // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2008. № 11 (111). С. 57-79.
9. Герман-Галкин С.Г. Аналитическое и модельное исследование асинхронной машины с фазным ротором при приложенных скольжениях // Электротехника. 2015 № 7. С. 58-65.
10. Коршунов А.И. Математическая модель асинхронного трехфазного двигателя с фазным ротором // Электротехника. 2021. №1. С 8-19.
11. Бубнов А.В., Мальгин Г.В., Ровкин В.Д. Оптимизация закона управления при пуске асинхронного электропривода с фазным ротором на основе моделирования динамических режимов его работы // Омский научный вестник. 2017. № 2 (152). С. 33-40.
12. Jiang You, Minghao Liu, Jiarui Ma, et al. 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 (IPEMC 2016 – ECCE Asia). 2016. pp. 1362-1368.
13. Watanabe N, Hirotsuka I, Sugimoto H, et al. Trial Fixed Outer Rotor Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor and its Basic Characteristics // 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju, Korea (South). 2018. pp. 135.
14. Weili L, Purui W, Yong L, et al. Influence of rotor structure on field current and rotor electromagnetic field of turbine generator under out-of-phase synchronization // 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). Miami, FL, USA. 2016. pp. 94.
15. Vlad I, Campeanu A, Enache S. Enache M // 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN). Iasi. 2017. pp. 98.

### Авторы публикации

**Синюкова Татьяна Викторовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк.  
E-mail: stw0411@mail.ru.

**Мещеряков Виктор Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк.

E-mail: mesherek@yandex.ru.

**Синюков Алексей Владимирович** – аспирант кафедры «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк. E-mail: zeitsn@yandex.ru.

### References

1. Dadenkov DA, Solotskii EM, Shachkov AM. Modelirovanie sistemy vektornogo upravleniya asinkhronnym dvigatelem v pakete Matlab/Simulink. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universitete. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. 2018;11:117-128.
2. Meshcheryakov V, Sinyukova T, Sinyukov A, et al. *Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems*. E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.
3. Meshcheryakov V, Sinyukova T, Sinyukov A, et al. *Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor*. High Speed Turbomachines and Electrical Drevs Conference 2020 (HSTED-2020), Prague, Czech Republic.
4. Abakumov AM. and Randin D.G. *Research of Dual-Mass Oscillation System with Linear Motor*. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEM), Sochi, Russia. pp. 1–5 (25-27 March 2019).
5. Cheban VM, Markov MYu, Bobrik VI. Umen'shenie puskovykh tokov asinkhronnykh elektrodvigatelyi s korotkozamknutym rotorom. *Elektrichestvo*. 2016;3:57-60.
6. Grigor'ev ND. Umen'shenie puskovykh tokov asinkhronnykh dvigatelei. *Promyshlennaya energetika*. 2010;12:7-11.
7. Zlobin D.S. Issledovanie sposobov umen'sheniya puskovogo toka asinkhronnogo dvigatelya. *Studencheskii vestnik*. 2019;29-4(79):62-63.
8. Valov AV. Energeticheskie pokazateli impul'sno-vektornogo upravleniya asinkhronnym elektroprivodom s faznym rotorom. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2008;11(111):57-79.
9. German-Galkin SG. Analiticheskoe i model'noe issledovanie asinkhronnoi mashiny s faznym rotorom pri prilozhennykh skol'zheniyakh. *Elektrotehnika*. 2015;7:58-65.
10. Korshunov A.I. Matematicheskaya model' asinkhronnogo trekhfaznogo dvigatelya s faznym rotorom. *Elektrotehnika*. 202;1:8-19.
11. Bubnov AV, Mal'gin GV, Rovkin VD. Optimizatsiya zakona upravleniya pri puske asinkhronnogo elektroprivoda s faznym rotorom na osnove modelirovaniya dinamicheskikh rezhimov ego raboty. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2017;2(152):33-40.
12. Jiang You, Minghao Liu, Jiarui Ma, et al. *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 (IPEMC 2016 – ECCE Asia). 2016. pp. 1362-1368.
13. Watanabe N, Hirotsuka I, Sugimoto H, et al. *Trial Fixed Outer Rotor Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor and its Basic Characteristics*. 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju, Korea (South). 2018. pp. 135.
14. Weili L, Purui W, Yong L, et al. *Influence of rotor structure on field current and rotor electromagnetic field of turbine generator under out-of-phase synchronization*. 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). Miami, FL, USA. 2016. pp. 94.
15. Vlad I, Campeanu A, Enache S, Enache M. A. *Study of direct-on-line starting of low power asynchronous motors*. 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN). Iasi. 2017. pp.98.

### Authors of the publication

**Tatyana V. Sinyukova** – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

**Viktor N. Meshcheryakov** – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

**Alexey V. Sinyukov** – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

**Получено**

**15 февраля 2021г.**

**Отредактировано**

**18 февраля 2021г.**

**Принято**

**24 февраля 2021г.**