

УДК 621.313

Плюгин В. Е., канд. техн. наук,
Егоров А. В., канд. техн. наук,
Шилкова Л. В.,
Потоцкий Д. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ANSYS MAXWELL

Аннотация: Разработана имитационная модель плавного пуска высокоскоростного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, управляемого от преобразователя частоты, в программном пакете Ansys Maxwell. Выполнен анализ пусковых характеристик. Приведены рекомендации по определению оптимальной конструкции высокоскоростного электродвигателя, имеющего минимальные показатели вибраций и шумов.

Ключевые слова: Асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, преобразователь частоты, плавный пуск, имитационная модель, Ansys Maxwell, Simplorer.

Плюгин В. Є., канд. техн. наук,
Єгоров А. В., канд. техн. наук,
Шилкова Л. В.,
Потоцький Д. В.

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ВИСОКОШВИДКІСНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ В ANSYS MAXWELL

Анотація: Розроблено імітаційну модель плавного пуску високошвидкісного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що керується від перетворювача частоти, в програмному пакеті Ansys Maxwell. Виконано аналіз пускових характеристик. Надано рекомендації щодо визначення оптимальної конструкції високошвидкісного електродвигуна, який має мінімальні показники вібрацій і шумів.

Ключові слова : Асинхронний двигун, короткозамкнений ротор, перетворювач частоти, плавний пуск, імітаційна модель, Ansys Maxwell, Simplorer.

Pliugin V. E., PhD,
Yehorov A. V., PhD,
Shilkova L. V.,
Potoczkyj D. V.

HIGH-SPEED INDUCTION MOTORS TRANSIENT SIMULATION IN ANSYS MAXWELL

Abstract: The simulation model of the frequency converter controlled high-speed induction motor with a squirrel-cage rotor soft-start in the programmatic package Ansys Maxwell is worked out. The analysis of starting characteristics is made. Resulted to recommendation on determination high-speed electric motor optimal deign, having minimum indexes of vibrations and noises.

Key words: induction motor, squirrel-cage rotor, frequency converter, soft- start, simulation model, Ansys Maxwell, Simplorer.

Введение. Высокоскоростные асинхронные двигатели (ВСАД) – это асинхронные двигатели, которые работают на больших скоростях обращения. Применение асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, управляемых от преобразователей частоты с частотой питающего напряжения до 400 Гц, имеют скорости вращения до 24000 об/мин.

В современных ВСАД увеличение скорости достигается без применения редукто-

ров и ременных передач за счет управления от преобразователей частоты (ПЧ). ВСАД хорошо приспособлены для работы в режиме ослабленного поля, обеспечивая максимально широкий диапазон скоростей, который только может позволить их механическая конструкция.

При высоких скоростях вращения возникают значительные вибрации и шумы как при пуске, так и при работе двигателя в номинальном режиме. Высокий уровень

вибраций приводит к разрушению подшипников за короткий срок, а уровень шумов достигает критического для человека уровня, потому задача уменьшения вибраций и шумов ВСАД является актуальной для современных промышленных предприятий и производителей электромашиностроительной отрасли.

Решению задачи моделирования переходных процессов частотно-управляемых АД в Ansys Maxwell / Simplorer посвящено ограниченное количество работ [1–8]. Кроме того, в существующих работах не уделено внимания формированию модели плавного пуска и особенностям реализации частотного управления в имитационной модели [3, 5–7].

Имитационное моделирование переходных процессов ВСАД, рассматриваемое в настоящей работе, позволяет оценить их характеристики без изготовления натуральных образцов, что существенно удешевляет процесс выбора оптимальных параметров электрических машин во время проектирования.

Цель работы. Целью работы является формирование имитационной модели асинхронного двигателя, управляемого от преобразователя частоты и анализ полученных характеристик.

Моделирование асинхронного привода в Ansys Maxwell. Пакет Ansys включает в себя три программных продукта с помощью которых можно реализовать моделирование системы электропривода электрических машин различных типов: RMxprt, Maxwell 2D/3D и Simplorer [1–2]. Более того, одна и та же модель запускается в связке RMxprt – Simplorer, Maxwell 2D/3D – Simplorer одновременно.

Программа RMxprt позволяет выполнять инженерный расчет электрических машин на базе теории цепей. На рис. 1 показана типичная модель электрической машины на примере АД. В дальнейшем изложение материала будет рассматриваться на примере асинхронного двигателя (АД). Модель, рассчитанная в RMxprt, экспортируется в Maxwell 2D/3D для решения полевой задачи [9].

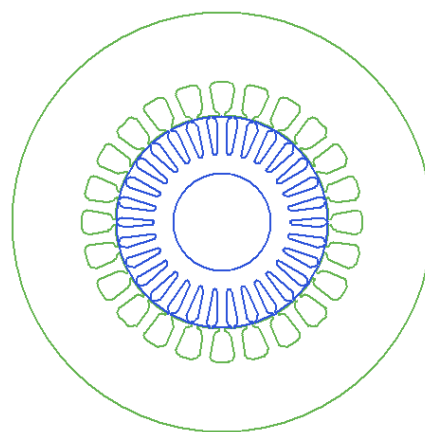


Рис. 1 – Модель АД в RMxprt

Экспортированная модель формируется полностью настроенной для решения задачи переходного процесса (transient), включая задание свойств материалов, граничные условия и условия симметрии, возбуждение и схема питания, выделение движущегося объекта с заданием момента инерции и функции сопротивления движению, а также шаблоны графиков выходных характеристик. Пример модели АД, сформированной в Maxwell 2D приведен на рис. 2.

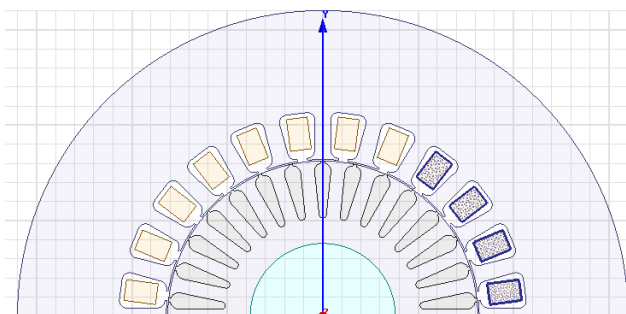


Рис. 2 – Модель АД в Maxwell 2D

Как в проекте RMxprt, так и в проекте Maxwell 2D/3D с помощью инструмента экспорта рассчитанная модель выделяется в отдельный объект и становится доступной по ссылке в программе моделирования переходных процессов Simplorer. В отличие от модели переходного процесса, получаемой в Maxwell 2D/3D, в программе Simplorer составляется полная схема система питания и управления электроприводом, включая средства измерения и контроля сигналов.

Имитационная модель ВСАД. Моделирование переходных процессов в ВСАД невозможно без имитации системы управления, построенной на базе преобразователя

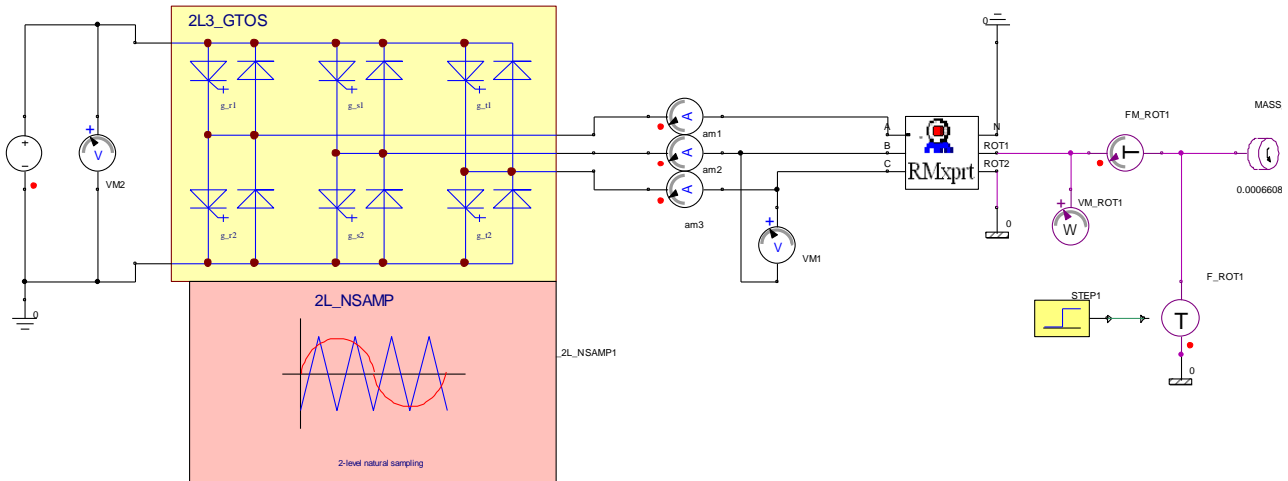


Рис. 3 – Схема плавного пуска ВСАД

частоты [4, 8]. Высокоскоростные двигатели могут запускаться в течение 5 – 10 мин до выхода на номинальную скорость. Как правило, такие машины работают в режиме S1, поэтому для управления процессом пуска достаточно возможностей скалярной системы управления с законом управления $U/f = \text{const}$.

В качестве объекта исследований был выбран четырехполюсный ВСАД производства СКБ «Укрэлектромаш», г. Харьков серии ДАВ-22 мощностью 22 кВт с частотой питающего напряжения 400 Гц. Для указанного двигателя решалась задача поиска оптимальной конструкции, при которой исключались вибрации на этапе пуска [10].

В программе RMxp1t была рассчитана модель исследуемого двигателя, которая была в виде объекта внедрена в модель Simploter.

Модель системы управления представлена на рис. 3. Для данной модели был реализован закон изменения частоты питающего напряжения, приведенный на рис. 4. На этом же рисунке приведена таблица задания частоты в различные моменты времени. Исследования показали, что для качественной имитации переходного процесса изменение частоты должно быть дискретным без автоматической аппроксимации. В противном случае происходит перерегулирование системы с выходом частоты вращения выше синхронный. Как правило, в преобразователях частоты задается шаг дискретизации не более 1:100 для систем скалярного управления.

В исследуемой модели был принят шаг изменения частоты 10 Гц.

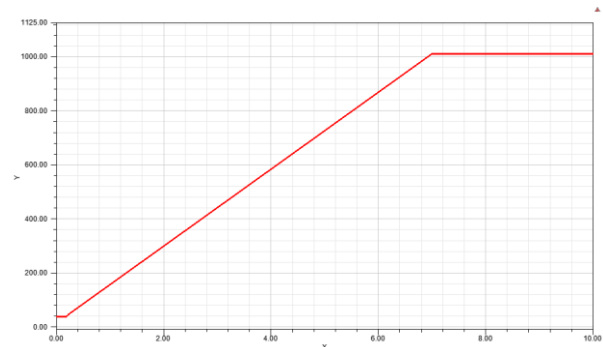


Рис. 4 – Закон изменения частоты

В систему управления входят блоки форсированного возбуждения, блок задания закона управления, блок обратной связи по скорости, блок питания, блок ШИМ, источник постоянного напряжения, управляемый инвертор, электродвигатель, механическая нагрузка на валу.

Результаты моделирования. По приведенной на рис. 3 схеме плавного пуска было выполнено моделирование электромагнитных переходных процессов более двух десятков модификаций ВСАД, имеющих различные соотношения числа пазов на статоре и роторе, а также различные формы пазов ротора. Очевидно, что реализовать натурные эксперименты для проверки дееспособности различных модификаций двигателей в настоящих условиях невозможно и чрезвычайно дорого. Между тем, имитационное моделирование позволяет, с известной долей

погрешности, выявить общие признаки наличия либо отсутствия дефектов различных модификаций. Даже если при моделировании возникнет расхождение с теми результатами, которые мог бы дать натурный эксперимент. Эта ошибка будет систематической. При этом становится возможным отбросить заведомо худшие варианты и для изготовления экспериментальных образцов выбрать не более двух, прошедших отбор по критерию минимальной величины тормозного момента при пуске двигателя. Так, на рис. 5 приведена характеристика изменения момента при пуске ВСАД, имеющая ярко выраженный тормозной момент по величине близкий к номинальному.

На рис. 6 приведена характеристика двигателя, в которой отсутствует тормозная составляющая при пуске.

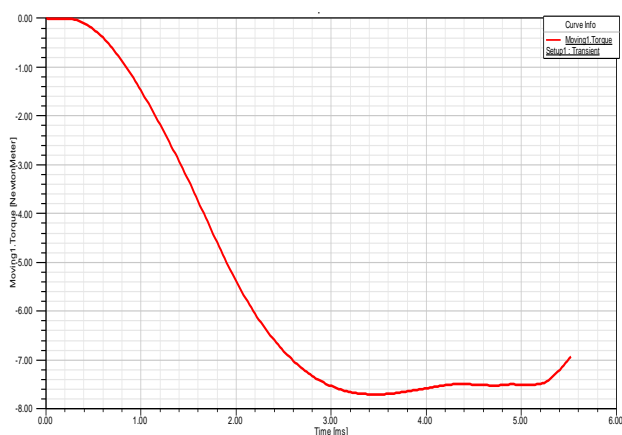


Рис. 5 – Начальный участок пусковой характеристики при наличии тормозного момента

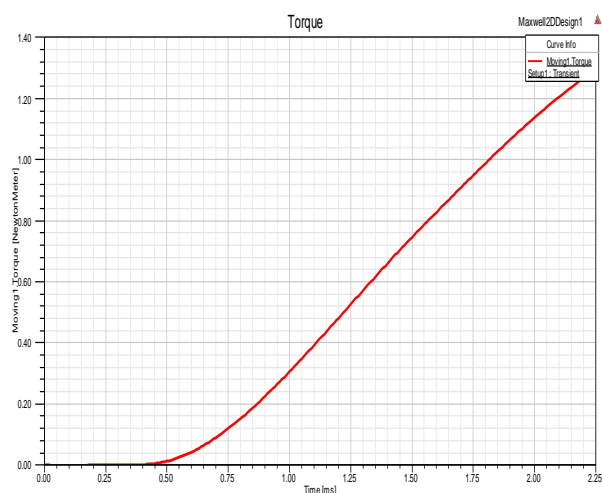


Рис. 6 – Начальный участок пусковой характеристики АД, в котором исключена проблема вибраций

По результатам моделирования были выбраны модификации ВСАД, имеющих наилучшую форму пусковых характеристик. Эти двигатели в настоящее время изготовлены на СКБ «Укрэлектромаш», г. Харьков и прошли успешные испытания в сертифицированной лаборатории, показав низкий уровень вибраций и шумов.

Выводы. Представленные в настоящей работе результаты моделирования переходных процессов высокоскоростных асинхронных двигателей показали, что применение программного комплекса Ansys Maxwell позволяет создавать имитационные модели, приближающиеся к физическим прототипам. Результаты моделирования получили высокую сходимость с результатами экспериментальных исследований.

Список использованной литературы:

1. Ansys Maxwell 2D v.15 - Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2012. – 628 p.
2. Ansys Maxwell 3D v.15 - Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2012. – 1006 p.
3. C.M. Apostoia, "Co-Simulation Platform for AC Drives Control Systems", WASET 2012-ICEMDS International Conference on Electric Machines and Drive Systems, Issue 71, Paris, France, November 28-29, 2012. – pp. 1879–1886.
4. Калачев Ю.Н. Векторное управление [текст] / Ю.Н. Калачев. – М. : Эфо, 2013. – 72 с.
5. The design of electric machines using Maxwell & Simplorer / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2013. – 48 p.
6. X. Zhao, H. Liu, J. Zhang, H. Zhang / Simulation of Field Oriented Control in Induction Motor Drive System // TELKOMNIKA, Vol. 11, No. 12, December 2013. – pp. 7555–7563.
7. K. Ramesh, Ch.R. Kumar, P.B. Murali / Modeling and implementation of vector control for Induction motor Drive // International Journal of Engineering Research and General Science Volume 3, Issue 2, March-April, 2015.
8. Electric machines considering power electronics / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2012. – 58 p.
9. Zablodskiy N. 3D magnetic field distribution in a screw double-stator induction motor

[text] / N. Zablodskiy, V. Pliugin // *CPEE 2015, Lviv.* – 2015. – pp. 239–241.

10. Заблодський М.М. САПР електромеханічних пристроїв : навчальний посібник [текст] / М.М. Заблодський, В.Є. Плюгин, К. Бур. – Алчевськ : Ладос, 2013. – Ч. 2. – 320 с.

Получено 30.04.2016.

References

1. Ansys Maxwell 2D v.15 - Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2012. – 628 p (In English).

2. Ansys Maxwell 3D v.15 - Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2012. – 1006 p (In English).

3. С.М. Apostoia, "Co-Simulation Platform for AC Drives Control Systems", *WASET 2012-ICEMDS International Conference on Electric Machines and Drive Systems*, Issue 71, Paris, France, November 28-29, 2012. – pp. 1879–1886 (In English).

4. Kalachev Ju.N. *Vektornoe upravlenie* / Ju.N. Kalachev. – М. : Jefo, 2013. – 72 p (In Russian).

5. The design of electric machines using Maxwell & Simplorer / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2013. – 48 p (In English).

6. X. Zhao, H. Liu, J. Zhang, H. Zhang / *Simulation of Field Oriented Control in Induction Motor Drive System* // *TELKOMNIKA*, Vol. 11, No. 12, December 2013. – pp. 7555–7563 (In English).

7. K. Ramesh, Ch.R. Kumar, P.B. Murali / *Modeling and implementation of vector control for Induction motor Drive* // *International Journal of Engineering Research and General Science* Volume 3, Issue 2, March-April, 2015.

8. Electric machines considering power electronics / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2012. – 58 p (In English).

9. Zablodskiy N. 3D magnetic field distribution in a screw double-stator induction motor / N. Zablodskiy, V. Pliugin // *CPEE 2015, Lviv.* – 2015. – pp. 239–241 (In English).

10. Zablodskiy M.M. *SAPR elektromekhanichnyh prystroi'v: navchal'nyj posibnyk* / M.M. Zablodskiy, V. Je. Pliugin, K. Bur. – Alchevs'k : Lado, 2013. – Ch. 2. – 320 p (In Russian).



Плюгин Владислав
Евгеньевич,
канд. техн. наук, доцент,
доцент каф. электрических
машин НТУ «ХПИ», г.
Харьков, 61002,
ул. Кирпичева, 21.
тел. 099-213-07-48
E-mail:
vlad.plyugin@gmail.com



Егоров Андрей
Владимирович,
канд. техн. наук, ассистент
каф. электрических машин
НТУ «ХПИ», г. Харьков,
61002, ул. Кирпичева, 21.
тел. 098-851-84-94
E-mail:
yehorov.andrii@gmail.com



Шилкова Лариса
Васильевна,
старший преподаватель
каф. электрических машин
НТУ «ХПИ», г. Харьков,
61002, ул. Кирпичева, 21.
тел. 096-717-65-82
E-mail: larisa_lv@ukr.net



Потоцкий Дмитрий
Васильевич,
ассистент каф. электриче-
ских машин НТУ «ХПИ»,
г. Харьков, 61002,
ул. Кирпичева, 21.
тел. 068-398-99-86
E-mail: magnoi@mail.ru