

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЬНО- ИНДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МИКРОКОМПРЕССОРОВ

О.Я. Карпович
Ассистент*

Контактный тел.: (048) 720-91-71
E-mail: olekar@mail.ru

О.А. Онищенко

Доктор технических наук, профессор*
Контактный тел.: (048) 720-91-71
E-mail: olegoni@mail.ru

*Кафедра электротехники и электронных устройств
Одесская государственная академия холода
ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65029

Проаналізовано сучасний стан, особливості застосування регульованих вентильно-індукторних електроприводів (ВИП) мікрокомпресорів. Запропоновано функціональну схему ВИП з мінімальним числом настановних елементів. Представлено покроковий алгоритм, результати моделювання ВИП мікрокомпресора холодильної установки

Ключові слова: вентильно-індукторний електропривод, мікрокомпресор, моделювання

Проанализировано современное состояние, особенности применения регулируемых вентильно-индукторных электроприводов (ВИП) микрокомпрессоров. Предложена функциональная схема ВИП, характеризующаяся минимальным числом установочных элементов. Представлен пошаговый алгоритм, результаты моделирования ВИП микрокомпрессора холодильной установки

Ключевые слова: вентильно-индукторный электропривод, микрокомпрессор, моделирование

The modern state analysis, functional diagram, characteristics of controlled switched-reluctance drive (SRD) for microcompressor are considered. Stepwise algorithm, SRD simulation results for microcompressor of refrigeration unit are submitted

Key words: switched-reluctance drive, microcompressor, simulation

Введение, постановка проблемы, анализ публикаций

Для разнообразных систем автоматического управления малыми холодильными и воздушными микрокомпрессорами, а также для устройств медицинской и офисной техники, различных механизмов бытового назначения, весьма востребованы электроприводы небольшой мощности (единицы и десятки ватт). Обычно к таким микроэлектроприводам выдвигаются невысокие требования к диапазону регулирования скорости ($D \in 1,5...10$), но к надежности и цене – чрезвычайно жесткие.

Часто технические требования к названным электроприводам предусматривают возможность питания от однополярного источника постоянного тока, минимальное число установочных электронных элементов и датчиков, достаточно высокую жесткость механических характеристик, работу во взрывоопасных средах.

В таких условиях использование машин постоянного тока невозможно, а применение серийных частотных преобразователей с асинхронными двигателями экономически нецелесообразно.

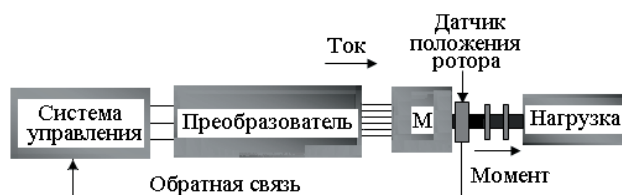


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема вентиляльно-индукторного электропривода

Как отмечено в работах [1-4], вентильно-индукторные электроприводы (ВИП) – современное, альтернативное асинхронным и различного типа постоянного тока электроприводам решение для систем автоматизированного управления (САУ) технологическими процессами в различных производствах [1, 2], в том числе и малой холодильно-компрессорной технике. Основа таких САУ – вентильно-индукторные двигатели (ВИД), характеризующиеся простотой и низкой стоимостью конструкции [4, 5]. Однако для недорогого в серийном изготовлении ВИД необходима тщательная подготовка производства системы управления электроприводом, обеспечивающей

плавное регулирование скорости при низкой стоимости составных электронных узлов и датчиков.

Решение указанной актуальной задачи усложняется из-за резко нелинейных неаналитических зависимостей, описывающих работу ВИД – момента, потокосцепления, тока [3, 4]. Следует подчеркнуть, что ВИД относятся к классу электромеханотронных устройств [5], в которых интегрирована силовая и управляющая электроника, сенсоры и механические узлы (см. рис. 1), что позволяет при его конструировании, исследованиях и разработке математических моделей (ММ) активно использовать принципы декомпозиции и модульности.

Структурно ВИП содержит систему управления, чаще всего на микропроцессорной основе, электронный инвертор (коммутатор). Электромеханический преобразователь (ВИД) обеспечивает преобразование электрической энергии, поступающей от электронного коммутатора, в механическую [4].

САУ генерирует сигналы управления инвертором, формирующем импульсное напряжение на фазах ВИД в функции сигналов, поступающих от датчика углового положения ротора (ДПР). Конструктивно ВИД представляет собой пакеты листов магнитомягкого материала: магнитопроводы статора и ротора с явно выраженными полюсами. Катушки обмотки якоря располагаются на полюсах магнитопровода статора, причем катушки противоположных полюсов соединены последовательно и образуют фазные секции. Число фаз определяет число силовых ключей инвертора и, соответственно, сложность схемы управления. В зависимости от технологического назначения ВИД и предъявляемых к нему требований изготавливается различное число полюсов статора и ротора. Очевидная конструктивная простота [3-5] является основным достоинством электромеханического преобразователя на основе ВИД. Именно этот фактор позволяет, с обеспечением высокой надежности, существенно снизить затраты на его изготовление при серийном производстве.

Поскольку однозначных решений по созданию конструкции ВИД нет [2, 4, 5], то возникает множество проектных вариантов, неразрешимых без предварительного моделирования и рассмотрения альтернативных систем управления. При этом нужно дать оценку качеству процессов управления и уровням пульсаций момента, решить задачи устойчивости, выбора режимов коммутации и определения пиковых нагрузок на силовые элементы, оптимизировать конструкцию датчиков скорости и положения ротора. Так как токи в обмотках ВИД оказывают основное влияние на формирование результирующего электромагнитного момента (нелинейно зависящего от тока), моделирование процессов управления токами фаз ВИД – основа для оптимизации параметров всего ВИП.

На Украине ВИП лишь начинает завоевывать авторитет в промышленности [6] и отечественная научная школа [5-8] только приступила к активным исследованиям в области проектирования и оптимизации основных параметров конструкции ВИД, систем управления ими. В настоящее время не только в Украине, но и во всем мире не существует типовых, аналогичных асинхронному и постоянного тока, решений относительно методов расчета таких резко

нелинейных систем, как ВИП. Не до конца проработаны задачи, связанные с организацией структуры системы управления ВИД, конфигурацией силовой и управляющей частей, выбора элементной базы. Также не до конца решены задачи повышения качества динамических режимов и другие, крайне актуальные при серийном производстве ВИП.

Из-за ограниченного опыта создания и эксплуатации ВИП, значительная роль в получении базовых представлений об особенностях их работы принадлежит компьютерному моделированию. При современном уровне развития информационных технологий отлаженная компьютерная модель ВИП позволяет исследовать в различных режимах не только динамические свойства самого двигателя, но и всей системы управления электроприводом, причем с учетом взаимного влияния всех элементов электромеханотронной системы, особенностей способов и алгоритмов управления ею.

Целью статьи является представление разработанного авторами алгоритма создания имитационных моделей недорогих при серийном производстве ВИП, позволяющих синтезировать высокоэффективные системы управления микрокомпрессорами различного назначения.

Основной материал

Предварительными экспериментальными исследованиями [9, 10] установлен, что силовой инвертор, сконструированный на основе схемы Миллера [11], датчик скорости, совмещенный с максимально упрощенным датчиком положения ротора [12] и общий для всех фаз датчик тока, позволяют заметно снизить суммарную стоимость ВИП.

Представим своеобразный алгоритм создания имитационной модели ВИП с максимально-возможным учетом не только свойств ВИП, но и особенностей выбранной среды моделирования – *Matlab/Simulink* [13]. Разработанная модель [14, 15] ВИП учитывает нелинейности магнитной системы ВИД, особенности дискретной работы его фаз, изменение собственных электромагнитных параметров, особенности работы герметичного компрессора [8] и другие существенные при проектировании свойства ВИП, предназначенных для применения в микрокомпрессорах.

Алгоритм разработки такой модели ВИП содержит несколько основных этапов.

Первоначально, на основе заданной геометрии, свойств материалов и обмоточных данных ВИД, рассчитывается его магнитная система. Расчет проводится методом конечных элементов (например, в среде FEMM) для ряда угловых положений ротора относительно зубцов статора [16]. В результате расчета получают, в виде массивов значений, кривые намагничивания фазы двигателя и моментов в функции пространственного положения ротора и амплитуды тока якоря.

На втором этапе, используя методологию представления динамических систем в среде моделирования *Matlab/Simulink* [13, 17-22], создается базовая функциональная нелинейная модель ВИП [14]. В наиболее общем виде такая модель представлена на

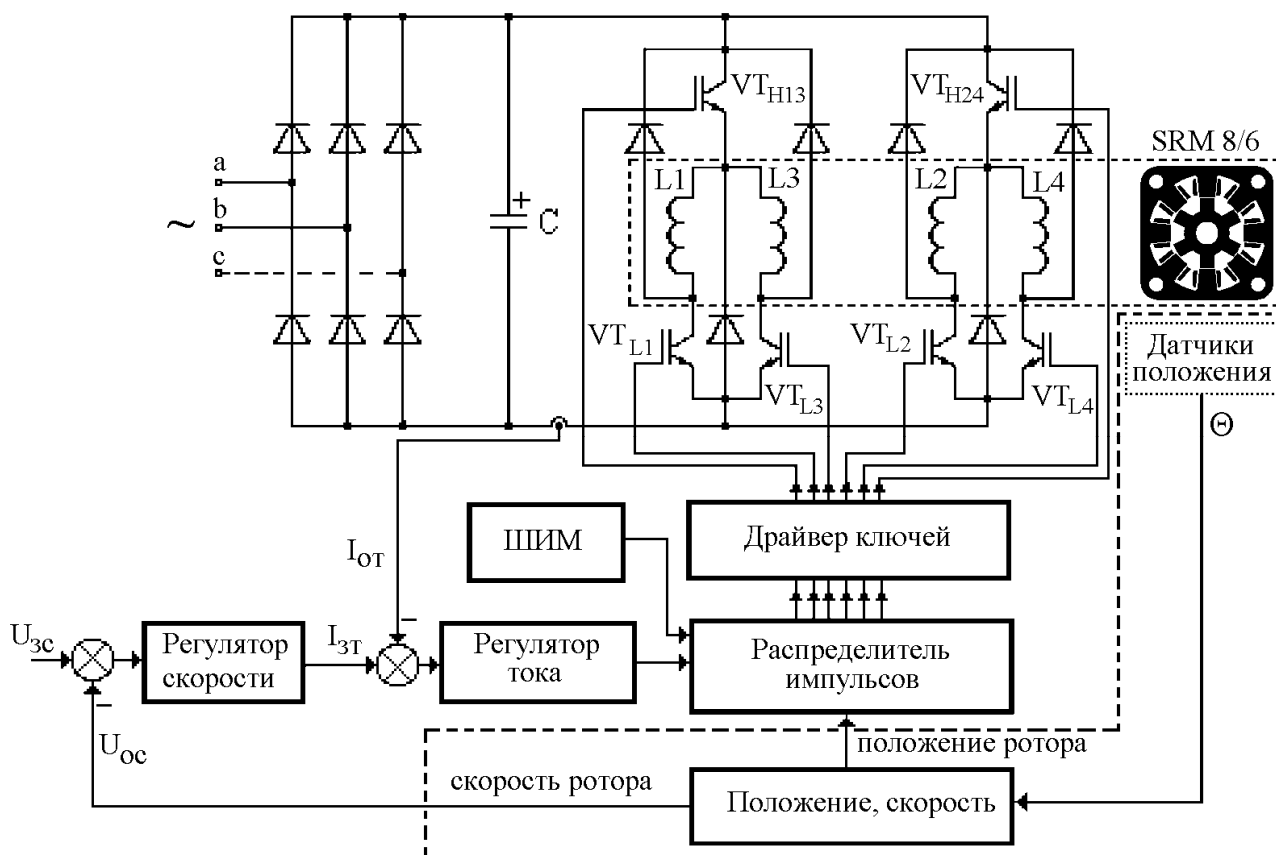


Рис. 2. Базовая функциональная схема модели и экспериментального образца ВИП

рис. 2 и строится на основе принципов подчиненного регулирования координат с внутренним контуром тока и внешним контуром скорости.

Модель ВИП содержит субблок-модель ВИД, в которую включены результаты расчетов, полученные методами конечных элементов [16], субблок-модель силового инвертора [11] с ключами VT и диодами VD, субблок-модель системы управления с блоком логики (распределения импульсов) [19, 23], субблоки моделей датчиков положения и скорости ротора [12], регуляторов координат [21], источника питания и статической нагрузки [8], характеризующей работу герметичного компрессора.

На третьем этапе производится настройка субблоков датчиков и системы управления ВИП при заданной частоте вращения двигателя, определяются (синтезируются) параметры регуляторов координат, формируются алгоритмы управления и, при необходимости, корректируются углы включения и выключения фаз ВИД [23].

На этом этапе имеются широкие возможности для сравнения различных способов и алгоритмов управления ключами и введения соответствующей коррекции, например, обеспечивающей снижение амплитуды пульсаций момента и скорости.

На четвертом этапе оценивается работа ВИП при различных сигналах задания скорости, исследуется поведение электропривода при изменениях нагрузки на валу двигателя, при изменении питающего напряжения и других режимах. Рассчитываются динамические, механические и энергетические характеристики электропривода.

На пятом этапе решаются задачи верификации результатов моделирования. Этот этап может использовать, в зависимости от особенностей решаемой задачи и наличия экспериментального оборудования, различные методы верификации ММ: энергетического баланса, сопоставления с экспериментальными динамическими и статическими характеристиками, оценок зависимости потокосцепления от углового положения ротора [7].

С целью достижения высокой скорости вычислений в совокупности с приемлемой погрешностью моделирования, на первых этапах нелинейные зависимости аппроксимируются нестандартными методами [24], не входящими в состав среды *Matlab*.

В виде примера, на рис. 3 приведены некоторые из результатов моделирования ВИП герметичного микрокомпрессора малой холодильной установки при пониженной ее производительности. На рисунке показаны пройденный валом ВИД микрокомпрессора путь S, токи I четырех фаз ВИД, электромагнитный M и статический M_c моменты, скорость ω.

Так, из графиков отчетливо видны пульсации скорости ($\Delta\omega \approx 12$ рад/с) и момента, обусловленные нелинейным моментом сопротивления M_c микрокомпрессора, являющегося сложной функцией углового положения ротора, режима работы компрессора и особенностями формирования САУ результирующего электромагнитного момента ВИД. Следует отметить, что граничный уровень пульсаций скорости обычно ограничивается нормативными требованиями к герметичным микрокомпрессорам.

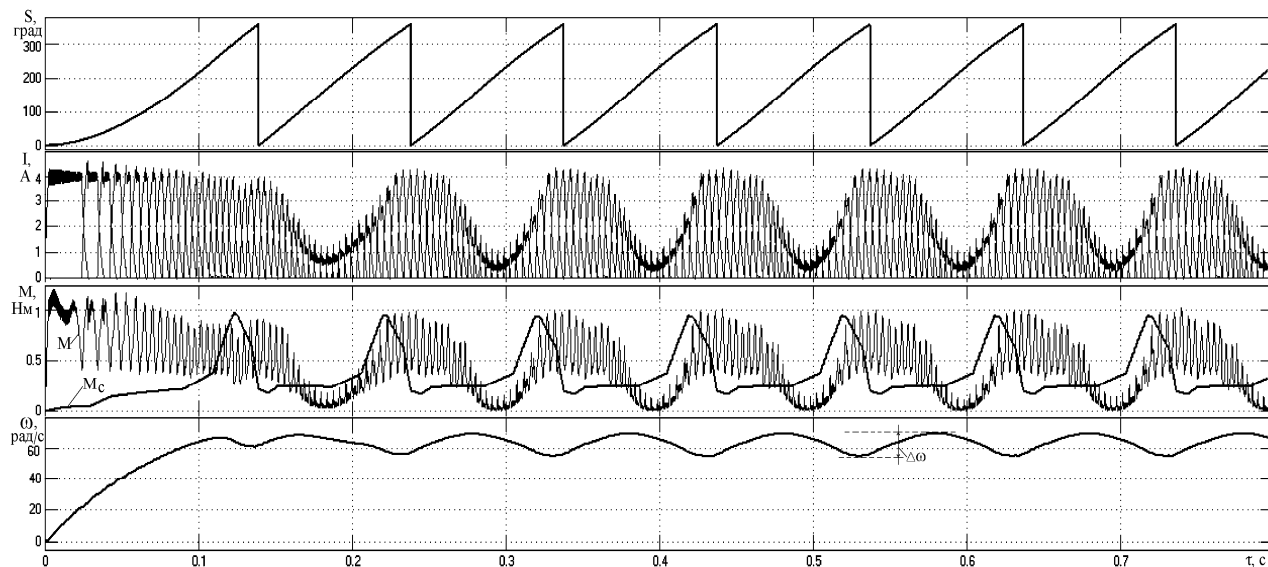


Рис. 3. Результаты моделирование процесса пуска ВИП герметичного микрокомпрессора до скорости $\omega \approx 0,45 \cdot \omega_{\text{НОМ}}$

Анализ динамических режимов (рис. 3) показывает, что для рассмотренной схемы ВИП (рис. 2) дальнейшее уменьшение скорости микрокомпрессора, а соответственно и расширение диапазона изменения его производительности, практически невозможны. Расширение же диапазона изменения производительности за счет увеличения момента инерции ВИД путем установки дополнительного маховика является в настоящее время нерациональным решением [8].

Эксперименты авторов и анализ ряда публикаций подтверждают возможность применения в рассмотренной схеме ВИП способов управления на основе реализации частичной инвариантности к моменту сопротивления и/или введения в контур управления сигнальной самонастройки с эталонной моделью, обеспечивающих снижение пульсаций скорости микрокомпрессора.

Выводы

1. Приведенные в статьях [11, 15, 18-20] математические модели, результаты моделирования и

экспериментов, подтверждают работоспособность описанного выше алгоритма моделирования ВИП для базовой (рис. 2) и близкой к ней системам управления ВИП.

2. Разработанные математические модели позволяют на этапах предварительного конструирования ВИП осуществлять синтез законов управления, в том числе – фазой ВИД на всем периоде ее коммутации.

3. Эксперименты [7, 9, 11] подтверждают, что ВИП относится к системам высокой надежности и высокой энергетической эффективности и поэтому весьма перспективно их применение для регулирования производительности микрокомпрессоров холодильно-компрессорных установок различного типа и назначения [8].

4. Анализ результатов моделирования герметичного микрокомпрессора малой холодильной установки позволяет утверждать, что для расширения диапазона регулирования его производительности необходимо проведение дополнительных исследований по совершенствованию САУ ВИП, направленных на снижение уровня пульсаций скорости.

Литература

1. Захаров А.А. Перспективы внедрения вентильно-индукторного электропривода / А.А. Захаров // Конструктор. Машиностроитель. – 2008. – №5. – С. 6-9. [Электронный ресурс]: http://www.konstruktor.net/Articles/Pdf/valve_inductor_electrical_drive.pdf.
2. Бычков М.Г. Вентильно-индукторный электропривод: современное состояние и перспективы развития / М.Г. Бычков // Рынок Электротехники. - 2007. – №2. – С.23-28. [Электронный ресурс]: <http://www.marketelectro.ru/magazine/readem0207/10>.
3. Кузнецов В.А. Вентильно-индукторные двигатели. Учебное пособие / В.А. Кузнецов, В.А. Кузьмичев. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 57 с.
4. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. – CRC Press, 2001. – 398 p.
5. Ткачук В.И. Електромеханотроніка: Навч. посібн. / В.И. Ткачук. – Львів: Львівська політехніка, 2001. – 404 с.
6. ООО «Завод «Электротехника»». [Электронный ресурс]: www.blpm-motors.com.

7. Идентификация параметров вентильных реактивных электродвигателей / О.А. Онищенко, А.С. Порайко, И.Н. Радимов, В.В. Рымша // Вестник НТУ "ХПИ". – 2005. – №36. – С. 57-62.
8. Онищенко О.А. Система управления электроприводом поршневого компрессора холодильной установки / О.А. Онищенко // Электромашинобудування та електрообладнання. – 2005. – №65. – С. 23-28.
9. Карпович О.Я. Экспериментально-отладочная схема управления вентильно-индукторным электродвигателем / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко, А.С. Порайко // Научн. труды Донецкого национ. технич. ун.-та. Серия "Электротехника и энергетика". – 2003. – №67. – С. 152-155.
10. Карпович О.Я. Двухквadrанный вентильно-индукторный электропривод / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко, И.Н. Радимов // Вісник КДПУ. – 2003. – №5(22). – С. 56-60.
11. Карпович О.Я. Моделирование силового инвертора вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко, И.Н. Радимов // Техническая электродинамика. Ч.2. Темат. вып. – 2004. – С. 87-88.
12. Карпович О.Я. Особенности реализации датчика обратной связи по скорости и положению в вентильно-индукторном электроприводе / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // Вестник НТУ "ХПИ". – 2003. – №11. – С. 65-70.
13. Карпович О.Я. Среда Матлаб – информационная основа разработки промышленных вентильно-индукторных электроприводов / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // Матер. II-й межд. науч.-техн. конф. "Современные информационные технологии в образовании и промышленности". – Николаев: УГМТУ, 2003. – С. 26-28.
14. Карпович О.Я. Базовая нелинейная модель вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // Вестник НТУ "ХПИ". – 2003. – №10. – Т.2. – С. 396-397.
15. Карпович О.Я. Компьютерное исследование динамических свойств вентильно-индукторного двигателя / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – №4. – С. 42-45.
16. [Электронный ресурс]: <http://femm.foster-miller.net/wiki/HomePage>.
17. Карпович О.Я. Разработка моделей с упрощенными контурами тока для вентильно-индукторного микроэлектропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // Вестник НТУ "ХПИ". Серия "Электротехника, электроника и электропривод". – 2004. – №43. – С. 91-94.
18. Карпович О.Я. Модель и настройка контура тока вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // Научн. труды Донецкого национ. технич. ун.-та. Серия "Вычислительная техника и автоматизация". – 2005. – №88. – С. 23-29.
19. Карпович О.Я. Разработка нелинейной модели двухквadrантного вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // Труды межд. науч.-техн. конф. "Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении – ИКТМ`2003". – Харьков: Нац. аэрокосмич. ун.-т "ХАИ", 2003. – С. 99.
20. Карпович О.Я. "Быстрая" нелинейная модель вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // Матер. межд. науч.-техн. конф. "Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах". – Севастополь: СевНТУ, 2004. – С. 28-29.
21. Карпович О.Я. Методика настройки регулятора скорости вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко / Матер. XI-й межд. конф. по автоматич. управлению. "Автоматика-2004" в 7-ми томах. – К.: Нац. ун.-т пищевых технологий, 2004. – Т.2. – С. 29.
22. Карпович О.Я. Влияние углов коммутации на механические характеристики вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // Матер. межд. науч.-техн. конф. "Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах". – Севастополь: СевНТУ, 2005. – С. 23-24.
23. Карпович О.Я. Исследование электромеханических свойств вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович // Электромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – №66. – С. 59-61.
24. Онищенко О.А. Представлення кривих намагнічування при моделюванні мікрокомпресора з вентильно-індукторним електродвигуном / О.А. Онищенко // Вестник Херсонского национ. технич. ун.-та. – 2006. – №2(25). – С. 366-371.