

УДК 681.5:82.83

к.т.н. Карпук И.А.,
к.т.н. Щелоков А.Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

АСИНХРОННЫЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ КАСКАД, УПРАВЛЯЕМЫЙ ПО РОТОРУ, С ПОВЫШЕННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

Разработан регулируемый электропривод с использованием источника тока в роторной цепи асинхронной машины с фазным ротором. Приведены результаты цифрового и физического моделирования.

Ключевые слова: асинхронно-вентильный каскад, асинхронная машина, источник тока, коэффициент мощности, релейная система управления.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Регулируемые электроприводы (ЭП) завоевывают области применения нерегулируемых как для обеспечения технологических характеристик, так и с целью энергосбережения. При этом предпочтение отдается асинхронным ЭП, поскольку асинхронные машины (АМ) имеют лучшие массогабаритные показатели, более высокую надежность и срок службы, проще в обслуживании и ремонте.

Разработанные частотно-регулируемые ЭП, решая большинство технологических задач с приемлемым качеством, уступают по надежности ЭП на базе АМ с фазным ротором (ФР). Последние, имея практически постоянный по величине магнитный поток, могут обеспечивать высокие регулировочные, динамические и энергетические показатели как ЭП постоянного тока с машинами независимого возбуждения.

В настоящее время целый ряд механизмов (подъема и передвижения в кранах, рольганги различного назначения, штабелеры, манипуляторы и др.) оборудованы такого рода ЭП. Обеспечивая высокую надежность работы и хорошую динамику, они зачастую имеют или малый диапазон регулирования скорости, или низкие энергетические показатели, или очень чувствительны к различного рода возмущениям.

Постановка задачи. Учитывая вышесказанное, задача разработки ЭП на базе АМ с ФР с высокими энергетическими и

динамическими показателями АМ, который обеспечивает малую чувствительность к параметрическим и координатным возмущениям, является весьма актуальной, поскольку предполагает высокий экономический эффект.

Изложение материала и его результаты. Авторами предложено использовать систему ЭП на базе асинхронного вентильного каскада (АВК), проведен анализ и сравнение нескольких вариантов построения асинхронного ЭП на базе АВК, [1].

Недостатком большинства вариантов построения ЭП с источниками напряжения (ИН) является необходимость согласования выходного напряжения ИН с рабочими напряжениями роторной цепи АМ с помощью трансформатора. Источники тока лишены этого недостатка, поскольку автоматически подстраиваются своими выходными напряжениями к изменениям напряжений АМ.

Поэтому авторами предложен вариант построения системы ЭП, особенностью которого является использование в качестве сетевого преобразователя (СП) регулируемого источника тока (РИТ), построенного на полностью управляемых вентилях (GTO, T3 и др.) (рис. 1) [1, 2, 3].

Отличительной особенностью СП U₂ в данной системе является с одной стороны полная управляемость, а с другой – работа в режиме источника тока с использованием релейного принципа управления, – преобразователь работает как РИТ.

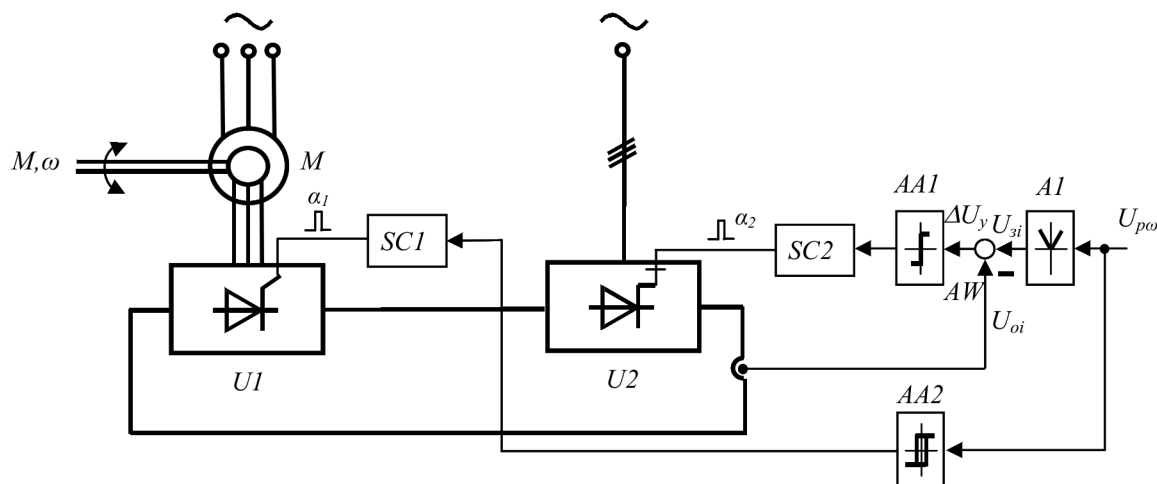


Рисунок 1 – Система ЭП на базе АВК с использованием РИ

Это обеспечивает практически предельное быстродействие в регулировании выпрямленного тока ротора, т.е. момента и скорости, а также малую чувствительность контура тока к параметрическим возмущениям, возникающим в этом контуре, т.е. стабильность регулировочных характеристик РИТ.

За счет отсутствия трансформатора и сглаживающего дросселя в цепи выпрямленного тока, которые присутствуют в традиционных системах ЭП на базе АВК, достигается значительное уменьшение массогабаритных показателей каскада, а количество каналов системы управления вентилями равно таковому в традиционном варианте.

Роторный преобразователь (РП) U1 для обеспечения реверса АМ по ротору также построен на управляемых вентилях.

Предложены также варианты построения системы ЭП на базе АВК, электромагнитно совместимой с питающей сетью, и системы ЭП с повышенной перегрузочной способностью [4,5].

Получены аналитические зависимости для ЭМХ и МХ ЭП на базе АВК с управляемым РП при использовании СП с фазовым управлением и РИТ как в разомкнутой, так и в замкнутой системе ЭП [6].

При использовании в качестве СП источника тока момент машины определяется по общеизвестному выражению:

$$M = \tilde{N} \hat{O} I_p \cos \phi_p, \quad (1)$$

где $C\Phi$ – магнитный поток АМ;

I_p – действующее значение тока ротора;

ϕ_p – угол сдвига роторного тока относительно э.д.с. ротора.

Поскольку при использовании РИТ в качестве СП кривые роторных токов центрированы относительно кривых э.д.с., то $\cos \phi_p$ стремится к единице, и после дополнительных преобразований уравнение механической характеристики системы ЭП на базе АВК с РИТ в разомкнутом состоянии выглядит так (о.е.):

$$\dot{M}_p = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_{1i}} \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_{1i}} \frac{I_{de}}{k_{ni}}, \quad (2)$$

где $\dot{I}_2 = I_2 / I_{2n}$ – величина (о.е.) тока роторных обмоток;

I_{2n} – номинальная величина этого тока, А;

I_{du} – выпрямленный ток РИТ.

Авторами проведен анализ и сравнение энергетических показателей существующих и предложенной систем каскадного ЭП [7]. Наиболее простым и достаточно точным методом определения к.п.д. вентильного каскада является метод определения потерь [8]. Сущность этого метода состоит в определении потерь в элементах

привода и подсчете полных потерь в приводе ΔP .

Для двигательного режима:

$$\eta_{\varepsilon} = \frac{P_{\text{ii}\ddot{e}}}{P_{\text{ii}\ddot{e}} + \Delta P}, \quad (3)$$

где $P_{\text{пол}}$ – полезная мощность на валу АМ;

Постоянные потери асинхронного двигателя находятся из равенства:

$$\Delta P_{\text{ii}\ddot{o}} = P_i \frac{1 - \eta_{\ddot{a}}}{\eta_{\ddot{a}}} - \dot{I}_i \omega_{01} s_i \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right), \quad (4)$$

где P_H – номинальная мощность АМ, Вт;

$\eta_{\ddot{o}}$ – номинальный к.п.д. АМ;

M_H – номинальный момент АМ, $H \cdot m$;

s_H – номинальное скольжение АМ;

r_1 – сопротивление статора, Ом;

r_2' – сопротивление ротора, приведенное к статору.

Переменные потери определяем, приводя все потери к роторной цепи АМ:

$$\Delta P_{\text{ii}\ddot{o}} = I_d^2 R_d + I_d \Delta U. \quad (5)$$

Полученные аналитические зависимости представлены в графической форме на рисунке 2 (квадратные маркеры показывают экспериментальные данные).

Анализируя полученные зависимости, отметим, что значения к.п.д. традиционного и предложенного вариантов построения системы ЭП коррелируются со значениями, приведенными в литературе, а также что к.п.д. системы ЭП на базе АВК с РИТ на несколько процентов (2–5%) выше, чем традиционной.

Для расчета коэффициента мощности системы ЭП на базе АВК с РИТ получено следующее выражение:

$$coefm = v \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{I_0^2}{M}}}, \quad (6)$$

где $v = 0.995$ – коэффициент, учитывающий искажение формы кривых первичных токов двигателя и трансформатора;

I_0 – намагничивающий ток.

Отметим, что коэффициент мощности системы ЭП на базе АВК с РИТ не зависит от скорости ЭП.

Авторами проведен синтез релейных систем управления (РСУ) для различных систем ЭП на базе АВК как при абсолютно жестких кинематических связях, так и при учете упруго-вязких свойств кинематических связей, осуществлен синтез наблюдателя состояния [9].

Для обеспечения необходимой динамики, квазиинвариантности к параметрическим и возмущающим воздействиям авторами были синтезированы РСУ с помощью двух методов структурно-алгоритмического синтеза РСУ – аналитического конструирования регуляторов (АКР) и обратной задачи динамики (ОЗД).

Результаты цифрового моделирования системы ЭП на базе АВК с РИТ приведены на рисунке 3.

Для подтверждения адекватности полученных ранее результатов цифрового моделирования реальным физическим процессам была создана лабораторная установка и проведены экспериментальные исследования [10].

Заданием эксперимента было создание реверсивного ЭП переменного тока на базе АВК, управляемого исключительно по ротору.

Экспериментальная установка состояла из АМ с ФР, управляемого РП, сетевого вентильного преобразователя в виде РИТ, блока обработки информации на основе аналого-цифрового преобразователя и РС-компьютера с необходимым программным обеспечением. Результаты экспериментальных исследований (кривые скорости и выпрямленного тока системы ЭП) приведены на рисунке 4.

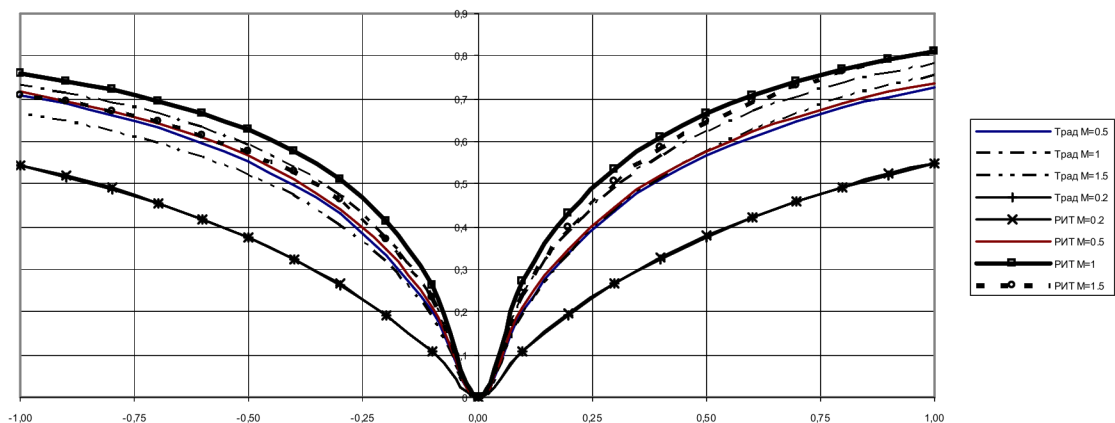


Рисунок 2 – Сравнение зависимостей к.п.д. от скорости каскадного ЭП при традиционной схеме включения и использовании РИТ

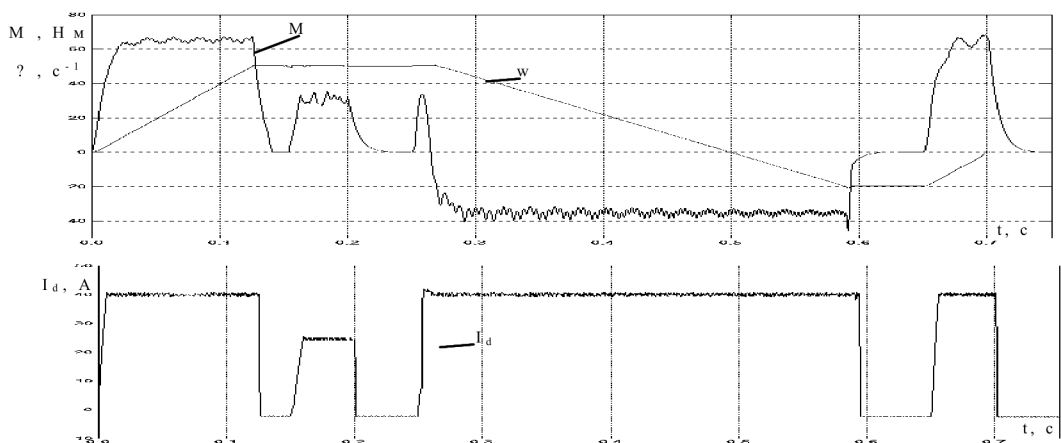


Рисунок 3 – Осциллограммы переходных процессов с использованием РСУ

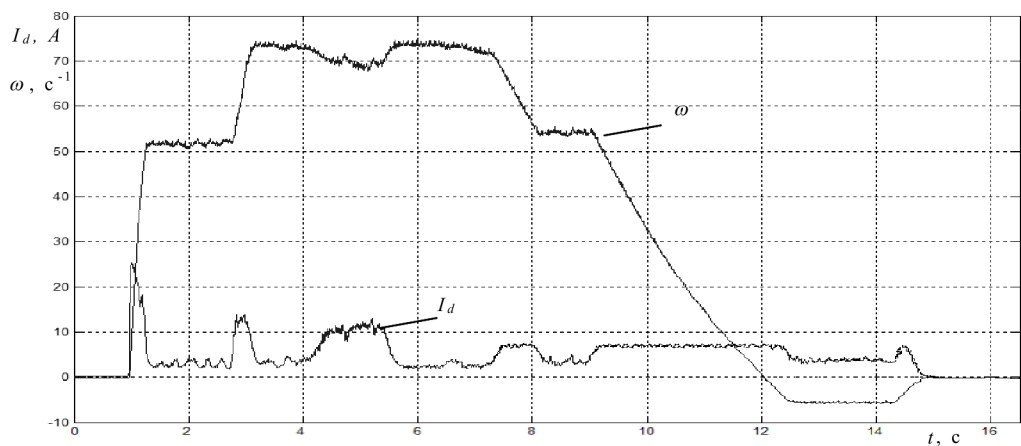


Рисунок 4 – Результаты экспериментальных исследований системы ЭП на базе АВК

Выводы и направление дальнейших исследований. Разработанный асинхронный ЭП позволяет получить высокие энергетические (коэффициенты мощности сетевого и роторного преобразователя могут достигать единицы, привод электромагнитно совместим с питающей сетью) и динамические показатели (предельное быстродействие контура тока благодаря РИТ). Рекомендации по их выбору, технические решения могут быть использованы при проектировании электроприводов переменного тока с малой чувствительностью к параметрическим и координатным возмущениям.

Библиографический список

1. Пат. 63254 А. МКІ 7 Н02Р7/62. Электропривід змінного струму / Ю. П. Самчелеєв, І. С. Шевченко, Ю. В. Скурятин, І. А. Карпук. — № 2003032298; заявл. 17.03.2003; опубл. 15.01.2004, Бюл. № 1.
2. Шевченко І. С. Асинхронний вентильний каскад на базі регульованого джерела струму / І. С. Шевченко, І. А. Карпук, Ю. П. Самчелеєв, Ю. В. Скурятин // Збірник наукових праць Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Технічні науки. — Луганськ, 2004. — С. 143–149.
3. Пат. № 73605. МКІ 7 Н02Р7/62. Электропривід змінного струму / І. С. Шевченко, Ю. П. Самчелеєв, Ю. В. Скурятин, І. А. Карпук. — № 2003032539; заявл. 25.03.2003; опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8.
4. Карпук І. А. Широкорегульований асинхронний електропривід, електромагнітно сумісний з живильною мережею / І. А. Карпук, Д. І. Морозов, І. С. Шевченко, Ю. П. Самчелеєв // Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика. — Харків : НТУ «ХПІ», 2005.
5. Карпук І. А. Асинхронний вентильний каскад з синусоїдальними роторними токами і високим коефіцієнтом потужності / І. А. Карпук, Д. І. Морозов, Ю. В. Скурятин, І. С. Шевченко, Ю. П. Самчелеєв // Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика. — Харків : НТУ «ХПІ», 2003. — № 10. — Т. 2. — С. 401–405.
6. Зеленов А. Б. Асинхронний електропривід на базі машини подвійного живлення / А. Б. Зеленов, І. С. Шевченко, І. А. Карпук // Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси і системи. — 2000. — № 1(6). — С. 57–64.
7. Карпук І. А. Оцінка енергетичних показників електроприводу на базі АВК з регульованим джерелом струму в роторній ланці / І. А. Карпук, І. С. Шевченко, Ю. П. Самчелеєв // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету : Наукові праці КДПУ. — Кременчук : КДПУ, 2006. — Вип. 4/2006 (39); Частина 1. — С. 79 – 81.
8. Онищенко Г. Б. Асинхронний вентильний каскад / Г. Б. Онищенко. — М. : Энергия, 1967. — 150 с.
9. Карпук І. А. Синтез системи управління регульованого асинхронного ЕП з джерелом струму в роторній ланці / І. А. Карпук, І. С. Шевченко // Збірник наукових праць «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика». — Харків : НТУ «ХПІ», 2005. — № 45.
10. Карпук І. А. Експериментальні дослідження реверсивного асинхронного електропривода, управляемого по ротору / І. А. Карпук, І. С. Шевченко // Електромашинобудування та електрообладнання. — Київ : «Техніка», 2006. — № 66. — С. 54–55.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. ДонГТУ Комаревцевой Л.Н.,
Главным энергетиком ПАО «АМК» Диковичем Ю.А.*

Статья поступила в редакцию 23.05.16.

к.т.н. Карпук І.А., к.т.н. Щолоков А.Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

**АСИНХРОННИЙ ВЕНТИЛЬНИЙ КАСКАД, КЕРОВАНІЙ ПО РОТОРУ, З
ПІДВИЩЕНИМИ ДИНАМІЧНИМИ І ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ**

Розроблено регульований електропривод з використанням джерела струму в роторному ланцюзі асинхронної машини з фазним ротором. Наведено результати цифрового і фізичного моделювання.

Ключові слова: асинхронно-вентильний каскад, асинхронна машина, джерело струму, коефіцієнт потужності, релейна система управління.

PhD Karpuk I.A., PhD Shchiolokov A.G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

**WOUND-ROTOR SLIP RECOVERY SYSTEM WITH IMPROVED DYNAMIC AND
ENERGY INDICES**

A regulated electric drive using a current source in the rotor circuit of the asynchronous machine with wound rotor has been developed. The results of the digital and physical modeling are presented in the paper.

Key words: wound-rotor slip recovery system, induction machine, a source of current, power factor, relay control system.