

## ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ. ЧАСТЬ 2: РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

С. М. Пересада, д.т.н., проф., С. Н. Ковбаса, к.т.н., доц., А. Ю. Онанко, асп.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, 03056, г. Киев, Украина

E-mail: sergei.peresada@gmail.com, skovbasa@ukr.net

Представлены результаты сравнительного экспериментального тестирования алгоритмов частотного управления асинхронными двигателями. Показан эффект компенсации снижения перегрузочной способности при работе в зоне низких скоростей, а также форсировки процесса возбуждения асинхронного двигателя.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, частотное управление, экспериментальные исследования.

**Введение.** Методы частотного управления асинхронным двигателем (АД) нашли широкое распространение в промышленности благодаря своей простоте и надежности. Вместе с тем, при разомкнутом частотном управлении электромеханическая система на основе АД имеет ряд существенных недостатков, таких, как заниженный критический момент при работе в зоне низких скоростей, завышенное время возбуждения электрической машины, особенно для АД средней и большой мощности. Недостаточное возбуждение АД в момент пуска приводит к снижению динамических характеристик, что сужает область применения частотно-управляемых АД.

**Анализ предыдущих исследований.** В [1] авторами предложен новый теоретический подход к синтезу алгоритма частотного управления, базирующийся на использовании динамической модели асинхронного двигателя. В отличие от известных решений [3], результат [1] позволяет получить ряд практических решений, обеспечивающих повышение статических и динамических характеристик систем частотного управления АД при полностью разомкнутом управлении.

**Цель работы.** Теоретическое и экспериментальное исследование обобщенного результата [1] с точки зрения его практического использования в асинхронных электроприводах.

**Материал и результаты исследования.** В [1] показано, что формирование заданного потокосцепления статора позволяет модифицировать механические характеристики частотно-управляемого АД в зависимости от заданной угловой скорости. На основе этого результата рассмотрим выражение для критического момента АД:

$$M_k = \frac{3 p_n U_{1m}^2}{4 \omega^* p_n \left( \pm R_l + \sqrt{R_l^2 + x_k^2} \right)}. \quad (1)$$

Модуль вектора напряжения статора при использовании алгоритма частотного управления [1] равен:

$$U_{1m} = \sqrt{u_{1d}^2 + u_{1q}^2} = \psi^* \sqrt{\alpha_l^2 + (\omega^* p_n)^2}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), с учетом определения индуктивного сопротивления короткого замыкания  $x_k = (L_{1\sigma} + L_{2\sigma}) \omega^* p_n$ , где  $L_{1\sigma}$  и  $L_{2\sigma}$  – индуктивности рассеивания статора и ротора, получим зависимость критического момента АД от величины заданного потокосцепления:

$$M_k = \frac{3 p_n \psi^{*2} \left( \alpha_l^2 + (\omega^* p_n)^2 \right)}{4 \omega^* p_n \left( \pm R_l + \sqrt{R_l^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 (\omega^* p_n)^2} \right)}. \quad (3)$$

При номинальном напряжении питания критический момент равен:

$$M_{kn} = \frac{3 p_n \psi_n^{*2} \left( \alpha_l^2 + \omega_{0n}^2 \right)}{4 \omega_{0n} \left( \pm R_l + \sqrt{R_l^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 \omega_{0n}^2} \right)}. \quad (4)$$

Условием постоянства критического момента относительно номинального значения является выполнение соотношения

$$M_k = M_{kn}. \quad (5)$$

Из выражений (3) – (5) находим значение заданного потока двигателя, при котором перегрузочная способность сохраняется на номинально уровне:

$$\psi^* = \psi_n^* \frac{\omega^* p_n z \left( \alpha_l^2 + \omega_{0n}^2 \right)}{\sqrt{\omega_{0n} z_n \left( \alpha_l^2 + (\omega^* p_n)^2 \right)}}, \quad (6)$$

где  $z = \left( \pm R_l + \sqrt{R_l^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 (\omega^* p_n)^2} \right)$ ;

$$z_n = \left( \pm R_l + \sqrt{R_l^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 \omega_{0n}^2} \right).$$

Выражение (6) позволяет поддерживать значение критического момента частотно-управляемого АД на номинальном уровне путем формирования заданного потокосцепления статора в зависимости от заданной угловой скорости.

Форсировка процесса возбуждения АД может быть достигнута с использованием модифицированного выражения для напряжения по оси (d) (второе уравнение в (8) [1]) в виде

$$u_{1d} = \alpha_l \psi^* + a \dot{\psi}^*, \quad a = \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{R_l L_2}{R_2 L_m} + \frac{\sigma}{L_m} \right), \quad (7)$$

где  $\dot{\psi}^*$  – первая производная от заданной траектории магнитного потока.

Исследование статических и динамических режимов выполнено методом математического моделирования и на экспериментальной установке – станции быстрого прототипного тестирования алго-

ритмов управления электроприводами [2] с использованием АД 4АО80В2 со следующими параметрами: номинальная мощность 0.75 кВт, номинальная синхронная скорость  $\omega_n = 314$  рад/с,  $R_1 = 11$  Ом,  $R_2 = 5.51$  Ом,  $L_1 = L_2 = 0.95$  Гн,  $L_m = 0.91$  Гн,  $J = 0.0042$  кг·м<sup>2</sup>.

На рис. 1 показана зависимость заданного значения модуля вектора потокосцепления от заданной угловой скорости, полученная в соответствии с выражением (6) для поддержания постоянного значения критического момента.

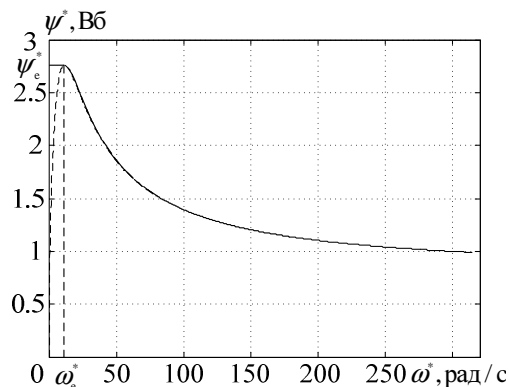


Рисунок 1 – Зависимость заданного потока от заданной скорости

При работе с заданными скоростями ниже значения  $\omega_e^*$  (рис. 1) решение, полученное для нахождения значений  $\psi^*$  на основании формулы (6), вырождается. В этом случае для поддержания перегрузочной способности необходимо поддерживать заданный поток на уровне значения  $\psi_e^*$ .

На рис. 2 пунктиром показаны механические характеристики АД 4АО80В2 при частотном управлении, полученные методом математического моделирования для нижнего диапазона скоростей.

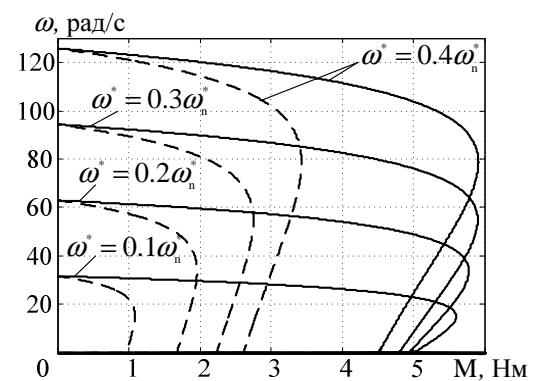


Рисунок 2 – Статические характеристики (математическое моделирование)

Как видно из рис. 2, при заданных скоростях ниже 25 % номинального значения, критический момент машины снижается ниже номинального, равного 2,5 Нм. Механические характеристики, рассчитанные при использовании алгоритма компенсации

снижения критического момента (6), показаны на рис. 2 сплошными линиями.

Механические характеристики АД 4АО80В2, полученные экспериментально, приведены на рис. 3.

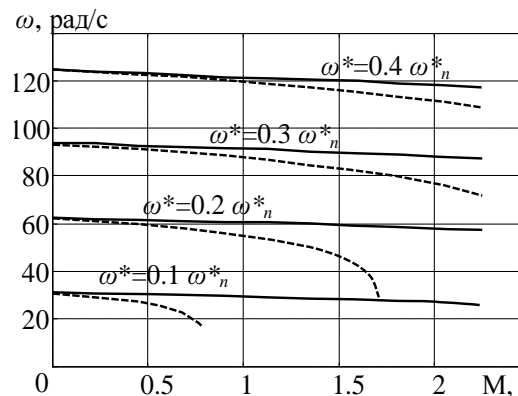


Рисунок 3 – Экспериментальные статические характеристики

Из рис. 2, 3 следует, что характеристики при частотном управлении без использования компенсации снижения критического момента, полученные экспериментально, имеют меньшее значение критического момента, чем при моделировании. Это объясняется наличием «мертвого времени» инвертора [3], которое оказывает влияние на процессы управления при работе в зоне низких скоростей. Статические характеристики, показанные на рис. 3, экспериментально подтверждают, что предложенный в данной работе метод повышения критического момента позволяет существенно расширить диапазон регулирования угловой скорости.

Исследование динамических режимов выполнено с использованием стандартной последовательности операций управления, рис. 4:

- во время начального интервала времени  $0 \div 0,25$  с машина возбуждается, траектория заданного потока начинается с  $\psi^*(0) = 0,02$  Вб и достигает значения 0,99 Вб с первой производной, равной 3,88 Вб/с;

- начиная с  $t = 0,6$  с, двигатель без нагрузки разгоняется по заданной траектории скорости от нуля до заданного значения  $\omega^* = 62,8$  рад/с;

- в момент времени  $t = 2$  с к валу двигателя ступенчато прикладывается, а при  $t = 2,5$  с снимается постоянный момент нагрузки, равный 90 % от номинального значения.

Первая серия тестов (моделирования и экспериментов) проведена для исследования процессов возбуждения АД.

На рис. 5, а) показаны графики переходных процессов разгона двигателя, полученные методом математического моделирования. Из графика переходного процесса модуля вектора потокосцепления статора видно, что время возбуждения машины составляет примерно 1 с.

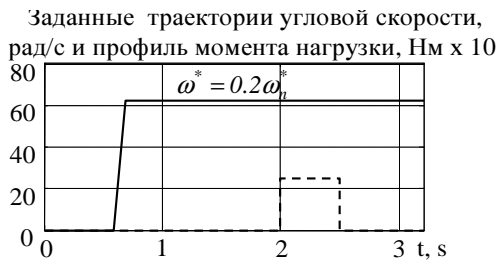


Рисунок 4 – Последовательность операций управления

Длительность процесса возбуждения двигателя зависит от его параметров и может составлять несколько секунд, что является нежелательным во многих технологических применениях.

Переходные процессы пуска АД с использованием алгоритма форсировки возбуждения, заданного уравнением (7), показаны на рис. 5, б), из которого следует, что возбуждение машины осуществляется за время, определяемое заданной траекторией  $\psi^*(t)$ .

При отработке ступенчатого момента нагрузки частотно-управляемый АД является неустойчивым, так как его критический момент при  $\omega^* = 0,2 \omega_n$  меньше значения момента нагрузки.

На рис. 6 представлены графики переходных процессов при выполнении рассмотренных тестов на экспериментальной установке. Из сравнения рис. 5 и рис. 6 видно, что экспериментальные переходные процессы с высокой степенью точности повторяют графики, полученные при математическом моделировании. Меньшее значение тока в процессе возбуждения машины, а, следовательно, и меньшее значение оцененного с помощью наблюдателя магнитного потока объясняется влиянием «мертвого времени» инвертора.

Необходимо отметить, что при повышении уровня заданного магнитного потока выше номинального магнитная система АД входит в зону насыщения, поэтому анализ результатов с использованием стандартной модели, имеющей линейную магнитную характеристику, затруднителен.

Результаты экспериментальных исследований, показанных на рис. 7, демонстрируют работу АД при компенсации снижения критического момента машины за счет увеличения заданного потока. При выполнении тестов, показанных на рис. 7, уровень заданного потока, в соответствии с (6), установлен равным  $\psi^* = 1,69$  Вб при  $\omega^* = 62,8$  рад/с (20 % от номинальной скорости) и  $\psi^* = 2,24$  Вб при  $\omega^* = 31,4$  рад/с (10 % от номинальной скорости).

На рис. 8 приведены графики переходных процессов разгона АД под нагрузкой при увеличенном значении заданного модуля вектора потокосцепления. При выполнении этого теста использовалась следующая последовательность операций управления: на протяжении интервала времени  $0 \div 0,25$  с двигатель возбуждается, при  $t = 0,5$  с к валу непод-

вижной машины ступенчато прикладывается активный момент нагрузки, равный 90 % от номинального значения, начиная с  $t = 0,6$  с двигатель разгоняется до скорости  $\omega^* = 62,8$  рад/с за 0,5 с.

Из рис. 8 следует, что повышение заданного значения модуля вектора потокосцепления в зоне низких скоростей позволяет обеспечить надежный пуск частотно-управляемого АД с моментом нагрузки на валу, близким к номинальному.

Результаты проведенных тестов подтверждают эффективность компенсации снижения перегрузочной способности АД, поскольку при  $\omega^* \leq 0,25 \omega_n$  и номинальном задании магнитного потока частотно-управляемый АД не обеспечивает номинальный момент (рис. 2, 5, 6)).

Анализ графиков переходных процессов на рис. 5 – 8 и механических характеристик, изображенных сплошной линией на рис. 3, свидетельствует о том, что представленный метод повышения критического момента позволяет обеспечить статическую и динамическую устойчивость работы АД в расширенном диапазоне (примерно в 3–4 раза для рассматриваемого типа АД) регулирования угловой скорости. Однако поскольку ток статора при повышенных значениях магнитного потока становится выше номинального, то работа АД в таком режиме на протяжении длительного интервала времени является недопустимой. Вместе с тем для ряда механизмов, в которых необходимо обеспечить надежный пуск с повышенным моментом, такое решение является обоснованным и в различных конфигурациях используется в серийных изделиях многих производителей (по сравнению с использованием векторных методов управления АД).

**Выводы.** Представлены результаты экспериментального тестирования и математического моделирования алгоритма частотного управления, конструирование которого осуществлено на основе второго метода Ляпунова. Продемонстрирован положительный эффект введения форсировки процесса возбуждения асинхронного двигателя. Показано, что структура предложенного алгоритма позволяет формировать заданное значение модуля вектора потокосцепления в функции скорости с целью компенсации снижения критического момента на низких скоростях. Подтверждено, что разработанные алгоритмы обеспечивают существенное расширение диапазона регулирования угловой скорости.

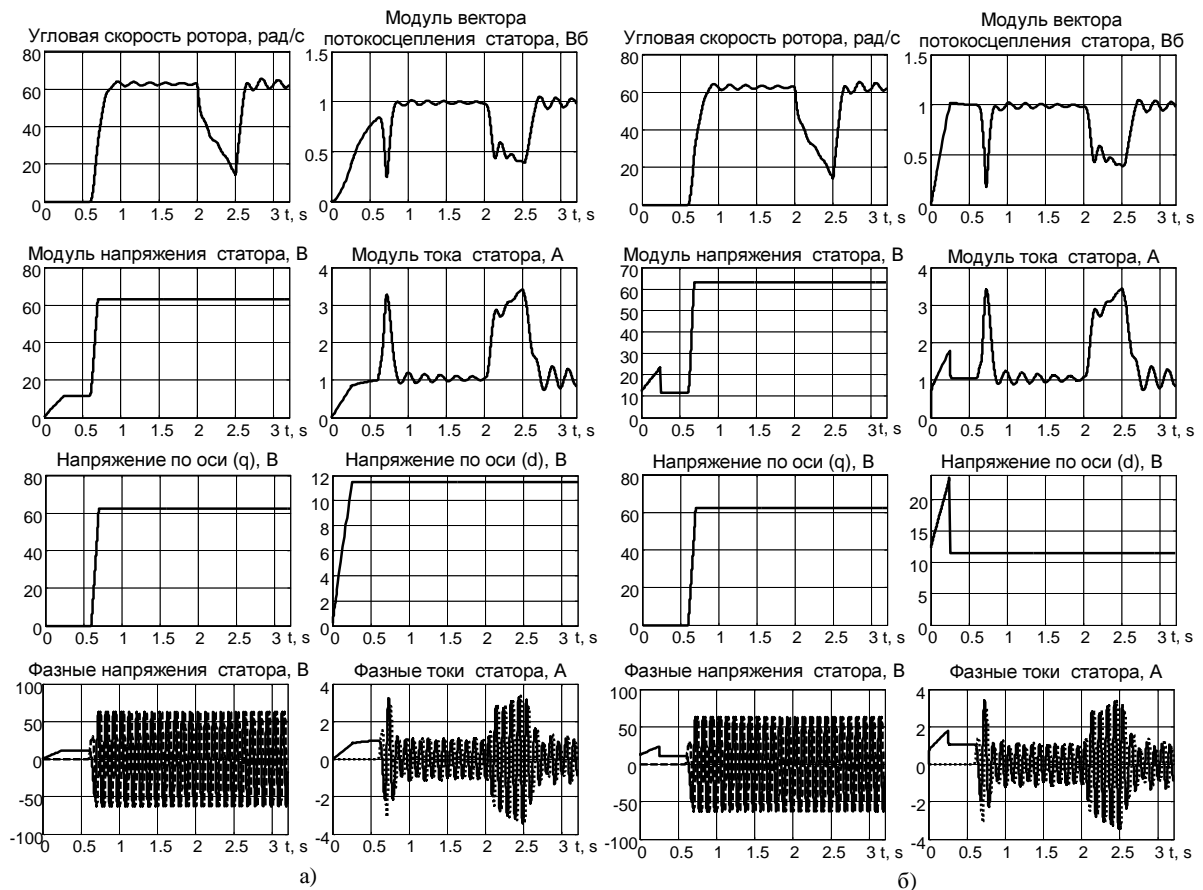


Рисунок 5 – Графики переходных процессов разгона двигателя

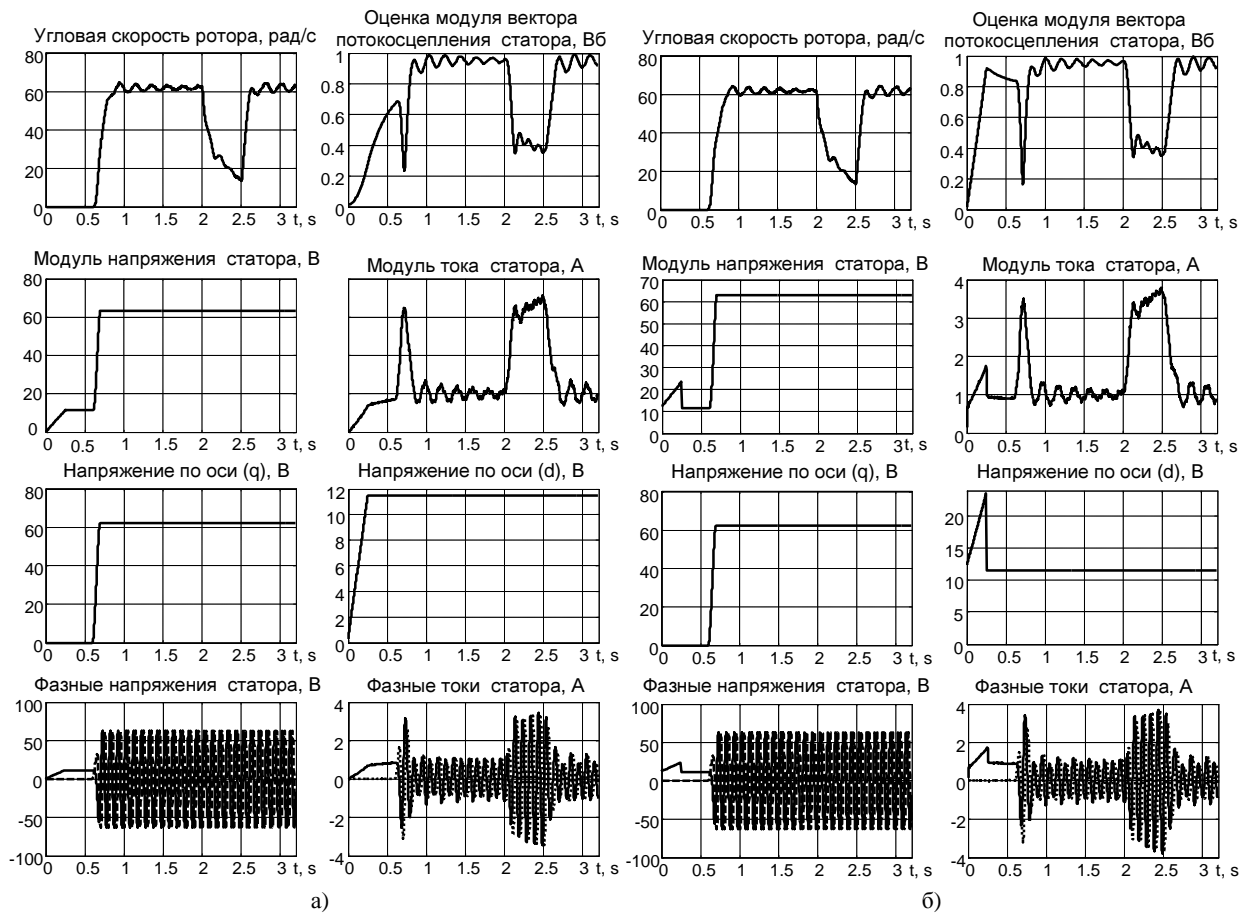


Рисунок 6 – Графики переходных процессов при выполнении тестов на экспериментальной установке

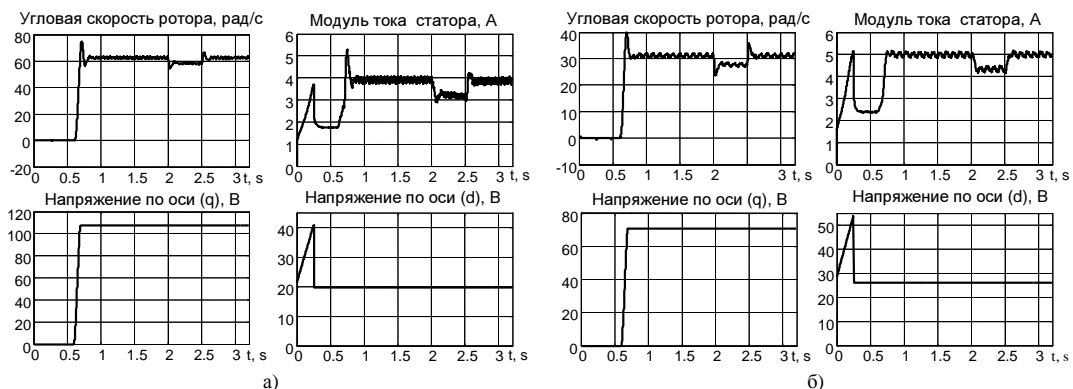


Рисунок 7 – Работа АД при компенсации снижения критического движения машины за счет увеличения заданного потока

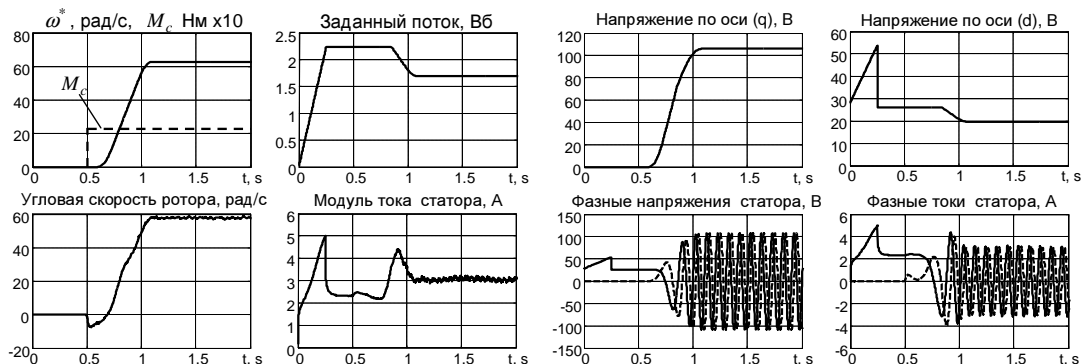


Рисунок 8 – Графики переходных процессов разгона АД под нагрузкой

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Онанко А.Ю. Обобщенный алгоритм частотного управления асинхронным двигателем. часть 1: синтез на основе второго метода Ляпунова // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 1/2011 (1). – С. 34–35.

2. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Тониэлли А. Станция быстрого моделирования алгоритмов управления электроприводом // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. –1999. – С. 190–193.

3. Weschta, W. Weberskirch, Siemens AG, E STE 14, Postfach 32 20, D-8520 Erlangen, F.R.G. NonLinear behaviour of voltage source inverters with power transistors // Proc. of EPE 89, Aachen. – 1989. – P. 533–537.

4. A. Muñoz-Garcia, T. A. Lipo, D. W. Novotny A New Induction Motor  $V/f$  Control Method Capable of High-Performance Regulation at Low Speeds // IEEE Trans. On Ind. App., VOL. 34, NO. 4, July/August 1998.

Стаття надійшла 30.06.2011р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.

## УЗАГАЛЬНЕНИЙ АЛГОРИТМ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ. ЧАСТИНА 2: РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ

С. М. Пересада, д.т.н., проф., С. Н. Ковбаса, к.т.н., доц., А. Ю. Онанко, асп.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, 03056, м. Київ, Україна

E-mail: sergei.peresada@gmail.com, skovbasa@ukr.net

Представлено результати порівняльного експериментального тестування алгоритмів частотного керування. Показано ефект компенсації зниження переважувальної здатності при роботі в зоні низьких швидкостей асинхронного двигуна.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, частотне керування, експериментальні дослідження.

## GENERALIZED VOLTAGE-FREQUENCY CONTROL ALGORITHM OF INDUCTION MOTORS. PART 2: TESTING RESULTS

S. Peresada, D.Sc. (Eng.), Prof., S. Kovbasa, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., A. Onanko, post-grad.

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnical Institute"

pr. Peremohy, 37, 03056, Kyiv, Ukraine

E-mail: sergei.peresada@gmail.com, skovbasa@ukr.net

The results of comparative experimental testing of voltage-frequency control with improved overload performance and speed regulation region are presented.

**Key words:** induction motor, voltage-frequency control, experimental testing.