

О.И. Толочко, Г.С. Чекавский, В.В. Божко, А.А. Шерстюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРИ СКАЛЯРНОМ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ПОСТОЯНСТВА ГЛАВНОГО ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ

Постановка проблемы. Использование алгоритмов скалярного частотного управления (ЧУ) является весьма распространенным на практике для электроприводов (ЭП) машин, к которым предъявляют жесткие требования к статическим параметрам (жесткости механических характеристик, перегрузочной способности) при невысоких требованиях к качеству переходных процессов. К их числу могут быть отнесены краны, насосы, подъемные установки, различные механизмы промышленного транспорта. Наибольшее распространение в системах скалярного ЧУ ввиду его удобства получил закон управления, обеспечивающий в некотором диапазоне регулирования частоты примерное постоянство потокосцепления статора асинхронного двигателя (АД) – $\Psi_s = const$, достигаемый за счет компенсации падения напряжения в активном сопротивлении обмотки статора (так называемая *IR*-компенсация). Диапазон регулирования частоты вращения в таких ЭП вниз от номинальной ограничен из-за возникающего при этом насыщения магнитной цепи двигателя, и как правило, не превышает отношения (3...5):1 [1].

Диапазон регулирования можно расширить за счет поддержания постоянства магнитного потокосцепления АД в воздушном зазоре $\Psi_m = const$. В современных комплектных ЭП предусмотрена возможность задания отдельных точек закона ЧУ (вольт-частотной характеристики) для последующей его линейной интерполяции, что позволяет обеспечить требуемые жесткость характеристик и перегрузочную способность АД для конкретного применения ЭП.

Анализ исследований и публикаций. Основные соотношения для координат и параметров АД, позволяющие определить рациональные способы ЧУ двигателем, приведены в [2]. Там же показана общая зависимость для магнитного потока, которая позволяет оценить степень его увеличения при снижении частоты (в области насыщения магнитной цепи АД). Достаточно полный обзор законов ЧУ, имеющий в настоящее время практическое применение, выполнен, в частности, в [1, 3]. При этом, однако, отсутствуют практические рекомендации для расчета зависимости амплитуды подводимого к статору АД напряжения в функции его частоты для реализации закона $\Psi_m = const$, который позволит улучшить качество статиче-

ских характеристик ЭП в области низкой частоты и расширить диапазон регулирования.

Цель статьи. Вывод аналитических выражений для закона ЧУ $\Psi_m = const$, позволяющих дать практические рекомендации для настройки преобразователя частоты (ПЧ). Анализ динамических характеристик частотно-регулируемого АД с целью определения факторов, ограничивающих применение подобного регулирования на низкой частоте.

Результаты исследований. При математическом описании процессов в АД приняты допущения о его строгой симметричности, синусоидальности всех электромагнитных величин, отсутствии влияния пазов статора и ротора, отсутствии потерь в стали статора и ротора и сосредоточенности параметров обмоток. Считается, что значения параметров ротора приведены к обмотке статора.

Все параметры и координаты АД рассматриваются в относительных единицах. В качестве базисных параметров приняты:

- $U_{\bar{\sigma}} = U_{sfH.m}$ – амплитуда номинального фазного напряжения статора;
- $I_{\bar{\sigma}} = I_{sfH.m}$ – амплитуда номинального фазного тока статора;
- $\Omega_{\bar{\sigma}} = \omega_{SH} = 2\pi f_{SH}$ – номинальная угловая частота напряжения сети;
- время $T_{\bar{\sigma}} = 1/\Omega_{\bar{\sigma}}$ – величина, обратная базисной частоте;
- потокосцепление $\Psi_{\bar{\sigma}} = U_{\bar{\sigma}} T_{\bar{\sigma}} = U_{sfH.m} / \omega_{SH}$;
- сопротивление $R_{\bar{\sigma}} = U_{\bar{\sigma}} / I_{\bar{\sigma}} = U_{sfH.m} / I_{sfH.m}$;
- индуктивность $L_{\bar{\sigma}} = \Psi_{\bar{\sigma}} / I_{\bar{\sigma}} = U_{sfH.m} / (\omega_{SH} \cdot I_{sfH.m})$.

В качестве исходных рассматриваются уравнения Парка – Горева, записанные в ортогональной системе координат x, y , вращающейся относительно неподвижного статора с синхронной угловой частотой

$$\omega_S = 2\pi f_S,$$

где f_S – заданная частота напряжения статора.

Уравнения электрического равновесия цепей статора и ротора имеют вид

$$\vec{U}_S = R_S \vec{I}_S + (p + j\omega_S) \vec{\Psi}_S; \quad (1)$$

$$\vec{U}_R = R_R \vec{I}_R + [p + j(\omega_S - \omega_R)] \vec{\Psi}_R, \quad (2)$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования;

R_S – активное сопротивление обмотки фазы статора;

ω_R – электрическая частота вращения ротора.

Вектор главного магнитного потокосцепления АД (потокосцепления в воздушном зазоре) равен

$$\vec{\Psi}_m = L_m \vec{I}_m = L_m (\vec{I}_S + \vec{I}_R), \quad (3)$$

где L_m – главная взаимная индуктивность между фазой статора и фазами ротора.

Уравнения для потокосцеплений статора и ротора

$$\vec{\Psi}_S = \vec{\Psi}_m + L_{S\sigma} \vec{I}_S; \quad (4)$$

$$\vec{\Psi}_R = \vec{\Psi}_m + L_{R\sigma} \vec{I}_R, \quad (5)$$

где $L_{S\sigma}$, $L_{R\sigma}$ – индуктивности рассеяния статора и ротора.

Из уравнений (1) – (5) можно получить выражение в общем виде, отражающее связь между вектором напряжения, приложенного к статору, и вектором главного магнитного потокосцепления АД

$$\vec{U}_S = \frac{1}{L_m} \cdot \frac{A(p)}{H(p)} [B(p)\vec{\Psi}_m - \vec{U}_R] + (p + j\omega_S)\vec{\Psi}_m, \quad (6)$$

где $A(p) = R_S + L_{S\sigma}(p + j\omega_S)$, $B(p) = R_R + L_R[p + j(\omega_S - \omega_R)]$,

$H(p) = R_R + L_{R\sigma}[p + j(\omega_S - \omega_R)]$ – степенные полиномы с переменными коэффициентами, зависящими от электрической частоты вращения полюсов статора ω_S и ротора ω_R ;

$L_R = L_m + L_{R\sigma}$ – полная индуктивность ротора.

Для частотно-регулируемого короткозамкнутого АД ($\vec{U}_R = 0$) уравнение (6) после преобразований можно представить в виде

$$\vec{\Psi}_m = \frac{H(p)}{G(p)} \vec{U}_S, \quad (7)$$

где $G(p) = \lambda p^2 + [\beta + j(2\omega_S - \omega_R)\lambda]p + \{\rho - \lambda\omega_S(\omega_S - \omega_R) + j[\omega_S\beta - \omega_R R_S/k_R]\}$;

$\lambda = L_{S\sigma}/k_R + L_{R\sigma}$; $\beta = R_S/k_R + R_R/k_S$; $\rho = R_S R_R / L_m$;

$k_S = L_m / L_S$, $k_R = L_m / L_R$ – коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора;

$L_S = L_m + L_{S\sigma}$ – полная индуктивность статора.

Уравнение, записанное для модулей величин и являющееся частным случаем (7), представлено в [2], однако там не выполнено анализа полученной зависимости на предмет применения к закону $\Psi_m = const$. К тому же, записанная для модулей величин зависимость не позволяет оценить динамические свойства АД при указанном управлении.

На основании (7) с использованием уравнения (2) можно получить выражение для потокосцепления статора

$$\vec{\Psi}_S = \frac{D(p)}{H(p)} \vec{\Psi}_m = \frac{D(p)}{G(p)} \vec{U}_S, \quad (8)$$

где $D(p) = \frac{R_R}{k_S} + L_\sigma [p + j(\omega_S - \omega_R)]$; $L_\sigma = L_{S\sigma} + L_{R\sigma} + \frac{L_{S\sigma} L_{R\sigma}}{L_m}$.

Анализ выражения (8) теоретически позволяет оценить запас для расширения диапазона регулирования частоты за счет использования закона управления $\Psi_m = const$ вместо закона $\Psi_S = const$. В частности, если $\omega_R \approx \omega_S$, этот запас выражается величиной, обратной значению коэффициента электромагнитной связи статора k_S .

С помощью (8) при принятии допущения о постоянстве частоты вращения ротора ($\omega_R = const$) может быть оценен характер электромагнитных переходных процессов в АД на основании аналитического либо численного решения характеристического уравнения

$$G(p) = 0. \quad (9)$$

Дальнейшие исследования проводятся на примере двигателя 4А-112-М4 (5,5 кВт; 1448 об/мин; 380 В; 10,4 А).

Графики корней $p_{1,2} = \alpha_{1,2} + j\omega_{1,2}$ уравнения (9), рассчитанные при $\omega_R = \omega_S$, представлены на рисунке 1. Таким образом, интенсивность затухания колебаний, вызванных действием возмущающих факторов (например, изменением напряжения сети, момента сопротивления на валу АД), оцениваемая по значению α_{\min} меньшей по абсолютному значению действительной части одного из корней (p_1), существенно снижается в области низкой частоты.

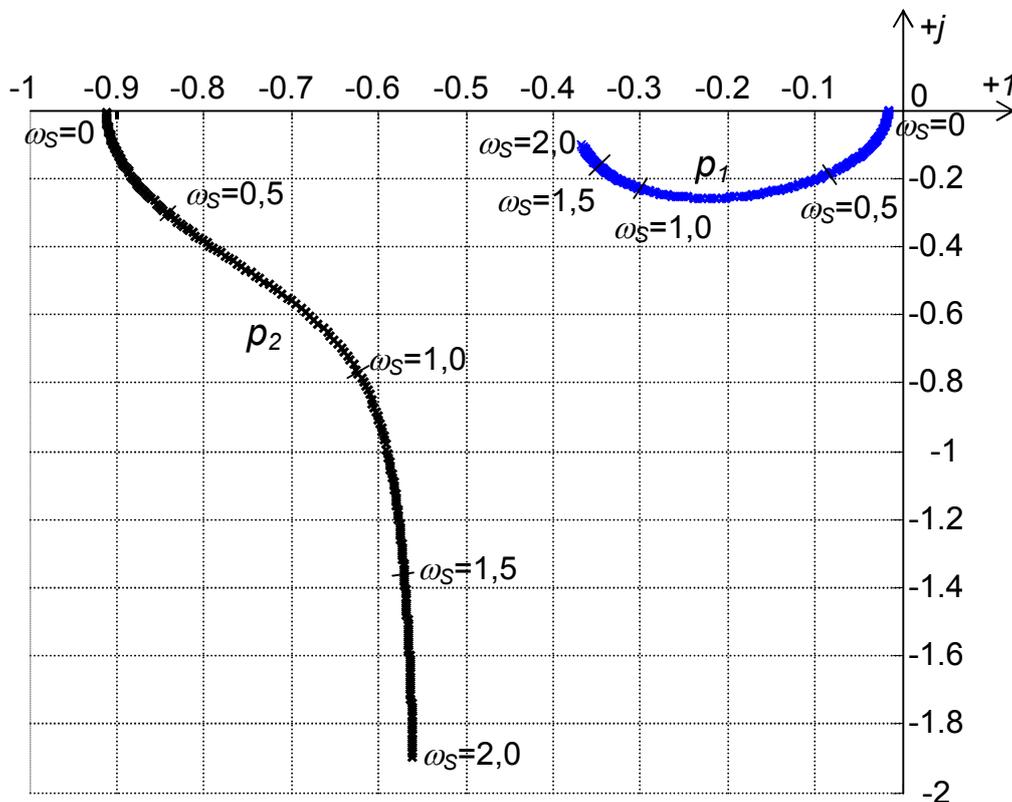
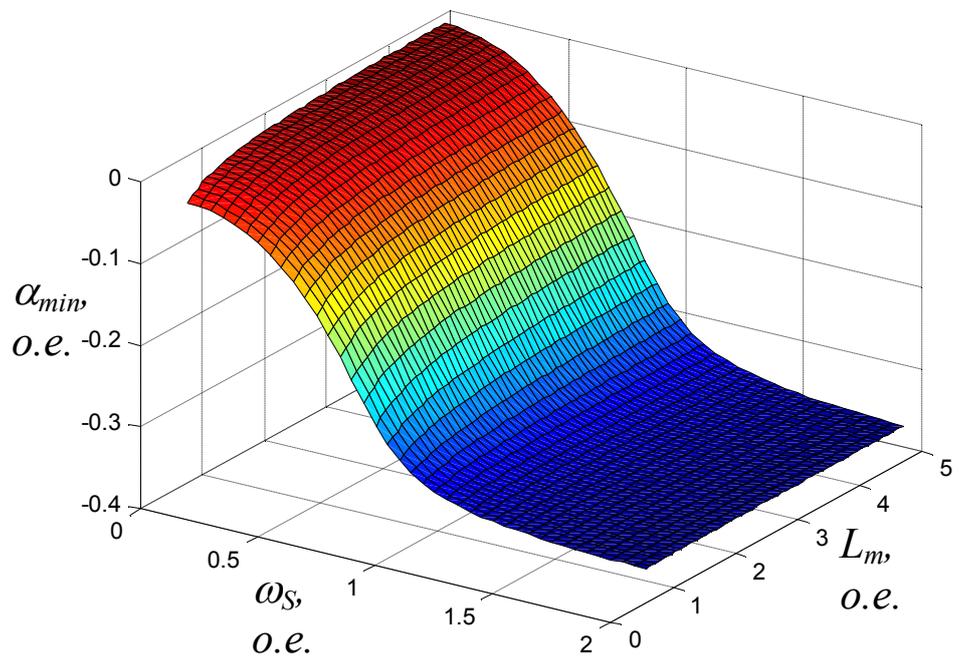


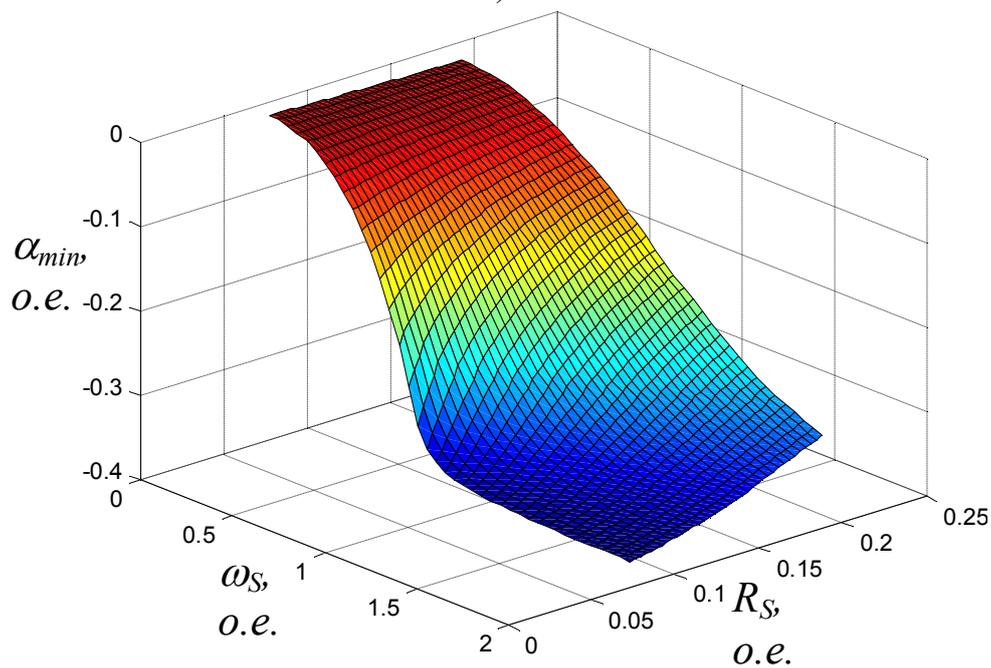
Рисунок 1 – Корни $p_{1,2}$ характеристического уравнения (9) при $\omega_R = \omega_S$

Абсолютное скольжение $s_a = \omega_S - \omega_R$ практически влияет только на частоту ω_1 и ω_2 свободных колебаний. При этом α_{\min} зависит от значений активных сопротивлений статора и ротора (определяемых тепловым состоянием их обмоток) и главной взаимной индуктивности (изменяющейся вследствие нелинейности магнитной цепи АД). Анализ соответствующих зависимостей (рисунок 2) позволяет сделать вывод о дополнительном снижении интенсивности затухания при низкой температуре обмоток АД

(близкой к практически холодному состоянию), а также при больших значениях индуктивности L_m (при ослаблении поля вследствие некорректного задания закона ЧУ), особенно при низкой частоте ω_s напряжения статора.



а)



б)

Рисунок 2 – Зависимости, отражающие влияние изменения параметров L_m (а) и R_s (б) двигателя на интенсивность затухания переходных процессов

Указанные закономерности справедливы при произвольном законе ЧУ, однако при $\Psi_m = const$ это обстоятельство может служить ограничением при регулировании частоты в области малых значений.

Рассмотрим (8) применительно к установившимся режимам для определения зависимости \vec{U}_S / f_S , позволяющей реализовать закон $\Psi_m = const$. Положив $p = 0$, можно записать

$$\vec{\Psi}_m = \frac{R_R + j(\omega_S - \omega_R)L_{R\sigma}}{\rho - \lambda\omega_S(\omega_S - \omega_R) + j[\omega_S\beta - \omega_R R_S/k_R]} \vec{U}_S.$$

Вынеся в знаменателе ω_S как общий множитель, последнее выражение запишем в виде:

$$\vec{\Psi}_m = \frac{R_R + j(\omega_S - \omega_R)L_{R\sigma}}{\frac{\rho}{\omega_S} - \lambda(\omega_S - \omega_R) + j\left[\beta - \frac{R_S}{k_R} \cdot \frac{\omega_R}{\omega_S}\right]} \cdot \frac{\vec{U}_S}{\omega_S}.$$

Обозначив $\gamma = \frac{U_{Sm}}{\omega_S}$, для модулей векторов можно записать

$$\Psi_m = \left| \frac{R_R + j(\omega_S - \omega_R)L_{R\sigma}}{\rho/\omega_S - \lambda(\omega_S - \omega_R) + j[\beta - R_S\omega_R/(k_R\omega_S)]} \right| \cdot \gamma = K_m \gamma.$$

Последнему выражению соответствуют графические зависимости, представленные на рисунке 3 для разных значений абсолютного скольжения

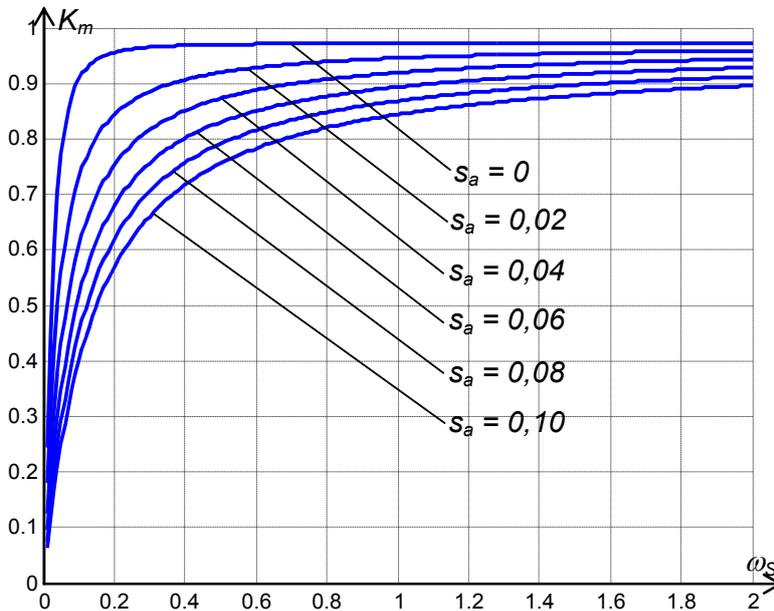


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента K_m в функции частоты ω_S при разных значениях абсолютного скольжения $s_a = \omega_S - \omega_R$

нижения $s_a = \omega_S - \omega_R$. Зависимости следует рассматривать с учетом того, что при $\omega_S > 1$ дальнейшее повышение частоты выполняется при неизменном напряжении, равном номинальному ($U_{Sm} = 1$).

Исследования показали, что ни изменение активных сопротивлений двигателя, ни изменение главной взаимной индуктивности не оказывают значимого влияния на значение коэффициента K_m . След-

довательно, зависимость для закона управления, позволяющего обеспечить $\Psi_m = 1 = const$, может быть определена как обратная зависимость по отношению к изображенной на рисунке 3, умноженная на текущее значение заданной частоты (рисунок 4).

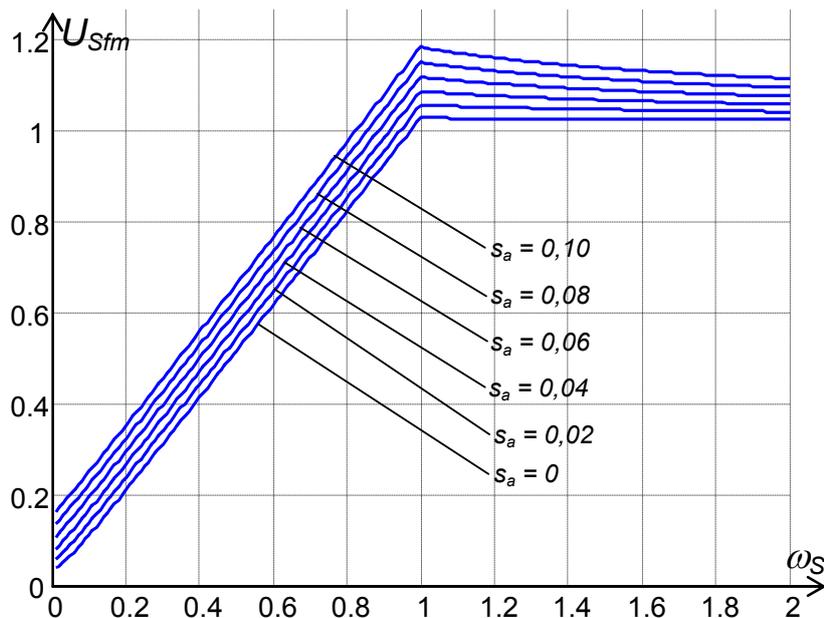


Рисунок 4 – Зависимости заданной амплитуды напряжения статора в функции заданной частоты для реализации закона управления $\Psi_m = const$

Анализ представленных зависимостей показывает, что в зависимости от жесткости характеристик АД для реализации закона $\Psi_m = const$ в зоне номинальной частоты требуемая амплитуда напряжения статора может превышать номинальное напряжение на 10...20%. Это, с одной стороны, требует применения ПЧ с соответствующим запасом по напряжению, а с другой стороны, велика ве-

роятность возникновения насыщения зубцовой зоны статора из-за увеличения потокосцепления статора Ψ_S . В области низкой частоты такой закономерности не наблюдается, однако как было показано выше, имеет место существенное снижение интенсивности затухания переходных процессов как при изменении нагрузки, так и при колебаниях напряжения сети. Указанные обстоятельства служат ограничением для применения рассматриваемого закона ЧУ.

Таким образом, закон $\Psi_m = const$ позволяет обеспечить достаточно качественные статические и динамические характеристики ЭП в среднем диапазоне частоты ω_S , который ограничивается сверху условиями недопустимого возрастания потокосцепления статора Ψ_S , а снизу – недопустимым снижением интенсивности затухания электромагнитных переходных процессов.

Выводы:

1. Получена в аналитическом виде зависимость между модулями вектора \vec{U}_S напряжения, приложенного к статору, и вектора $\vec{\Psi}_m$ главного магнитного потокосцепления АД, которая использована для определения необходимого закона изменения заданной амплитуды напряжения статора в функции заданной частоты, используемого при реализации закона $\Psi_m = const$, а также анализа динамических свойств АД при указанном управлении.

2. Установлены зависимости интенсивности затухания переходных процессов от частоты напряжения статора АД, а также от значений актив-

ного сопротивления статора и ротора и главной взаимной индуктивности. Имеет место дополнительное снижение интенсивности затухания переходных процессов при практически холодном состоянии обмоток АД, а также при ослаблении поля, которое особенно заметно при низкой частоте напряжения, прикладываемого к обмоткам статора.

3. Закон $\Psi_m = const$ позволяет обеспечить достаточно качественные статические и динамические характеристики ЭП в среднем диапазоне частоты, который ограничивается сверху условиями недопустимого возрастания потокосцепления статора, а снизу – недопустимым снижением интенсивности затухания электромагнитных переходных процессов.

4. Целесообразным направлением дальнейших исследований является оценка предпочтительности использования законов скалярного ЧУ для механизмов с известным характером изменения момента сопротивления в функции частоты вращения, а также экспериментальная проверка результатов исследований.

Список литературы

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. – 392 с.

3. Комплектні електроприводи: Навч. посібник / М.М. Казачковський. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 226 с.

УДК 621.313.333:62-83

Толочко О.И., Чекавский Г.С., Божко В.В., Шерстюк А.А. Исследование процессов в асинхронном двигателе при скалярном частотном управлении с обеспечением постоянства главного потокосцепления // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. - Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2009.-С.

Анализ статических и динамических характеристик асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении по закону, обеспечивающему постоянство потокосцепления в воздушном зазоре двигателя. Условия, ограничивающие диапазон регулирования частоты при использовании указанного закона управления.

Библиогр. 3.