

- 372 с.
4. Орловский И. А. Расчет моделей тиристорного электропривода постоянного тока на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях / И. А. Орловский, А. А. Синявский // *Электротехника та електроенергетика*. – 2008. – № 2. – С. 7–20.
  5. Орловский И. А. Расчет моделей тягового асинхронного двигателя на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях / И. А. Орловский // *Вестник НТУ «ХПИ» : сборник научных трудов «Проблемы автоматизированного привода. Теория и практика»*. – Харьков. – 2008. – С. 582–585.

*Поступила в редакцию 05.12.08 г.*

*Запропоновано методику й приклади розрахунку моделей асинхронного двигуна (АД) на поліноміальних рекуррентних нейронних мережах (ПРНМ), виходячи з експериментальних даних про режими його роботи при живленні від автономного інвертора напруги із широтно-імпульсною модуляцією. Методом імітаційного моделювання досліджена точність запропонованої методики й розраховані внутрішні параметри АД із вагових коефіцієнтів ПРНМ.*

*The design procedure and examples of the asynchronous drive models calculation on polynomial recurrent neural networks (PRNN), proceeding from experimental data about modes of its work at the independent inverter of voltage with pulse-width modulation is offered. The method of imitating modeling investigates the accuracy of the offered technique and internal parameters of the asynchronous drive from weight coefficient PRNN are calculated.*

УДК 62-83:621.313.333

**А. В. Макурин**

## **Влияние параметров схемы электрического вала на его статические и динамические характеристики**

Приведены результаты теоретических исследований, получены результаты моделирования, проведен анализ влияния параметров схемы электрического вала на его статические и динамические свойства.

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами**

Часто наиболее простым и экономичным устройством для обеспечения согласованной работы механизмов является электрический вал (ЭВ), реализующийся в результате электрического соединения статоров и роторов двух или нескольких асинхронных машин (АМ) с фазными роторами. Существенное преимущество электрического вала заключается в простоте его конструкции и в возможности применять в нем нормальные серийные машины. Это устройство является очень надежным в эксплуатации и при качественном проектировании может применяться без каких-либо затруднений в широких диапазонах регулирования скорости вращения. Например, в механизмах передвижения кранов применение ЭВ позволяет значительно уменьшить износ рельс и реборд колес, а также снизить нагрузку на конструкции крана.

Несмотря на свою конструктивную простоту, электрический вал требует определенного опыта при проектировании. После проектирования следует обязательно проводить проверку на динамическую и статическую устойчивость [1]. Существуют области скольжений и параметров машин ЭВ, где наблюдаются на практике слабозатухающие колебательные режимы, которые препятствуют качественному движению ЭВ. Исследование параметров схемы электрического

© А. В. Макурин 2009 р.

вала позволяет определить возможность статически и динамически устойчивой области их работы при заданном диапазоне скольжений и углов рассогласования, а, значит, и – возможность применения ЭВ с данными машинами.

**Анализ исследований и публикаций.** Анализ отечественных исследований и разработок показывает, что достаточно хорошо освещают вопросы выбора машин, расчета статики и энергетики применительно к ЭВ [2]. В некоторых работах рассматривались вопросы статической устойчивости ЭВ [3], но исследования влияния параметров схемы системы электрического вала на его динамические свойства не проводились. В зарубежных публикациях рассматривались вопросы, касающиеся статической и динамической устойчивости систем синхронного вращения (ССВ), но результаты этих исследований не сравнивались и не проверялись на математических моделях системы ЭВ [4].

Актуальность проведенных ниже исследований обусловлена существующим недостатком в исследованиях динамики ЭВ и востребованностью этих исследований практикой.

**Постановка задачи.** Провести теоретическое исследование влияния параметров схемы электрического вала (в частности, активных и индуктивных сопротивлений статора и ротора) на удельный синхронизирующий момент и коэффициент демпфирования ЭВ, определить область устойчивой работы ЭВ при рабо-

чих диапазонах изменения скольжений машин ЭВ и проверить результаты теоретического исследования на математической модели электрического вала.

**Изложение материала и его результаты.** Примем следующие исходные допущения при проведении исследований:

- 1) рабочие потокосцепления АМ постоянны;
- 2) потерями в стали и добавочными потерями пренебрегаем;
- 3) воздушный зазор АМ равномерен;
- 4) питающие напряжения синусоидальны и симметричны;

5) для упрощения расчета происходящих процессов, ограничимся рассмотрением лишь небольших угловых отклонений  $\theta_1$  и  $\theta_2$  от соответствующих положений равновесия  $\varphi_{10}$  или  $\varphi_{20}$  (только в этом случае дифференциальные уравнения ЭВ являются линейными и имеют постоянные коэффициенты).

Если принять во внимание вышеперечисленные допущения, то процессы в ССВ можно записать системой уравнений [4]:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \frac{d^2}{dt^2} \theta_1 + d_{11} \frac{d}{dt} \theta_1 + d_{12} \frac{d}{dt} \theta_2 + c_1(\theta_1 - \theta_2) &= 0 \\ J_2 \frac{d^2}{dt^2} \theta_2 + d_{22} \frac{d}{dt} \theta_2 + d_{21} \frac{d}{dt} \theta_1 + c_2(\theta_2 - \theta_1) &= 0 \end{aligned} \right\}, (1)$$

где  $\theta_1, \theta_2$  – угловые отклонения от положений равновесия;  $d_{11}, d_{12}, d_{22}, d_{21}$  – коэффициенты демпфирования, которые характеризуют затухание колебаний (подобны коэффициентам вязкого трения в механических валах);  $c_1, c_2$  – удельные синхронизирующие моменты, характеризующие жесткость электрического вала;  $J_1, J_2$  – приведенные моменты инерции масс на валах каждой из машин электрического вала.

Составим в операторном виде характеристическое уравнение для решения системы (1):

$$\begin{aligned} p^3 J_1 J_2 + p^2 (J_1 d_{11} + J_2 d_{22}) + \\ + p (J_1 c_2 + J_2 c_1 + d_{11} d_{22} + d_{12} d_{21}) + \\ + c_1 (d_{22} + d_{21}) + c_2 (d_{11} + d_{12}) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Решение данного характеристического уравнения (2) определяют собой характер уравнительного движения ССВ. Однако, ввиду того, что это уравнение является уравнением третьей степени, рассмотрение всех возможных физических процессов для такого общего уравнения затруднительно. Поэтому имеет смысл исследовать процессы в ССВ на примере некоторых конкретных случаев.

В данной статье ограничимся исследованием на примере дистанционного ЭВ (ДЭВ). Дистанционным принято считать ЭВ, у которого на одной из сторон отсутствует основная машина. Для дистанционного вала характерно то, что момент инерции на валу машины-датчика во много раз превышает момент инерции машины-приемника (например, это наблюдается в приводах станков для вращающихся масс приводов шпинделя и суппорта). Для случая, когда вращающиеся массы настолько сильно отличаются между

собой, возникают качания (заметные колебания) только на стороне с малой вращающейся массой. Демпфирование оказывает эффективное действие также только на стороне этой массы. Для случая  $J_1 \gg J_2$ , разделив характеристическое уравнение на параметр  $J_1$  и пренебрегая членами с параметром  $J_1$  в знаменателе, упростим уравнение (2) до дифференциального уравнения второго порядка [4]:

$$p^2 + p \frac{d_{22}}{J_2} + \frac{c_2}{J_2} = 0, \quad (3)$$

соответствующего колебательному переходному процессу.

Решение данного уравнения находится в виде:

$$\theta_v = \hat{\theta}_v e^{-\frac{t}{2T_d}} \cos(\Omega t - \varepsilon_v), \quad (4)$$

где полученные корни равны

$$p_{1,2} = -\frac{d_{22}}{2J_2} \pm j \sqrt{\left( \frac{c_2}{J_2} - \left( \frac{d_{22}}{2J_2} \right)^2 \right)}. \quad (5)$$

В соотношениях (4) и (5) используются следующие обозначения:

$\hat{\theta}_v$  и  $\varepsilon_v$  – постоянные интегрирования (находятся, исходя из произвольных начальных условий, для угла рассогласования  $\varphi_{v(0)}$  и угловой скорости  $\theta'_{v(0)}$  в момент времени  $t = 0$ );

$$T_d = \frac{J_2}{d_{22}} \quad (6)$$

постоянная времени затухания, с;

$$\Omega = \sqrt{\left( \frac{c_2}{J_2} - \left( \frac{d_{22}}{2J_2} \right)^2 \right)} \quad (7)$$

резонансная частота колебаний, с<sup>-1</sup>;

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{c_2}{J_2}} \quad (8)$$

собственная частота колебаний, с<sup>-1</sup>.

Согласно критерию устойчивости Гурвица для коэффициентов уравнения третьей степени вида

$$p^3 a_0 + p^2 a_1 + p a_2 + a_3 = 0 \quad (9)$$

должны быть выполнены следующие условия [5]:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &> 0; \\ a_1 a_2 - a_0 a_3 &> 0; \\ a_3 &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для обеспечения устойчивости ДЭВ, описываемого уравнением (3), также должны выполняться условия (10), а динамическое исследование устойчивости электрического вала в общем виде заключается в анализе встречающихся в уравнении движения (3) коэффициентов ( $c$  и  $d$ ) и проверке выполнения условий из (10). В рассматриваемом случае для ДЭВ коэффициент  $a_3 \equiv 0$ , и единственным условием для динамической устойчивости является всегда положительный коэффициент демпфирования.

Для расчета коэффициентов демпфирования  $d_{22}$  и жесткости  $c_2$  ЭВ воспользуемся следующими формулами [4]:

$$\left. \begin{aligned} c_{22} &= \frac{3}{2} \frac{p_n}{\omega_0} U_1 I_\mu (1-\sigma) s \times \\ &\times \frac{s(\alpha^2 + \sigma) \sin p_n \varphi - \beta(1 + \alpha^2)(1 - \cos p_n \varphi)}{(1 + \alpha^2)[(\alpha\beta - s\sigma)^2 + (\beta + s\alpha)^2]}, \\ d_{22} &= \frac{3}{2} \frac{p_n}{\omega_0} U_1 I_\mu (1-\sigma) \left\{ (1 + \alpha^2)\beta[1 + \alpha^2] + \right. \\ &+ s\alpha(1 - \sigma)] + s^2(\sigma + \alpha^2)^2 + \\ &+ s\alpha^2(1 - \sigma)(\sigma + \alpha^2) \sin p_n \varphi + \\ &+ s\alpha(1 - \sigma)[\beta(1 + \alpha^2) + s\alpha(1 - \sigma)] \cos p_n \varphi \left. \right\} / \\ &/ \left\{ (1 + \alpha^2)[(\alpha\beta - s\sigma)^2 + (\beta + s\alpha)^2] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где:  $p_n$  – число пар полюсов машин ЭВ;  $\omega_0$  – скорость поля статора,  $1/c$ ;  $\alpha = r_1/x_1$  – коэффициент затухания обмотки статора;  $(\beta = r_2/x_2)$  – коэффициент затухания обмотки ротора;  $\sigma = 1 - x_0^2/(x_1 x_2)$  – коэффициент рассеяния обмоток статора и ротора;  $U_1$  – напряжение сети статора, В;  $I_\mu$  – ток намагничивания, А;  $J_1, J_2$  – моменты инерции соединяемых механизмов 1 и 2, кг·м<sup>2</sup>;  $x_1, x_2, x_0$  – индуктивные сопротивления обмоток статора, ротора и контура намагничивания АМ, Ом;  $c$  – коэффициент жесткости вала, Нм;  $d$  – коэффициент демпфирования колебаний вала, Нм.

При дальнейших исследованиях влияния параметров схемы ЭВ на коэффициенты  $c$  и  $d$  (которыми определяются его основные статические и динамические свойства) используем программу Microsoft Excel. В этой программе с применением формулы (3) произведены расчеты и построены графики. В качестве примера использованы асинхронные машины с фазным ротором типа МТ-51-8 (с номинальной мощностью, равной 22 кВт, и синхронной частотой вращения равной 750 об/мин). На рис. 1 представлены рассчитанные зависимости удельного синхронизирующего момента  $c$  (рис. 1, а) от угла рассогласования и при скольжении  $s = 0,2$ , а также коэффициента демпфирования  $d$  (рис. 1, б) от скольжения  $s$  при различных значениях сопротивлений статора  $R_s$  и ротора  $R_r$ . На рис. 2 и рис. 3, приведены так же зависимости, но – с разными значениями индуктивных сопротивлений рассеяния статора:  $X_s = 2X_{sn}$  (для рис. 2) и  $X_s = 0$  (для рис. 3). При этом графики зависимостей с измененными значениями индуктивного сопротивления ротора не приводятся, так как практически совпадают с характеристиками при изменении индуктивного сопротивления статора  $X_s$  (рис. 2 и рис. 3).

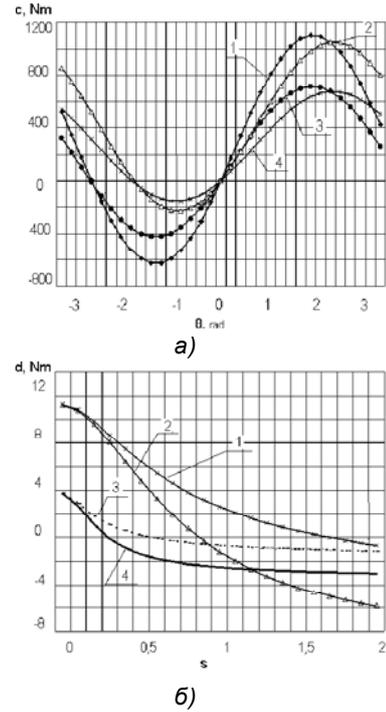


Рис. 1. Зависимости: а – удельного синхронизирующего момента  $c$  от угла рассогласования  $\theta$  (1 –  $R_r = 0,05$  Ом,  $R_s = 0,053$  Ом; 2 –  $R_r = 0,15$  Ом,  $R_s = 0,053$  Ом; 3 –  $R_r = 0,05$  Ом,  $R_s = 0,159$  Ом; 4 –  $R_r = 0,15$  Ом,  $R_s = 0,159$  Ом); б) коэффициента демпфирования от скольжения при разных значениях сопротивлений статора и ротора (1 –  $R_r = 0,15$  Ом,  $R_s = 0,159$  Ом; 2 –  $R_r = 0,15$  Ом,  $R_s = 0,053$  Ом; 3 –  $R_r = 0,05$  Ом,  $R_s = 0,159$  Ом; 4 –  $R_r = 0,05$  Ом,  $R_s = 0,053$  Ом)

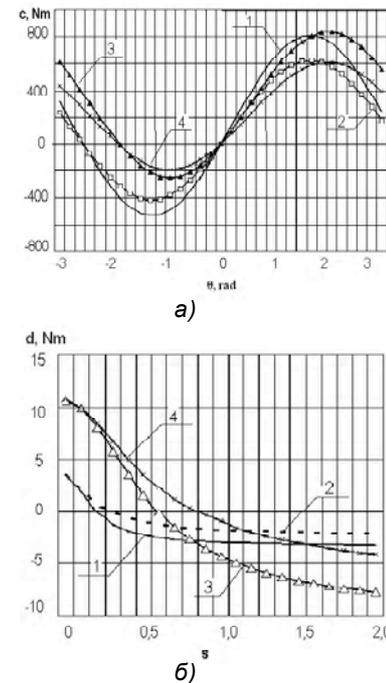


Рис. 2. Зависимости коэффициентов  $c(\theta)$  и  $d(s)$  при различных значениях сопротивлений  $R_s$  и  $R_r$  (1 –  $R_r = 0,05$  Ом,  $R_s = 0,053$  Ом; 2 –  $R_r = 0,15$  Ом,  $R_s = 0,053$  Ом; 3 –  $R_r = 0,05$  Ом,  $R_s = 0,159$  Ом; 4 –  $R_r = 0,15$  Ом,  $R_s = 0,159$  Ом) при удвоенном значении индуктивного сопротивления рассеяния статора  $X_s = 2X_{sn}$

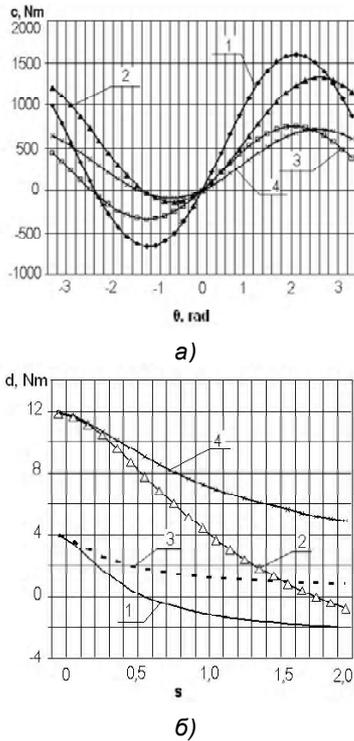


Рис. 3. Зависимости коэффициентов  $c(\theta)$  и  $d(s)$  при значении индуктивного сопротивления статора  $X_s = 0$  (1 –  $R_r = 0,05 \text{ Ом}$ ,  $R_s = 0,053 \text{ Ом}$ ; 2 –  $R_r = 0,15 \text{ Ом}$ ,  $R_s = 0,053 \text{ Ом}$ ; 3 –  $R_r = 0,05 \text{ Ом}$ ,  $R_s = 0,159 \text{ Ом}$ ; 4 –  $R_r = 0,15 \text{ Ом}$ ,  $R_s = 0,159 \text{ Ом}$ )

Для проверки полученных зависимостей воспользуемся цифровой моделью ЭВ, разработанной в среде SIMULINK пакета MATLAB, описанной в статье [6] (шаг интегрирования выбран переменным: с максимальным значением  $10^{-6}$  с, минимальным – не ограниченным). Рассчитаем и построим на рис. 4 характеристики (зависимость жесткости ЭВ от угла рассогласования) соответствующие плавному нарастанию нагрузки. В качестве примера, ниже приведены квазистатические характеристики ЭВ (моментов  $c$  от угла рассогласования) с указанными типами АМ при изменении сопротивлений статора и ротора:  $R_s = 3R_1$ ,  $R_r = 3R_2$  и скольжении  $s = 0,2$ , – которые получены при плавном нарастании момента (на рис. 4, б для отрицательных, на рис. 4, а для положительных углов рассогласования).

**Выводы**

1. Увеличение активных сопротивлений статора и ротора уменьшают удельный синхронизирующий момент (рис. 1, а) и увеличивают коэффициент демпфирования (рис. 1, б). Таким образом, несмотря на снижение нагрузочной способности ЭВ, за счет этого можно придать ССВ дополнительную динамическую устойчивость.

2. При увеличении активного сопротивления ротора возрастает асинхронная составляющая момента машин ЭВ, что приводит: к росту удельных синхронизирующих моментов при положительных углах рассогласования или их снижению – при отрицательных углах. При увеличении активного сопротивления статора наблюдается снижение удельного синхронизи-

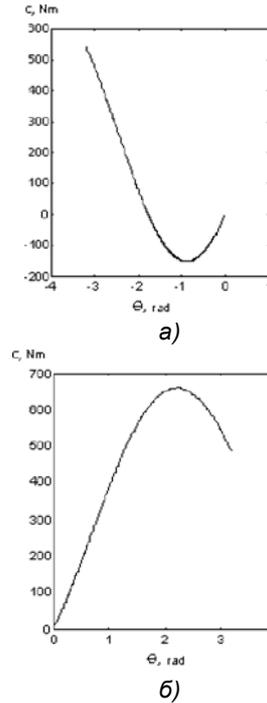


Рис. 4. Квазистатические характеристики удельного синхронизирующего момента ЭВ при отрицательных (а) и положительных (б) углах рассогласования  $\theta$

рующего момента в большей степени, но характеристика удельных синхронизирующих моментов становится более симметричной при положительных и отрицательных углах. Таким образом, увеличивать сопротивление ротора более выгодно в случае дистанционного ЭВ с пассивным моментом сопротивления (например, приводы подач станков). В том случае, если важна симметричность статических характеристик ЭВ, более выгодно увеличивать активное сопротивление статора или одновременно статора и ротора.

3. Увеличение индуктивных сопротивлений статора и ротора отрицательно влияет на статические и динамические характеристики ЭВ. Снижение их значений даже на незначительную величину оказывает положительное влияние на показатели ЭВ, так как увеличиваются коэффициент демпфирования и удельный синхронизирующий момент. Это, в свою очередь, оправдывает выбор машин электрического вала с малым индуктивным сопротивлением  $X_k$  Короткого замыкания.

4. Установлено, что квазистатические характеристики удельного синхронизирующего момента (рис. 4), полученные в результате моделирования ЭВ с учетом электромагнитных процессов в АМ [6], практически совпадают с характеристикой на рис. 1, полученной без учета электромагнитных процессов (при тех же значениях статорных и роторных сопротивлений). Это подтверждает результаты расчета удельных синхронизирующих моментов по формулам (11).

**Перечень ссылок**

1. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода : учебник для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – 6-е изд. доп. и перераб. – М. : Энергоиздат, 1981. – 226 с.
2. Андреев В. П. Основы электропривода / В. П. Анд-

- реев, Ю. А. Сабинин. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 674 с.
3. Чиликин М. Г. Теория автоматизированного электропривода. Учеб. пособие для вузов / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – М. : Энергия, 1979. – 544 с.
  4. Флоренс У. Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей / У. Флоренс, И. Гейнц. – Л. : Энергия, 1971. – 71 с.
  5. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы / Д. П. Ким. – М. : ФИЗМАТ-ЛИТ, 2003. – 93 с.
  6. Макурин А. В. Сравнение свойств электрического и механического валов методом цифрового моделирования / А. В. Макурин, Д. И. Морозов, И. С. Шевченко // сб. науч. тр. ДонГТУ. – Алчевск : ДонГТУ, 2007. – С. 412–421.

Поступила в редакцию 05.11.07 г.

После доработки 16.11.08 г.

*Наведені результати теоретичних досліджень, отримані результати моделювання, проведений аналіз впливу параметрів схеми електричного вала на його статичні та динамічні властивості.*

*The results of theoretical researches are given, the results of modeling are received, analysis of the influence of the electric shaft circuit parameters on its static and dynamic properties is performed.*

УДК 621.313

А. В. Волков, Н. Л. Антонов

## Усовершенствованное оптимальное по быстродействию векторное регулирование статорного тока асинхронного двигателя, питаемого от автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией

*Предложено усовершенствованное оптимальное по быстродействию векторное регулирование статорного тока для асинхронного двигателя, питаемого от автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Методом имитационного моделирования проведено исследование достигаемого быстродействия отработки статорного тока и частоты переключения силовых ключей инвертора в установившихся режимах.*

Принимая во внимание, что быстродействие регулирования главных параметров режима (электромагнитного момента, потокосцепления, скорости, положения) частотно-регулируемых асинхронных электроприводов (ЧРАЭП) определяется быстродействием контуров регулирования намагничивающей и активной проекций статорного тока асинхронного двигателя (АД) [1], достижение предельного (оптимального) по быстродействию векторного регулирования статорного тока в ЧРАЭП является актуальной и востребованной практикой задачей.

В настоящее время повышение быстродействия регулирования статорного тока АД в ЧРАЭП достигается тремя известными путями (способами): во-первых, за счет повышения частоты модуляции силовых ключей автономного инвертора напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) – для систем автоматического управления (САУ) с явно выраженными модуляторами [2]; во-вторых, – за счет использования прямого управления моментом (ДТС-управления) [3, 4]; либо, в-третьих, – за счет применения прогнозирующего релейно-векторного регулирования статорного тока АД, обеспечивающего оптимальное по быстродействию регулирование активной составляющей статорного тока АД [5]. При этом первые два спо-

соба уступают последнему по быстродействию, а второй способ отличается от остальных увеличенными пульсациями статорного тока двигателя в установившихся и динамических режимах (вызывая дополнительные электрические потери в двигателе) [1, 5, 6]. Вместе с тем, всем перечисленным известным способам быстродействующего векторного регулирования статорного тока присущ общий недостаток – относительно повышенная частота переключения силовых ключей инвертора в установившихся режимах работы (которая приводит, в свою очередь, к увеличению динамических потерь мощности в инверторе и двигателе).

Целью статьи является разработка и исследование усовершенствованного способа векторного регулирования статорного тока АД при питании от АИН-ШИМ, характеризующегося предельным быстродействием – в динамических режимах работы и минимальной частотой переключения силовых ключей инвертора – в установившихся режимах работы электропривода.

Разработанный способ рассмотрим применительно к ЧРАЭП с упрощенным двухзвенным непосредственным преобразователем частоты (УДНПЧ) [7], показанному функциональной схемой на рис. 1 и содержащему: трехфазные активный выпрямитель АВ

© А. В. Волков, Н. Л. Антонов 2009 г.