

- 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.

(на силових ключах V1–V6) и автономный инвертор АИН (на силовых ключах V7–V12); системы управления активным выпрямителем СУАВ и инвертором СУИ; сетевой фильтр СФ; блок датчиков сетевого напряжения БДСН и вычислитель напряжения ВН; блоки датчиков статорных напряжений БДН и тока БДТ асинхронного двигателя АД; блок идентификации параметров БИП и систему векторного регулирования статорного тока СВРТ.

При этом последняя содержит: вычислитель отклонений (ВО) проекций статорного тока; вычислитель выходного напряжения (ВВН) преобразователя частоты; вычислитель результирующего напряжения (ВРН); прямые координатные преобразователи КП1 и КП2; блок задания комбинаций (БЗК) силовых ключей; блоки оптимального управления БОУ1 и БОУ2; блок релейных элементов БРЭ; мультиплексор МП; блок регистров БР; блок сравнения отклонений проекций статорного тока БСОПТ. Причем, блок релейных элементов БРЭ состоит из релейных элементов гистерезисного типа РЭ1 и РЭ2; блок регистров БР состоит из регистров Р1 и Р2; а блок БСОПТ содержит: вычислители модулей ВМ1 и ВМ2, компараторы К1 и К2, релейные элементы гистерезисного тока РЭ3 и РЭ4, логические элементы «ИЛИ1» и «ИЛИ2», формирователь импульсов ФИ.

Рассмотрим функционирование предложенного регулирования статорного тока. Посредством вычислителя отклонений ВО рассчитываются из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_{sx} &= I_{sx}^* - I_{sx} \\ \Delta I_{sy} &= I_{sy}^* - I_{sy} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

отклонения  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  между заданными  $I_{sx}^*$ ,  $I_{sy}^*$  и фактическими  $I_{sx}$ ,  $I_{sy}$  проекциями статорного тока двигателя (на оси вращающейся ортогональной системы «x-y», ориентированной вещественной осью «x» по обобщенному вектору потокосцепления ротора  $\bar{\Psi}_r$  двигателя), а с помощью вычислителей БДСН и ВН – вычисляется выходное напряжение  $U_d$  на выходе активного выпрямителя АВ. Исходя из данного напряжения  $U_d$ , вычислитель ВВН определяет для всех возможных комбинаций  $m = 1, 2, \dots, 7$  силовых ключей инвертора согласно табл. 1 (где «+» — обозначает открытое, а «-» — закрытое состояние ключей) значения проекций  $U_{m\alpha}$ ,  $U_{m\beta}$  обобщенных векторов  $\bar{U}_m$  АИН на оси неподвижной ортогональной системы «α-β».

С помощью вычислителя ВРН рассчитываются для всех возможных комбинаций силовых ключей АИН значения проекций  $\Delta U_{m\alpha}$ ,  $\Delta U_{m\beta}$  результирующего вектора напряжения  $\Delta \bar{U}_m$  из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{m\alpha} &= U_{m\alpha} - kE_{r\alpha} \\ \Delta U_{m\beta} &= U_{m\beta} - kE_{r\beta} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Таблица 1. Состояние силовых ключей и соответствующие значения обобщенных векторов выходного напряжения АИН

Номер комбинации	Модуль $U_m$	Аргумент $\Theta_m$	Состояния силовых ключей АИН					
			V7	V8	V9	V10	V11	V12
1	$\frac{2U_d}{3}$	0	+	-	-	+	-	+
2	$\frac{2U_d}{3}$	$\pi/3$	+	-	+	-	-	+
3	$\frac{2U_d}{3}$	$2\pi/3$	-	+	+	-	-	+
4	$\frac{2U_d}{3}$	$\pi$	-	+	+	-	+	-
5	$\frac{2U_d}{3}$	$4\pi/3$	-	+	-	+	+	-
6	$\frac{2U_d}{3}$	$5\pi/3$	+	-	-	+	+	-
7	0	$2\pi$	-	+	-	+	-	+
	0	$2\pi$	+	-	+	-	+	-

где  $kE_{r\alpha}$ ,  $kE_{r\beta}$  – приведенные (к статору) проекции обобщенного вектора ЭДС ротора двигателя. Посредством второго координатного преобразователя КП2 вычисляются значения проекций  $\Delta U_{mx}$ ,  $\Delta U_{my}$  (на оси ортогональной координатной системы «x-y», связанной осью «x» с обобщенным вектором потокосцепления ротора  $\bar{\Psi}_r$ ) всех возможных к созданию прогнозируемых результирующих векторов напряжения  $\Delta \bar{U}_m$ .

Рассмотрим функционирование СВРТ на рис. 1 в динамических режимах. В данных режимах формируемые на выходах вычислителей модуля ВМ1 и ВМ2 абсолютные значения  $|\Delta I_{sx}|$  и  $|\Delta I_{sy}|$  отклонений проекций статорного тока характеризуются тем, что хотя бы одно из них превышает величину:  $(h_x + \Delta h_x)$  или  $(h_y + \Delta h_y)$ . При этом на диаграмме на рис. 2 задается внутри прямоугольника ABCD область установившихся режимов (наступивших после отработки статорного тока), а за пределами прямоугольника  $A_1B_1C_1D_1$  — область динамических режимов. В рассматриваемых динамических режимах хотя бы у одного из релейных элементов РЭ3 и РЭ4 формируется выходной сигнал, равный лог. «1». При этом с выхода логического элемента ИЛИ2 на управляющий вход мультиплексора МП поступает сигнал  $Q_1$ , равный лог. «1», который вызывает состояние мультиплексора, показанное на рис. 1. При данном состоянии с выхода блока оптимального управления БОУ1 через мультиплексор МП и блок задания комбинаций БЗК на вход сис-

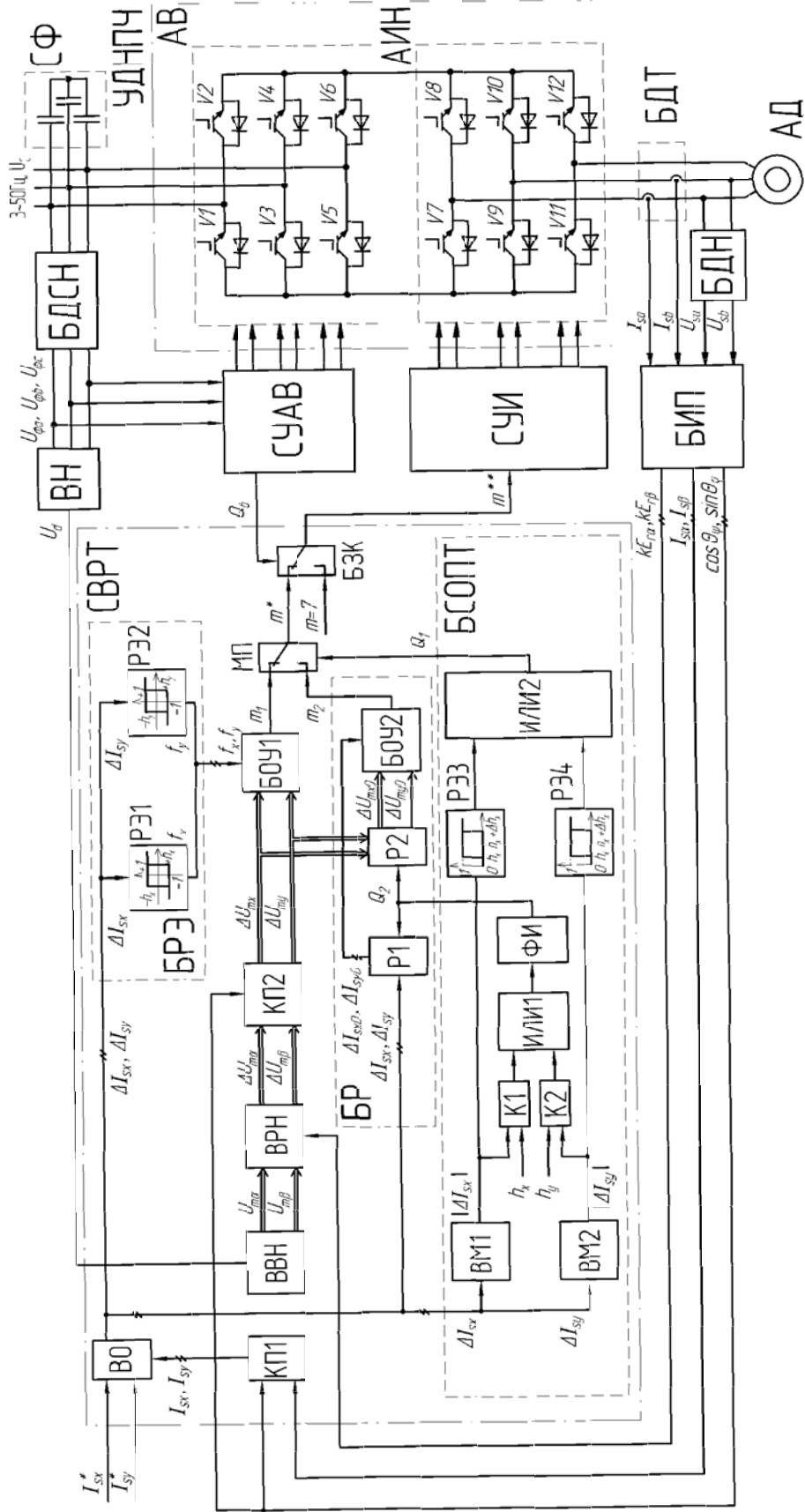


Рис. 1. Функциональная схема ЧРЭП на основе УДНПЧ с предложенным усовершенствованным оптимальным по быстродействию векторным регулированием статорного тока

темы управления инвертором поступает сигнал:  $m^{**} = m_1$  (который обеспечивает оптимальное по быстродействию регулирование активной проекции  $I_{sy}$  статорного тока двигателя в динамических режимах, характеризующееся диаграммой отработки статорного тока, показанной на рис. 3).

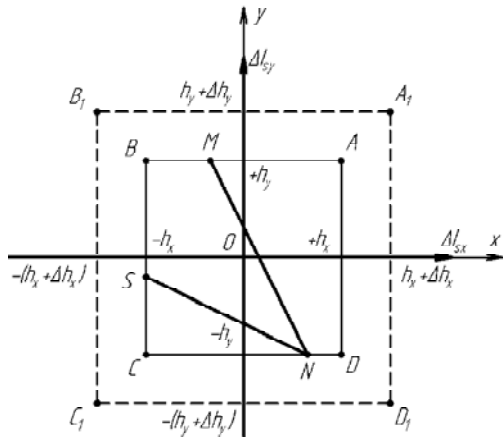


Рис. 2. Диаграмма, иллюстрирующая для усовершенствованного оптимального по быстродействию регулирования допустимые области отклонений проекций  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  статорного тока двигателя: внутри ABCD – в установившихся режимах, за пределами  $A_1B_1C_1D_1$  – в динамических режимах

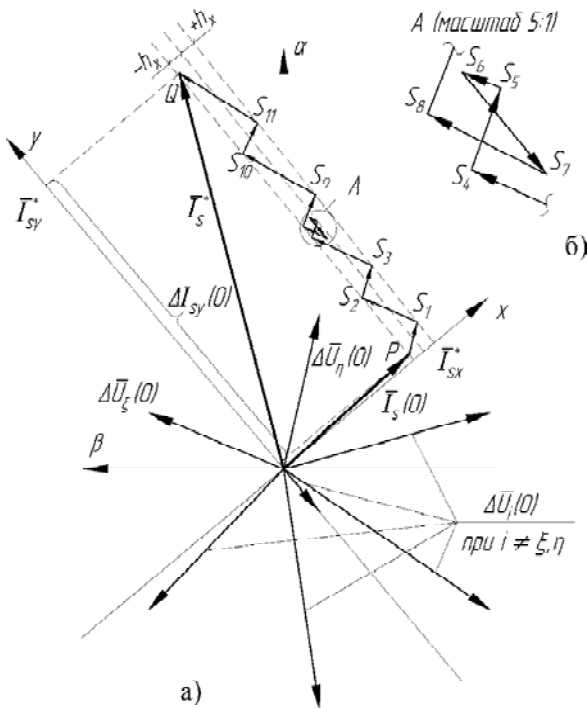


Рис. 3. Векторная диаграмма, иллюстрирующая оптимальную по быстродействию отработку статорного тока двигателя в ЧРАЭП с УДНПЧ (а – полная диаграмма; б – фрагмент диаграммы, соответствующий комбинации  $m^{**} = 7$  силовых ключей инвертора).

Через поступающие на входы релейных элементов РЭ1 и РЭ2 отклонения  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока на выходах этих элементов формируются гистерезисного типа (показанные внутри этих элементов в схеме на рис. 1) релейные функции  $f_x$  и  $f_y$ , принимающие два значения: +1 или -1. В блоке оптимального управления БОУ1: во-первых, рассчитывается прогнозирующий функционал  $F_1(m)$  в виде:

$$\left. \begin{aligned} F_1(m) &= K_1 f_y \Delta U_y(m), \\ K_1 &= 1 + \text{sign}[f_x \Delta U_x(m)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Во-вторых, из рассчитанных значений  $F_1(m)$  прогнозирующего функционала для всех возможных комбинаций (из табл. 1) силовых ключей АИН находится экстремальное (наибольшее) значение этого функционала:

$$F_1^o = F_1(m_1) = \max. \quad (4)$$

И, в-третьих, определяется соответствующая этому значению комбинация  $m_1$  силовых ключей инвертора. С учетом эквивалентности функционала  $F_1(m)$  из (3) оптимальному по быстродействию регулированию из [5], указанная комбинация  $m_1$  способна реализовать предельно возможное по быстродействию регулирование активной проекции  $I_{sy}$  статорного тока двигателя (при котором в заданных токовых коридорах:

$$I_{sx}^* - h_x \leq I_{sx} \leq I_{sx}^* + h_x, \quad (5)$$

поддерживается значение намагничивающей проекции  $I_{sx}$  статорного тока двигателя).

По окончании отработки активной проекции  $I_{sy}$  статорного тока значения отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока достигают границ (например, в точке М) допустимой области ABCD на рис. 2. В данный момент времени на выходе одного из компараторов К1 или К2 происходит изменение выходного сигнала из лог. «1» в лог. «0» (в частности, у того из этих компараторов, у которого произошло сравнение абсолютного значения  $|\Delta I_{sx}|$  или  $|\Delta I_{sy}|$  отклонения  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  с границей  $h_x$  или  $h_y$  допустимой области). Это приводит к изменению выходного сигнала логического элемента ИЛИ1 из лог. «1» в лог. «0», что вызывает, в свою очередь, формирование узкого (длительностью несколько микросекунд) импульса  $Q_2$ , равного лог. «1», на выходе формирователя импульсов ФИ. При воздействии указанного сигнала  $Q_2$  на управляющие входы регистров Р1 и Р2 на выходе этих регистров устанавливаются сигналы, равные их входным сигналам в данный момент времени (напомним,

что этот момент времени соответствует точке М на границе допустимой области ABCD на рис. 2). По окончании данного сигнала  $Q_2$  (после изменения его значения на лог. «0») запрещается изменение выходных сигналов регистров P1 и P2. Вследствие чего на выходах указанных регистров сохраняются значения соответственно:  $\Delta I_{sx0}$ ,  $\Delta I_{sy0}$  и  $\Delta U_{mx0}$ ,  $\Delta U_{my0}$ , – присутствующие на выходе вычислителя отклонений ВО и второго координатного преобразователя КП2 в момент времени, соответствующий нахождению отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекции статорного тока в точке М на границе допустимой области отклонений на рис. 2.

Через данные значения  $\Delta I_{sx0}$ ,  $\Delta I_{sy0}$  и  $\Delta U_{mx0}$ ,  $\Delta U_{my0}$  в блоке оптимального управления БОУ2 рассчитываются: во-первых, для всех возможных комбинаций ( $m = 1, 2, \dots, 7$ ) открытых и закрытых силовых ключей АИН значения второго прогнозирующего функционала  $F_2(m)$ :

$$\left. \begin{aligned} F_2(m) &= \min\{F_{2x}(m), F_{2y}(m)\}, \\ F_{2x}(m) &= \frac{\Delta I_{sx0} + h_x \left\{ \text{sign}[\Delta U_{mx0}(m)] \right\}}{\Delta U_{mx0}(m)}, \\ F_{2y}(m) &= \frac{\Delta I_{sy0} + h_y \left\{ \text{sign}[\Delta U_{my0}(m)] \right\}}{\Delta U_{my0}(m)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Во-вторых, находится экстремальное (наибольшее) значение этого функционала

$$F_2^o = \max\{F_2(m)\} = F_2(m_2) \quad (7)$$

и, в-третьих, определяется соответствующая этому значению комбинация  $m_2$  силовых ключей инвертора.

Поясним физический смысл функционала  $F_2(m)$  на примере траектории MN изменения отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока в установившемся режиме внутри допустимой области ABCD на рис. 2. Как известно из [8], в ЧРАЭП с УДНПЧ для произвольной  $m$ -ой комбинации открытых и закрытых силовых ключей инвертора траектория MN представляет собой отрезок прямой, а производные по времени от проекций  $I_{sx}$ ,  $I_{sy}$  статорного тока приближенно равны:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_{sx}}{dt} &\approx \frac{\Delta U_{mx0}}{L_\sigma}, \\ \frac{dI_{sy}}{dt} &\approx \frac{\Delta U_{my0}}{L_\sigma} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $L_\sigma$  – суммарная индуктивность рассеяния АД.

Исходя из этого, текущие значения  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  отклонений проекций статорного тока можно прогнозировать через их начальные значения  $\Delta I_{sx0}$ ,  $\Delta I_{sy0}$  (соответствующие точке М на границе допустимой области ABCD на рис. 2) для  $m$ -ой комбинации силовых ключей инвертора в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_{sx} &= \Delta I_{sx0} - \frac{\Delta U_{mx0}}{L_\sigma} t, \\ \Delta I_{sy} &= \Delta I_{sy0} - \frac{\Delta U_{my0}}{L_\sigma} t \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $t$  – здесь текущее время, отсчитываемое от момента времени нахождения указанных отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  в точке М (на границе допустимой области ABCD на рис. 2).

Принимая во внимание полученные зависимости (9), прогнозируемые времена  $t_{mx}$ ,  $t_{my}$  достижения отклонениями  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока других (противоположных или соседних) границ допустимой области ABCD на рис. 2 (соответственно заданных значениями:  $\pm h_x$  – по оси «х» или значениями:  $\pm h_y$  – по оси «у») определяются из решения следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \pm h_x &= \Delta I_{sx0} - \frac{\Delta U_{mx0}}{L_\sigma} t_{mx}, \\ \pm h_y &= \Delta I_{sy0} - \frac{\Delta U_{my0}}{L_\sigma} t_{my} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

С учетом того, что согласно (9) при положительных значениях проекций  $\Delta U_{mx0}$ ,  $\Delta U_{my0}$  результирующего вектора напряжения  $\Delta \vec{U}_{m0}$  происходит уменьшение значений отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций тока (приводящее к последующему достижению ими отрицательных значений границ:  $-h_x$  и  $-h_y$  допустимой области ABCD на рис. 2), а при отрицательных значениях  $\Delta U_{mx0}$ ,  $\Delta U_{my0}$  – происходит, наоборот, увеличение значений упомянутых отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  (приводящее к последующему достижению этими отклонениями положительных границ:  $+h_x$  и  $+h_y$  допустимой области), преобразуем зависимости из (10) к следующему виду:

$$\left. \begin{aligned} -h_x \text{sign}(\Delta U_{mx0}) &= \Delta I_{sx0} - \frac{\Delta U_{mx0}}{L_\sigma} t_{mx}, \\ -h_y \text{sign}(\Delta U_{my0}) &= \Delta I_{sy0} - \frac{\Delta U_{my0}}{L_\sigma} t_{my} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Из решения последних зависимостей находятся упомянутые прогнозируемые времена  $t_{mx}$ ,  $t_{my}$  достижения проекциями  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока других (противоположных или соседних) границ (характеризующихся значениями:  $\pm h_x$  и  $\pm h_y$ , – соответственно по оси «х» или «у») допустимой области ABCD на рис. 2 при произвольной  $m$ -ой комбинации силовых ключей инвертора:

$$\left. \begin{aligned} t_{mx} &= \frac{L_\sigma}{\Delta U_{mx0}} \left\{ \Delta I_{sx0} + h_x [\text{sign}(\Delta U_{mx0})] \right\}, \\ t_{my} &= \frac{L_\sigma}{\Delta U_{my0}} \left\{ \Delta I_{sy0} + h_y [\text{sign}(\Delta U_{my0})] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

В свою очередь, из зависимостей (12) определяется для произвольной  $m$ -ой комбинации силовых ключей АИН время  $t_m$  нахождения отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  в пределах допустимой области ABCD на рис. 2 – в виде минимального значения из рассчитанных времен  $t_{mx}$  и  $t_{my}$ :

$$t_m = \min \{ t_{mx}, t_{my} \}. \quad (13)$$

Принимая во внимание прямо пропорциональную зависимость переменных  $F_{2x}(m)$ ,  $F_{2y}(m)$  и  $F_2(m)$  из (6) соответственно от рассмотренных значений времен  $t_{mx}$ ,  $t_{my}$  и  $t_m$  из (12) и (13), получим, что в физическом смысле прогнозирующий функционал  $F_2(m)$  прямо пропорционален времени  $t_m$  присутствия отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока внутри допустимой области ABCD на рис. 2 для установившихся режимов работы. С учетом этого определенное посредством БОУ2 из соотношения (7) экстремальное значение  $F_2^o$  прогнозирующего функционала  $F_2(m)$  соответствует наибольшему (для всех возможных комбинаций силовых ключей инвертора) времени:  $t_m = t_m^o = \max$ , – присутствия отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока внутри допустимой области ABCD на рис. 2.

При этом во время нахождения отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  внутри или на границе допустимой области ABCD на рис. 2, характеризующейся соотношениями:

$$-h_x \leq \Delta I_{sx} \leq +h_x \text{ и } -h_y \leq \Delta I_{sy} \leq +h_y, \quad (14)$$

у обоих релейных элементов РЭЗ и РЭ4 выходные сигналы равны лог. «0». Вследствие этого на выходе логического элемента ИЛИ2 присутствует сигнал  $Q_1$ , также равный лог. «0» и поступающий на управляющий вход мультиплексора МП (обеспечивающий состояние последнего, противоположное показанному на рис. 1). При данном состоянии мультиплексора МП

с выхода блока оптимального управления БОУ2 через мультиплексор МП и блок задания комбинаций БЗК на вход системы управления инвертором поступает такое заданное значение комбинации:  $m^{**} = m_2$  силовых ключей инвертора, которое обеспечивает в установившемся режиме наибольшее возможное время  $t_m^o$  присутствия отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций тока внутри допустимой области отклонений ABCD на рис. 2 (при заданных значениях границ  $h_x$  и  $h_y$  этой области). А, следовательно, – минимально возможную частоту переключения силовых ключей АИН в установившемся режиме (что, очевидно, в свою очередь, уменьшает динамические электрические потери в ЧРАЭП с УДНПЧ в данном режиме).

Рассмотрим работу СВРТ на рис. 1 в установившемся режиме, когда отклонения  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока находились внутри допустимой области ABCD (рис. 2) и достигли границы (в точке N) этой области. При этом на границе указанной области хотя бы у одного из компараторов К1 или К2 выходной сигнал изменяется из лог. «0» в лог. «1». Вследствие этого, аналогично, изменяется из лог. «0» в лог. «1» выходной сигнал логического элемента ИЛИ1, поступающий на вход формирователя импульсов ФИ. Последний при изменении фронта (из лог. «0» в лог. «1») входного сигнала формирует на своем выходе узкий (длительностью несколько микросекунд) сигнал  $Q_2$ , равный лог. «1». При воздействии этого сигнала на управляющие входы регистров Р1 и Р2 (содержащихся в составе блока регистров БР) на выходе этих регистров устанавливаются: новые значения  $\Delta I'_{sx0}$ ,  $\Delta I'_{sy0}$  отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока и новые значения  $\Delta U'_{mx0}$ ,  $\Delta U'_{my0}$  проекций  $\Delta U_{mx}$ ,  $\Delta U_{my}$  прогнозируемых результирующих векторов напряжения, – которые соответствуют точке N на границе допустимой области на рис. 2. Через данные сигналы, поступающие на входы блока оптимального управления БОУ2, последний рассчитывает для всех возможных комбинаций ( $m = 1, 2, \dots, 7$  из табл. 1) силовых ключей инвертора значения прогнозирующего функционала  $F_2(m)$  и находит экстремальное значение  $F_2^o$  этого функционала, а также – определяет соответствующую ему комбинацию  $m'_2$  силовых ключей инвертора. Данная комбинация  $m'_2$  задается с выхода блока БОУ2 через мультиплексор МП и блок задания комбинаций БЗК в систему управления инвертором. Указанная комбинация  $m'_2$  обеспечивает возвращение (по траектории NS на рис. 2) отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока внутрь допустимой для них области (ABCD на рис. 2) и задает минимально возможную (при заданных границах  $h_x$  и  $h_y$  допустимой области) частоту переключения силовых ключей инвертора в установившемся режиме. Далее работа СВРТ на рис. 1 для установившегося режима повторяется.

Рассмотрим функционирование СВРТ на рис. 1, когда при выходе отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока из допустимой области (ABCD на рис. 2) хотя бы одно из их абсолютных значений  $|\Delta I_{sx}|$ ,  $|\Delta I_{sy}|$  превышает уставку, равную:  $(h_x + \Delta h_x)$  или  $(h_y + \Delta h_y)$ . Очевидно, это соответствует на рис. 2 выходу отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  за пределы прямоугольника  $A_1B_1C_1D_1$ , что означает наступление динамического режима отработки отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  статорного тока. В этом случае хотя бы у одного из релейных элементов РЭЗ или РЭ4 в схеме на рис. 1 устанавливается выходной сигнал, равный лог. «1». Вследствие этого изменяется на лог. «1» выходной сигнал логического элемента ИЛИ2, что приводит к изменению состояния (на соответствующее показанному на рис. 1) мультиплексора МП. При этом с выхода блока оптимального управления БОУ1 задается (через мультиплексор МП и блок БЗК) комбинация  $m_1$  открытых и закрытых силовых ключей инвертора такой, которая обеспечивает оптимальное по быстродействию регулирование активной проекции статорного тока двигателя в динамических режимах работы. Далее работа СВРТ, показанной в схеме на рис. 1, повторяется.

При этом дополнительно (ко всему выше рассмотренному) регулярно (с повторением через каждые 3,3 мс) с выхода системы управления активным выпрямителем СУАВ на управляющий вход БЗК поступает сигнал  $Q_b$ , который кратковременно (длительностью 50–100 мкс) принудительно задает на выходе СВРТ комбинацию  $m^{**} = 7$  силовых ключей инвертора (предназначенную для осуществления бестокового переключения силовых ключей активного выпрямителя АВ, входящего в состав УДНПЧ) [6]. Данной комбинации соответствует отрезок  $S_6$ – $S_7$  годографа отработки статорного тока на векторной диаграмме на рис. 3.

Из анализа рассмотренного функционирования СВРТ на рис. 1 сформулируем кратко сущность предложенного усовершенствованного оптимального по быстродействию векторного регулирования статорного тока при питании от АИН. Данное управление заключается: во-первых, в вычислении (для всех возможных комбинаций силовых ключей инвертора) значений прогнозирующего функционала  $F_1(m)$ , прямо пропорционального времени отработки активной составляющей статорного тока в динамических режимах, а также в нахождении экстремального (наибольшего) значения  $F_1^o$  этого функционала и в определении соответствующей этому значению комбинации  $m_1$  силовых ключей инвертора. Во-вторых, – в сравнении текущих отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока с допустимой для этих отклонений областью в установившихся режимах работы. В-третьих, – в задании для динамических режимов работы (когда указанные отклонения  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  находятся за предела-

ми допустимой области отклонений) упомянутой комбинации  $m_1$  силовых ключей инвертора, обеспечивающей предельно возможное по быстродействию регулирование активной проекции статорного тока. В-четвертых, – при вхождении отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  внутрь допустимой области (что соответствует установившимся режимам работы) рассчитывают для всех возможных комбинаций силовых ключей инвертора значения второго прогнозирующего функционала  $F_2(m)$ , прямо пропорционального времени присутствия отклонений  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  внутри допустимой для них области при установившихся режимах, находят экстремальное (наибольшее) значение  $F_2^o$  этого функционала и определяют соответствующую этому значению комбинацию  $m_2$  открытых и закрытых силовых ключей инвертора. В-пятых, – в задании при установившихся режимах работы (когда отклонения  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  находятся внутри допустимой для них области отклонений) упомянутой комбинации  $m_2$  силовых ключей инвертора, обеспечивающей минимально возможную частоту переключения силовых ключей инвертора в установившихся режимах.

Проведено моделирование (при значениях границ:  $h_x = h_y = \Delta h_x = \Delta h_y = h = 0,5A$ , – допустимых областей ABCD и  $A_1B_1C_1D_1$  на рис. 2) предложенного усовершенствованного оптимального по быстродействию регулирования статорного тока для двигателя 4А132S6УЗ (мощностью 5,5 кВт): при различных скоростях и ступенчатом изменении сигнала задания  $\Delta I_{sy}(0)$  активной проекции статорного тока. Показанные на рис. 4 графики (для скорости, равной половине от номинальной) иллюстрируют изменение фазных значений  $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$ ,  $I_{sc}$  и модуля  $I_s$  обобщенного вектора статорного тока, электромагнитного момента М и фазного статорного напряжения  $U_{sa}$  этого двигателя при отработке положительной и отрицательной полярности однократного и двукратного значений активной проекции вектора статорного тока.

Результаты сравнения времени отработки активной проекции статорного тока для ЧРАЭП с УДНПЧ при оптимальном по быстродействию из [5] и при предложенном усовершенствованном оптимальном по быстродействию регулировании статорного тока представлены в табл. 2. При этом под указанным временем отработки будем понимать длительность времени, затрачиваемого от начала отработки тока до момента времени достижения отклонениями  $\Delta I_{sx}$ ,  $\Delta I_{sy}$  проекций статорного тока границ допустимой для них области ABCD на рис. 2 (соответствующей установившемуся режиму после отработки тока). Результаты сравнения частоты переключения силовых ключей инвертора для ЧРАЭП с УДНПЧ в установившихся режимах работы, соответствующие упомянутым известному из [5] и предложенному усовершенствованному оптимальному по быстродействию регулированию статорного тока, приведены в табл. 3.

Согласно данным из табл. 2 установлено, что в ди-

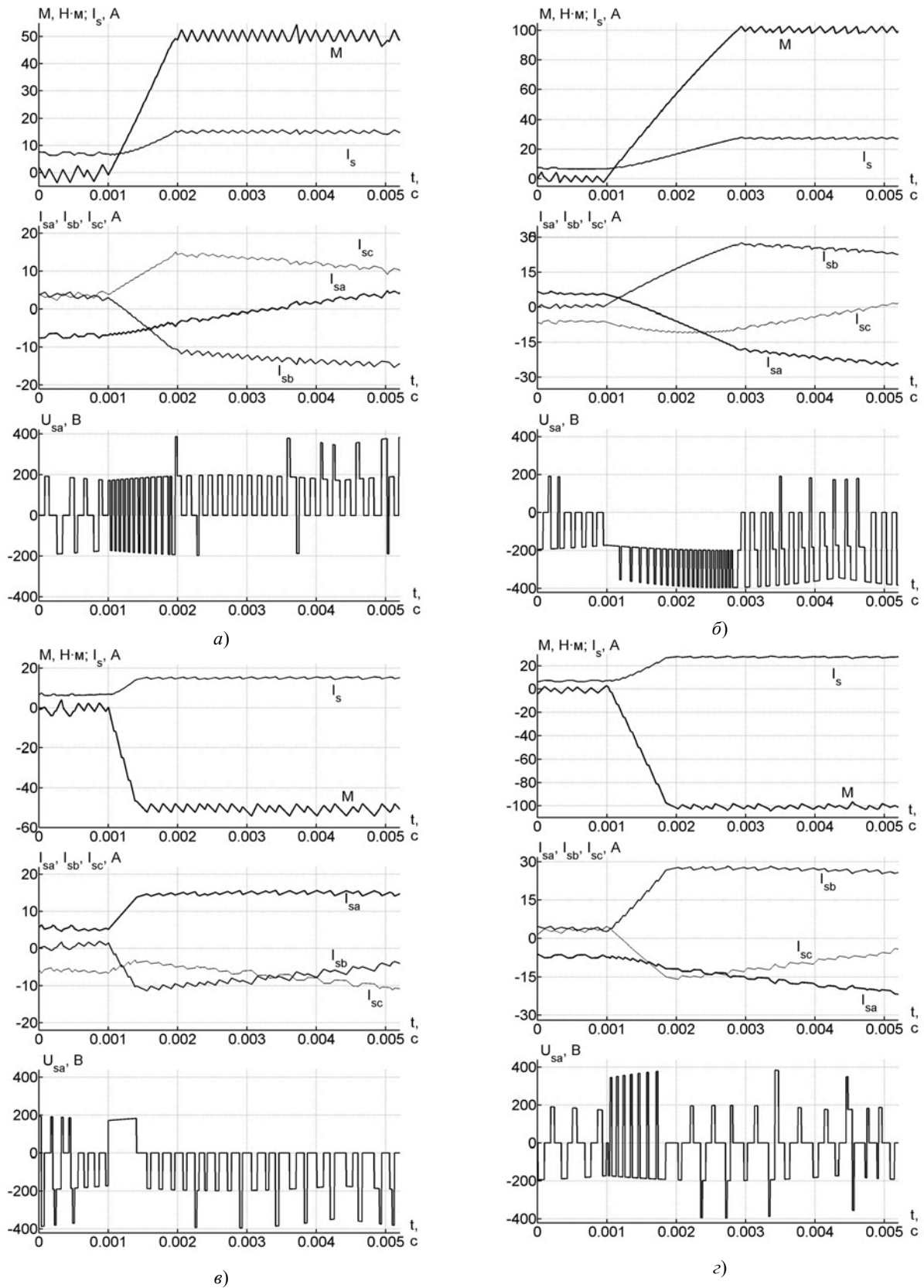


Рис. 4. Временные диаграммы, иллюстрирующие обработку активной проекции вектора статорного тока для электродвигателя 4A132S6У3 при скорости, равной половине от номинальной: для положительной (*a*), *б*) или отрицательной (*в*), *г*) заданной активной проекции статорного тока; для однократного (*a*), *в*) или двукратного (*б*), *г*) значения указанной проекции тока.



Таблица 2. Времена обработки активной проекции статорного тока при известном и усовершенствованном оптимальном по быстродействию регулировании статорного тока

Активная составляющая статорного тока		Вид оптимального управления	Время отработки, мс		
			Относительная скорость двигателя, о. е.		
Значение	Полярность		0	0,5	0,9
Однократное (от номинального)	+	известное	0,516	0,950	1,488
		усовершенствованное			
	-	известное	0,510	0,478	0,282
		усовершенствованное			
Двукратное (от номинального)	+	известное	1,022	1,772	5,556
		усовершенствованное			
	-	известное	1,004	0,868	0,646
		усовершенствованное			

Таблица 3. Частота переключения силовых ключей в установившихся режимах при известном и усовершенствованном оптимальном по быстродействию регулировании статорного тока

Кратность момента нагрузки (по отношению к номинальному)	Вид оптимального управления	Ширина $h_x = h_y$ токовых «коридоров», А	Частота переключения силовых ключей, кГц		
			Относительная скорость двигателя, о. е.		
			0	0,5	0,9
+2	известное	0,5	11,44	7,94	4
	усовершенствованное	0,5	2,05	3,89	2,9
+1	известное	0,5	11,85	8,93	5,13
	усовершенствованное	0,5	0,97	3,5	3,41
0	известное	0,5	11,54	9,51	5,9
	усовершенствованное	0,5	1,28	3,09	3,35
-1	известное	0,5	11,58	10,33	7,07
	усовершенствованное	0,5	0,96	2,84	3,54
-2	известное	0,5	11,39	10,75	7,9
	усовершенствованное	0,5	2,12	3,03	3,7

намических режимах времена обработки статорного тока при известном [5] и предложенном усовершенствованном оптимальном по быстродействию регулировании практически между собой равнозначны. Вместе с тем, как следует из табл. 3, при усовершенствованном оптимальном по быстродействию управлении достигнуто (по сравнению с известным оптимальным управлением) в установившихся режимах работы снижение частоты переключения силовых ключей инвертора: в (5,4–9) раза – при нулевой скорости, в (2–3,1) раза – при половине от номинальной скорости или в (1,4–2,2) раза – при скорости, равной 0,9 от номинальной.

### Выводы

1. Установлено, что в динамических режимах значение  $t_{\Sigma 0}$  времени отработки статорного тока в ЧРА-ЭП с УДНПЧ, соответствующее усовершенствованному оптимальному по быстродействию регулированию

не является строго неизменной величиной, а зависит: прямо пропорционально – от значения модуля  $|\Delta I_{sy}(0)|$  обрабатываемого приращения активной проекции вектора статорного тока и значения суммарной индуктивности рассеяния  $L_{\sigma}$  двигателя и обратно пропорционально – от двух (показанных на рис. 3) наибольших возможных текущих значений проекций результирующих обобщенных векторов напряжения  $\bar{U}_{\xi x}$  и  $\Delta U_{\eta x}$  (при условии пренебрежения длительностью времени, затрачиваемого на бестоковое переключение силовых ключей АИН в УДНПЧ).

2. Поскольку указанные проекции  $\Delta U_{\xi x}$  и  $\Delta U_{\eta x}$ , в свою очередь, зависят от взаимного геометрического расположения обобщенных векторов выходного напряжения  $\bar{U}_{\xi x}$  и  $\bar{U}_{\eta x}$  УДНПЧ и оси «у» (вращающейся ортогональной координатной системы «х-у», связан-

ной осью «х» с вектором потокосцепления ротора  $\bar{\Psi}_r$  двигателя), а также от текущего значения модуля  $E_r$  вектора ЭДС ротора  $\bar{E}_r$  (зависящего прямо пропорционально от угловой частоты поля двигателя), то минимальное время отработки  $t_{\Sigma o}$  статорного тока варьируется в зависимости от параметров режима работы АД: текущего взаимного расположения обобщенного вектора потокосцепления ротора  $\bar{\Psi}_r$ , АД относительно указанных обобщенных векторов выходного напряжения  $\bar{U}_{\xi x}$  и  $\bar{U}_{\eta x}$  инвертора и от текущего значения угловой частоты поля (или примерно от скорости) двигателя.

4. Формирование бестоковой паузы во входном токе инвертора при переключении силовых ключей активного выпрямителя в ЧРАЭП с УДНПЧ служит для предотвращения возникновения бросков тока и перенапряжений на силовых ключах АВ при их переключении, для уменьшения динамических потерь мощности в них и повышения их эксплуатационной надежности. Причем, осуществляемое для этого принудительное кратковременное (в течение 50–100 мкс при повторении через каждые 3,3 мс) одновременное замыкание в одном полюсе трех силовых ключей АИН оказывает очень незначительное влияние на общее время отработки. В частности, как показали проведенные исследования, при этом общее время отработки однократного или двукратного от номинального значения активной составляющей статорного тока от влияния указанной бестоковой паузы изменяется менее, чем на (5–15)%.

### Перечень ссылок

1. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-им-

- пульсной модуляцией / Г. Г. Пивняк, А. В. Волков. – Дніпропетровськ : НГУ, 2006. – 470 с.
2. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург : Изд-во УРО РАН, 2000. – 654 с.
3. Дацковский Л. Х. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) / Л. Х. Дацковский, В. И. Роговой, В. Н. Абрамов [и др.] // Электротехника. – 1996. – № 10. – С. 18–28.
4. Перельмутер В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В. М. Перельмутер. – Харьков : Основа, 2004. – 210 с.
5. Волков А. В. Оптимальное по быстродействию векторное регулирование статорного тока в частотно-управляемых асинхронных электроприводах с широтно-импульсной модуляцией / А. В. Волков // Электротехника. – 2003. – № 12. – С. 34–42.
6. Волков А. В. Регулирование положения в асинхронных электроприводах с релейным частотно-токовым управлением / А. В. Волков, Н. Л. Антонов // Электротехника. – 2006. – № 11. – С. 23–35.
7. Волков А. В. Высокодинамичный асинхронный электропривод с двухзвенным непосредственным преобразователем частоты / А. В. Волков, Н. Л. Антонов // Техн. електродинаміка / Тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2006. – Ч. 4. – С. 65–70.
8. Волков А. В. Анализ электромагнитных процессов в асинхронной машине, питаемой от двухзвенного непосредственного преобразователя частоты / А. В. Волков, Н. Л. Антонов // Электротехніка та електроенергетика. – 2005. – № 2. – С. 54–59.

Поступила в редакцию 30.12.08 г.

*Запропоновано вдосконалити оптимальне за швидкістю векторне регулювання статорного струму для асинхронного двигуна, що живиться від автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією. Методом імітаційного моделювання проведено дослідження досяжної швидкодії відпрацювання статорного струму та частоти переключення силових ключів інвертора в сталих режимах роботи.*

*The advanced optimum on speed vector regulation of stator current for the asynchronous motor powered by voltage source inverter with pulse-width modulation is executed. The research of attainable performance of stator current speed and frequency of switching power keys of inverter in the steady state is carried out by the method of imitating modeling.*