

УДК 621.313.8

## КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНЫХ МОМЕНТОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

**А.Е. Антонов**, докт. техн. наук, **К.П. Акинин**, докт. техн. наук, **В.Г. Киреев**, канд. техн. наук, **А.А. Филоменко**

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина  
e-mail: aoe@ied.org.ua

*Разработана и исследована система управления двухроторным двигателем возвратно-вращательного движения, реализующая активную компенсацию реактивных знакопеременных моментов, возникающих при работе некоторых типов ручных инструментов с электроприводом. Рассмотрен вариант построения устройства, в котором на компенсирующий привод не действуют никакие другие нагрузки кроме сопротивления подшипников. Учено действие реактивных моментов, влияющих на привод основного (рабочего) ротора, характер которых соответствует вязкому трению и моменту упругости. Библ. 2, рис. 4, таблица.*

**Ключевые слова:** активная компенсация, электромагнитный момент, система управления.

Во время работы с технологическим инструментом, содержащим электропривод возвратно-вращательного движения, существует проблема защиты оператора от вредного воздействия вибрации корпуса, обусловленной действием реактивных знакопеременных моментов, создаваемых приводом инструмента. В работе [1] рассмотрен принципиальный подход к решению проблемы виброзащиты, суть которого состоит в создании компенсирующих моментов, действующих синхронно и противофазно моментам, создаваемым основным приводом инструмента во всем диапазоне рабочих частот. Для реализации такого способа компенсации предложена структура двухроторного двигателя возвратно-вращательного движения, условием компенсации реакции в котором является равенство нулю суммы моментов, действующих на оба ротора устройства в каждый момент времени. Структура двухроторного двигателя, реализующего активную компенсацию реактивных знакопеременных моментов, приведена на рис. 1. Здесь 1, 2 – намагниченные роторы; 3, 4 – магниты статора, создающие упругие связи между роторами и корпусом с обмотками; 5, 6 – валы, на которых установлены магниты роторов; 7, 8 – обмотки управления; 9, 10 – концентричные друг другу обрабатывающие насадки; 11 – магнитопровод статора.

Ориентация осей намагничивания магнитов статора 3 и 4 взаимно противоположна, благодаря чему магниты 1 и 2, проворачиваясь в подшипниках под действием сил взаимного магнитного притяжения, устанавливаются так, что оси их намагничивания располагаются противоположно. При этом общее направление потока магнитной индукции всех магнитов системы оказывается согласным. Каждая из обмоток управления состоит из двух зеркально отраженных катушек, электрические оси которых нормальны оси вращения роторов.

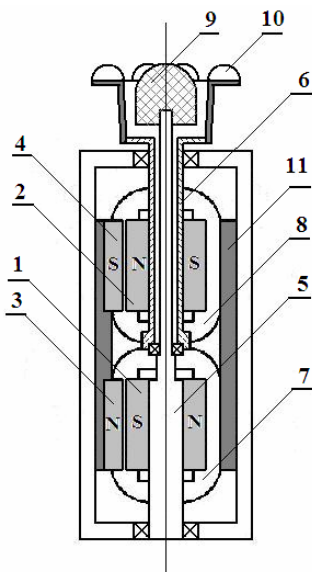


Рис.1

При подключении обмоток к источнику тока возникают моменты взаимодействия между обмотками управления и магнитами роторов. Ввиду противоположной ориентации магнитных потоков магнитов 1 и 2 моменты их взаимодействия с обмотками имеют противоположные знаки, в результате чего роторы отклоняются в противоположные стороны, а благодаря взаимному вычитанию реактивных моментов, прикладываемых к корпусу инструмента, суммарный момент, действующий на него, обращается в нуль и рука, удерживающая инструмент, не ощущает вибрации. Однако полная компенсация реактивного момента основного привода мо-

жет быть достигнута только при абсолютной идентичности основного и компенсирующего приводов и действующих на них нагрузок. В реальных же условиях из-за отличия характеристик постоянных магнитов, технологических отклонений катушек и особенно площадей поверхностей рабочих насадок компенсация реакции оказывается неполной. В этом случае для достижения полной компенсации вибрации корпуса инструмента необходимо регулировать координаты основного и компенсирующего роторов.

**Управление возвратно-вращательным движением роторов.** Корпус вибрирующего инструмента во время работы удерживается рукой, которая накладывает на него связь в виде момента упругости и вязкого трения, обусловленных свойствами мышц и кожи руки. В конечном счете субъективным критерием эффективности подавления знакопеременной реакции привода является степень ощущения вибровоздействия человеком, удерживающим инструмент. И хотя чувствительность рук у всех различна, задача системы активной компенсации состоит в максимальном приближении угла отклонения корпуса инструмента к нулю во всем диапазоне нагрузочных моментов, действующих на рабочий орган привода.

В рабочем режиме на рабочий орган инструмента действует нагрузочный момент. Характер его зависит от среды, с которой он взаимодействует. Если для выполнения полезной работы используется только один ротор, а на втором роторе насадка отсутствует или насадки неодинаковы, как показано на рис. 1, то условия работы основного и компенсирующего приводов будут существенно отличаться. В данном исследовании рассмотрена работа двухроторного устройства с одной насадкой при нагрузке, которая возникает в процессе контакта с телом человека во время проведения медицинских процедур лимфодренажа и дерматонии. Характер нагрузки в этом случае соответствует упругому моменту и вязкому трению, обусловленных свойствами мышц и кожи человека.

Учтем особенности рассматриваемой электромеханической системы:

1. Моменты инерции основного и компенсирующего роторов  $J_1$ ,  $J_2$ , а также момент инерции корпуса инструмента  $J_3$  различны.
2. Частота первой гармоники  $f$  вынужденных колебаний основного ротора регулируется в диапазоне от 1 до 100 Гц.
3. Предполагается токовое управление статорными обмотками основного и компенсирующего роторов соответственно

$$i_1 = I_{1A} \sin \omega t ; \quad (1)$$

$$i_2 = I_{2A} \sin(\omega t - \varphi_2), \quad (2)$$

где  $I_{1A}$ ,  $I_{2A}$  – амплитуды токов статорных обмоток;  $\varphi_2$  – фазовый сдвиг тока компенсирующей обмотки;  $\omega = 2\pi f$ .

4. Выходным параметром системы регулирования основного ротора является амплитуда его колебаний относительно корпуса  $\alpha_1$ .

5. Для компенсации реакции на корпус инструмента необходимо поддерживать разность динамических моментов основного и компенсирующего роторов на нулевом уровне.

6. Рассматриваемая система характеризуется нелинейными зависимостями амплитуды и фазового сдвига колебаний роторов от заданной частоты и прикладываемой нагрузки. Ранее было выявлено наличие резонанса в заданном диапазоне частот регулирования.

Механическая часть системы описывается уравнениями

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = \Delta M_1 ; \quad \frac{d\alpha_1}{dt} = \omega_1 ; \quad J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = \Delta M_2 ; \quad \frac{d\alpha_2}{dt} = \omega_2 ;$$

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = \Delta M_2 - \Delta M_1 - M_{B3} - M_{V3} ; \quad \frac{d\alpha_3}{dt} = \omega_3 ,$$

где  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – угловые скорости и углы поворота валов основного и компенсирующего роторов, а также корпуса;  $\Delta M_1$ ,  $\Delta M_2$  – динамические моменты на валах основного

и компенсирующего роторов;  $M_{B3}$ ,  $M_{V3}$  – момент вязкого трения и момент, определяемый упругостью, соответственно.

Динамические моменты определяются двигательными моментами основной и компенсирующей систем  $M_1$  и  $M_2$ , реактивными моментами сопротивления подшипников  $M_{P1}$  и  $M_{P2}$ , моментами сопротивления вязкого трения  $M_{B1}$  и  $M_{B2}$ , моментами сопротивления, определяемыми действием магнитных пружин  $M_{V1}$  и  $M_{V2}$ . Кроме того, механическая нагрузка основного ротора характеризуется наличием вязкого трения (момент  $M_{H1}$ ), то есть  $\Delta M_1 = M_1 - M_{P1} - M_{B1} - M_{V1} - M_{H1}$ ;  $\Delta M_2 = M_2 - M_{P2} - M_{B2} - M_{V2}$ .

Указанные составляющие моментов определяются как

$$M_1 = k_{m1} i_1 \cos \alpha_1; M_2 = k_{m2} i_2 \cos \alpha_2;$$

$$M_{P1} = M_{II} \text{ при } \omega_1 > 0 \text{ и } M_{P1} = -M_{II} \text{ при } \omega_1 < 0;$$

$$M_{P2} = M_{II} \text{ при } \omega_2 > 0 \text{ и } M_{P2} = -M_{II} \text{ при } \omega_2 < 0;$$

$$M_{B1} = k_B \omega_1; M_{B2} = k_B \omega_2; M_{V1} = k_V \sin \alpha_1; M_{V2} = k_V \sin \alpha_2; M_{H1} = k_{BH} \omega_1,$$

где  $k_{m1}$ ,  $k_{m2}$  – постоянные коэффициенты основного и компенсирующего двигателей;  $M_{II}$  – статический момент сопротивления подшипников;  $k_B$  – коэффициент вязкости;  $k_V$  – коэффициент упругости магнитной пружины;  $k_{BH}$  – коэффициент вязкости нагрузки.

Для электромеханической системы с основным и компенсирующим роторами, разработанной в ИЭД НАН Украины для прибора медицинского назначения, проведены расчеты амплитудно-частотных характеристик  $\alpha_{1A}(f)$  и  $\alpha_{3A}(f)$  при следующих ее параметрах:  $M_{II} = 0,0002$  Нм;  $I_{1A} = 0,2$  А,  $I_{2A} = 0$ ;  $k_B = 0,000065$ ;  $k_V = 0,0448$ ;  $k_{BH} = 0$ ;  $J_2 = 0,0000024$  кг $\times$ м $^2$ ;  $J_3 = 0,0000514$  кг $\times$ м $^2$  для трех значений момента инерции  $J_1 = 0,0000015$  кг $\times$ м $^2$ ,  $0,0000024$  кг $\times$ м $^2$ ,  $0,0000033$  кг $\times$ м $^2$ ;  $k_{m1} = k_{m2} = 0,125$  Нм/А. Эти характеристики приведены на рис. 2 и 3, из которых следует, что амплитуды отклонений основного и компенсирующего роторов нестабильны и нуждаются в регулировании.

Сформулируем основные принципы построения рассматриваемой системы с учетом ее особенностей.

1. Для стабилизации задаваемой амплитуды колебаний основного ротора  $\alpha_{1A}$  необходимо построение соответствующей системы автоматического регулирования (САР).

2. Задачей системы компенсации является выполнение условий  $\alpha_{1A} = A_1$  и  $\Delta\alpha = 0$ , где  $A_1$  – заданное значение амплитуды угла отклонения основного ротора.

3. Поскольку непосредственное измерение угла поворота корпуса  $\alpha_3$  затруднительно, в качестве выходного компенсируемого параметра принимается разность переменных перио-

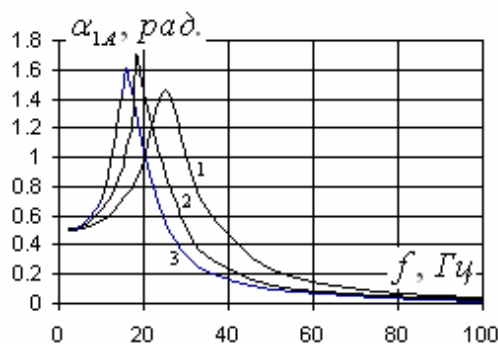


Рис. 2

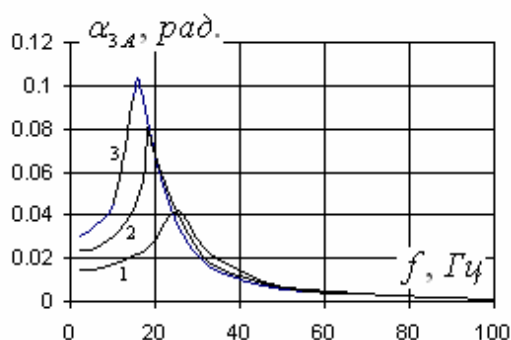


Рис. 3

дических колебаний:  $\Delta\alpha = \alpha_1 - \frac{J_2}{J_1} \alpha_2$ .

4. Для достижения компенсации реакции необходимо построение системы векторного управления компенсирующим ротором [2], то есть необходима реализация САР амплитуды  $I_{2A}$  и фазового сдвига  $\varphi_2$  входного тока статора  $i_2$  компенсирующей системы. Для этого необходимо формирование сигналов рассогласования по амплитуде  $\Delta I_{2A}$  и фазовому сдвигу  $\Delta\varphi_2$  на основании измерений переменных  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

5. Сигнал  $\Delta I_{2A}$  должен быть однополярным и принимать положительное или отрицательное значение в зависимости от величины фазы переменного сигнала  $\Delta\alpha - 0$  или  $\pi$  радиан.

6. На каждом полупериоде колебаний необходимо определять фазовый сдвиг переменной  $\alpha_2$  относительно переменной  $\alpha_1$ .

**Реализация регулятора амплитуды тока основной обмотки:**

$$A_1 = A_o(1 - \exp(-t/T_o)); \alpha_{1A} = \max\{|\alpha_1|\};$$

$$I_{1A}(n) = I_{1A}(n-1) + k_{p1}(A_1 - \alpha_{1A})T_K; I_{1A}(n) = I_{\max 1} \text{ при } I_{1A}(n) > I_{\max 1},$$

где  $n$  – номер отсчета;  $k_{p1}$  – коэффициент передачи регулятора амплитуды тока;  $T_K$  – период квантования;  $I_{\max 1}$  – амплитуда тока основной обмотки;  $A_o$  – задание амплитуды отклонения  $\alpha_1$ ;  $T_o$  – постоянная времени интенсивности нарастания амплитуды тока.

**Формирование сигнала рассогласования по амплитуде на основании измерений переменных  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .** Сигнал рассогласования должен быть однополярным и принимать положительное или отрицательное значение в зависимости от фазы сигнала  $\Delta\alpha - 0$  или  $\pi$  радиан. Для этого сигнал  $\Delta\alpha$  необходимо суммировать с синфазным опорным переменным сигналом вида  $y_o = a_o \sin(\omega t + \varphi_o)$ , где  $a_o > \max\{\Delta\alpha\}$ , а из модуля полученной суммы вычесть модуль опорного сигнала. Предлагается такая последовательность действий:

$$y_1(n) = \text{sign}(\alpha_1);$$

$$T_1(n) = T_1(n-1) + T_K; T_1 = 0 \text{ при } y_1(n) - y_1(n-1) > 1;$$

$$y_o = a_o \cdot \sin \omega T_1; y_2 = |\Delta\alpha + y_o| - |y_o|,$$

где  $T_1$  – таймер, сброс которого происходит по положительному фронту сигнала  $y_1 = \text{sign}(\alpha_1)$ ;  $y_2$  – сигнал рассогласования по амплитуде тока компенсирующей обмотки.

**Реализация регулятора амплитуды тока компенсирующей обмотки:**

$I_{2A}(n) = I_{2A}(n-1) + k_{p2} y_2 T_K; I_{2A}(n) = I_{\max 2} \text{ при } I_{2A}(n) > I_{\max 2}$ , где  $k_{p2}$  – коэффициент передачи регулятора тока;  $I_{\max 2}$  – амплитуда тока обмотки компенсатора.

**Формирование сигнала рассогласования по фазовому сдвигу  $\Delta\varphi_2$ :**

$$T_2(n) = T_2(n-1) + T_K;$$

$$y_3(n) = \text{sign}(\alpha_2); T_2 = 0 \text{ при } y_3(n) - y_3(n-1) > 1;$$

$$\Delta T = -0,5T + T_2 \text{ при } y_3(n) - y_3(n-1) < -1 \text{ и } \alpha_2 > 0;$$

$$\Delta T = T_2 \text{ при } y_3(n) - y_3(n-1) < -1 \text{ и } \alpha_2 < 0;$$

$$\Delta T = -0,5T + T_2 \text{ при } y_3(n) - y_3(n-1) > 1 \text{ и } \alpha_2 < 0;$$

$$\Delta T = T_2 \text{ при } y_3(n) - y_3(n-1) > 1 \text{ и } \alpha_2 > 0;$$

$$\Delta\varphi_2 = 2\pi \Delta T f,$$

где  $T_2$  – второй таймер, сброс которого происходит по положительному фронту сигнала  $y_3 = \text{sign}(\alpha_2)$ ;  $T = 1/f$  – период первой гармоники.

**Реализация регулятора фазового сдвига  $\varphi_2$  тока статора  $i_2$  компенсирующей системы:**  $\varphi_2(n) = \varphi_2(n-1) + k_{p3} \Delta\varphi_2 T_K$ ;  $\varphi_2(n) = 0$  при  $t < 15T$ , где  $k_{p3}$  – коэффициент передачи регулятора фазового сдвига. Действие данного регулятора направлено на совмещение по фазовому углу колебаний основного и компенсирующего роторов.

Момент вязкого трения нагрузки  $M_{H1}$  моделируется таким образом:

$$M_{H1} = k_{BH} \omega_1 (1 - \exp(-(t-t_1)/T_0)) \text{ при } t > t_1;$$

$$M_{H1} = k_{BH} \omega_1 \exp(-(t-t_2)/T_0) \text{ при } t > t_2,$$

где  $t_1, t_2$  – моменты времени начала увеличения и снижения нагрузки.

Для иллюстрации режима векторного управления активной компенсацией реакции

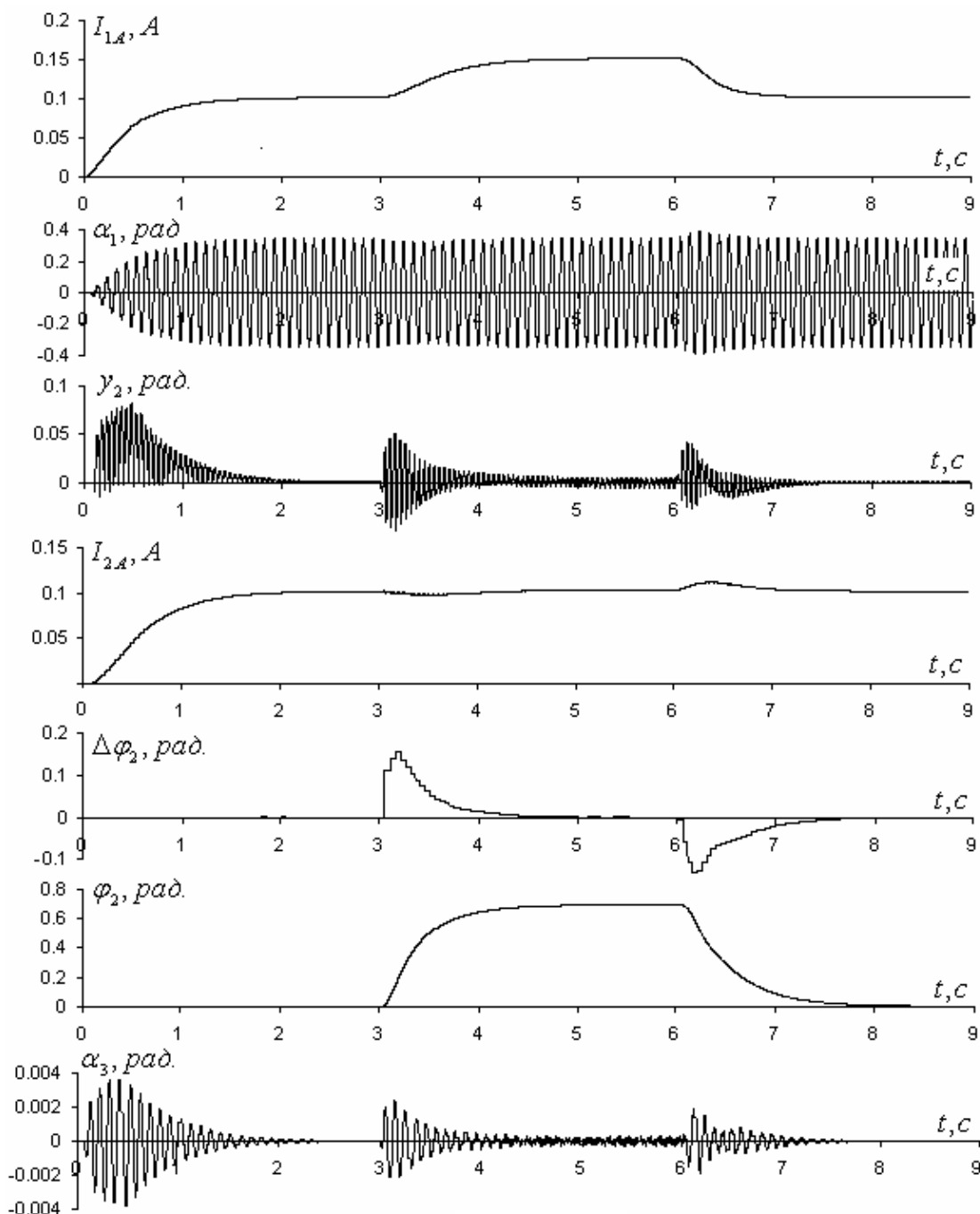


Рис. 4

проведен расчет переходного процесса пуска, увеличения и снижения нагрузки основного привода для частоты колебаний  $f = 10$  Гц при таких параметрах:  $k_{p1} = 2,5$ ;  $I_{\max 1} = 0,2$  А;  $A_0 = \pi/9$ ;  $T_0 = 0,4$  с;  $k_{p2} = 2,5$ ;  $k_{p3} = 10$ ;  $k_{BH} = 0,00055$ ;  $M_{B3} = 0$ ;  $M_{y3} = 0$ ;  $t_1 = 3$  с;  $t_2 = 6$  с, которые были установлены в процессе экспериментального исследования разработанной системы.

На рис. 4 приведены графики переходных процессов для переменных (сверху вниз):

- амплитуда  $I_{1A}$  тока основной статорной обмотки;
- угол поворота  $\alpha_1$  основного ротора;
- сигнал рассогласования  $y_2$  по амплитуде тока компенсирующей обмотки;
- амплитуда  $I_{2A}$  тока статорной обмотки компенсатора;
- сигнал рассогласования по фазовому сдвигу  $\Delta\varphi_2$ ;
- фазовый сдвиг  $\varphi_2$  тока статора  $i_2$  компенсирующей системы;
- угол поворота  $\alpha_3$  корпуса.

Величины амплитуды угла поворота  $\alpha_{3A}$  корпуса в диапазоне частот от 5 до 100 Гц при трех значениях момента инерции основного ротора при работе без нагрузки и под нагрузкой приведены в таблице. Ненулевые значения амплитуды угла колебаний корпуса объясняются наличием в исследуемом сигнале некомпенсированных высших гармоник.

$J_2$ , Кг $\times$ м <sup>2</sup>	Без нагрузки $\alpha_{3A}$ , рад.	Под нагрузкой $\alpha_{3A}$ , рад.
0,0000015	$1,0 \cdot 10^{-5} - 5,2 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5} - 4,3 \cdot 10^{-4}$
0,0000024	$1,9 \cdot 10^{-5} - 7,2 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-5} - 5,0 \cdot 10^{-4}$
0,0000033	$5,8 \cdot 10^{-5} - 8,3 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-5} - 7,4 \cdot 10^{-4}$

### Выводы

1. Применение активной компенсации реактивных моментов в устройствах, содержащих привод возвратно-вращательного движения, эффективно решает проблему защиты работающего с оборудованием специалиста от вредного воздействия вибрации во всем диапазоне регулируемых рабочих частот инструмента.

2. При переменной амплитуде и частоте основного привода систему управления компенсацией целесообразно строить на основе векторного управления амплитудой и фазовым сдвигом тока компенсирующей системы.

3. Степень компенсации колебаний корпуса зависит от величины момента инерции основного ротора (см. таблицу), который может изменяться в зависимости от типа применяемой насадки. Увеличение момента инерции снижает эффективность компенсатора, поэтому момент инерции ротора компенсатора необходимо выбирать исходя из максимально возможного момента инерции основного ротора.

1. Антонов А.Е., Филоменко А.А. Активная компенсация реактивных моментов в электрических машинах магнитоэлектрического типа. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 39. С. 20–24.

2. Воронин С.Г., Курносков Д.А., Кульмухаметова А.С. Векторное управление синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов. *Електротехніка*. 2013. № 10. С. 50–54.

УДК 621.313.8

**О.С. Антонов**, докт. техн. наук, **К.П. Акинін**, докт. техн. наук, **В.Г. Кирєєв**, канд. техн. наук, **А.А. Філоменко**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

**КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНИХ МОМЕНТІВ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ЗВОРОТНО-ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ**  
*Розроблено і досліджено систему керування двороторним двигуном зворотньо-обертального руху, що реалізує активну компенсацію реактивних знакозмінних моментів, які виникають у разі роботи деяких типів ручних інструментів з електроприводом. Розглянуто варіант побудови пристрою, в якому на компенсуючий привод не діють ніякі*

інші навантаження окрім опору підшипників. Враховано дію реактивних моментів, що діють на привод основного (робочого) ротора, характер яких відповідає в'язкому тертю і моменту пружності. Бібл. 2, рис. 4, таблиця.

**Ключові слова:** активна компенсація, електромагнітний момент, система керування.

**O. Antonov, K. Akynin, V. Kyreyev, A. Filomenko**

Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

#### COMPENSATION OF THE REACTIVE TORQUE IN ELECTRIC DRIVE OF A RETURN-ROTARY MOTION

*The control system of a two-rotor motor of reciprocating rotational motion which compensates for the reactive moments during the operation of hand tools with electric drive, is developed and investigated. The system of compensation in which only are load bearing are consider. The action of reactive moments acting on the drive of the main (working) rotor, the character of which corresponds to viscous friction and moment of elasticity, is taken into account. References 2, figures 4, table.*

**Key words:** active compensation, electromagnetic moment, control system.

1. Antonov A.E., Filomenko A.A. Active compensation of reactive moments in electric machines of a magnetoelectric type. *Pratcy Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2014. Выр. 39. С. 20–24. (Rus).

2. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Kulmukhametova A.S. Vector control of synchronous motors with excitation from permanent magnets. *Elektrotehnika*. 2013. № 10. С. 50–54. (Rus).

Надійшла 02.08.2018

Received 02.08.2018

УДК 621.314

### ОСОБЛИВОСТІ КОМПЛЕКСУВАННЯ СЕКЦІЙ ОБВИТКИ ТРАНСФОРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВОЇ ВИКОНАВЧОЇ СТРУКТУРИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗМІННОЇ НАПРУГИ

**К.О. Липківський\***, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровський\*\***, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна  
e-mail: lypkivskyk@ukr.net, AnatMozhrvsk@ukr.net

*Трансформаторно-ключова виконавча структура реалізує перетворення напруги змінного струму за рахунок дискретно-разової (discrete time) зміни коефіцієнтів передачі за напругою шляхом зміни кількості витків обвитки трансформуючого елемента. Основними критеріями якості ТКВС зазвичай обирається ефективність використання трансформуючого та ключових елементів. Показано доцільність врахування й інших критеріїв якості пристрою, зокрема кількості одночасно працюючих ключових елементів, яка визначає сукупні втрати енергії в цих елементах, необхідні параметри радіаторів для відведення тепла від напівпровідникових ключових елементів. Бібл. 12, рис. 3.*

**Ключові слова:** трансформаторно-ключова виконавча структура, перетворювач змінної напруги, discrete time, discrete smart transformer, секція обвитки, ефективність використання.

Виконавчі структури перетворювачів напруги змінного струму, у яких реалізується дискретно-разове (discrete time) [1] регулювання коефіцієнта передачі трансформуючого елемента (ТЕ), широко використовуються у системах електроживлення споживачів, які для оптимального функціонування потребують певного узгодження (adjusting) з конкретними умовами електропостачання [2]. Такі, за нашим визначенням, трансформаторно-ключові виконавчі структури (ТКВС) [3] (у технічній літературі вони мають різноманітні назви, зокрема, discrete smart transformer [4]) апіорі характеризуються багатоваріантністю принципів побудови та виконання.

Один з найбільш розповсюджених типів ТКВС базується на основі виокремлення базової секції  $W_{\text{баз}}$  та низки регулювальних секцій обвитки (обвиток) трансформуючого елемента.