

УДК 629.76.051

## УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ОСОБЫХ РЕЖИМАХ

**А. С. Коновалов,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

**Д. О. Якимовский,**

начальник лаборатории

ФГУП «НИИ командных приборов»

*Рассмотрены вопросы программного разгона ротора гироскопа с газодинамическими опорами и бесконтактным двигателем постоянного тока с постоянными магнитами. Исследовано влияние параметров программы на динамику движения ротора в условиях неустойчивости момента сопротивления в опорах.*

**Ключевые слова** — управление, ротор гироскопа, бесконтактный двигатель, газодинамическая опора.

На космических аппаратах широко используются электроприводы различного назначения. Некоторые из них работают в специфических, особых для данного типа электропривода, режимах. Так, для построения прецизионных инерциальных систем применяют гироскопы с газодинамическими опорами (ГДО) [1, 2]. В качестве приводного двигателя предпочтительно использовать бесконтактный двигатель постоянного тока с постоянными магнитами (БДПТ). Управление коммутатором фаз двигателя осуществляется по сигналам ЭДС статора, которые возникают при вращении ротора. Преимущества такого привода, в сравнении с приводом на базе синхронного гистерезисного двигателя, — это высокая магнитная стабильность ротора, низкое тепловыделение в двигателе, возможность управления, вплоть до исключения, угловыми колебаниями ротора в установившемся режиме [3, 4]. Разгон ротора до величины ЭДС, достаточной для управления двигателем, должен происходить по специальной частотной программе. При этом магнитное поле ротора синхронно отслеживает равноускоренное вращение магнитного поля статора. Динамика программного движения ротора носит колебательный характер и зависит от моментных характеристик БДПТ, характера изменения момента сопротивления нагрузки (для гироскопа — опор ротора) и параметров программы разгона [5]. Особенность заключается в том, что привод работает в условиях жесткого ограничения мощности двигателя и существенной неустойчивости параметров газодинами-

ческой опоры. Ниже приведены результаты исследований режимов запуска миниатюрного гироскопа с ГДО.

При построении модели электропривода приняты следующие допущения:

— кривая синхронизирующего момента двигателя, возникающего при рассогласовании осей полюсов (векторов магнитных полей) ротора и статора на угол  $\theta$ , симметрична относительно начала координат и аппроксимирована синусоидой;

— транзисторы электронного коммутатора фаз БДПТ — идеальные ключи;

— постоянные времени контура регулирования тока БДПТ пренебрежимо малы, переходные процессы в контуре не оказывают влияния на движение ротора.

Математическая модель движения ротора с учетом принятых допущений имеет вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\max} \sin \theta - M_c(\omega),$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega, \quad \theta = \alpha - \varphi^*, \quad \alpha = F_\alpha(t), \quad \varphi^* = \varphi p,$$

где  $J$  — момент инерции ротора;  $\omega$  — скорость вращения ротора;  $M_{\max}$  — момент двигателя;  $\theta$  — угол рассогласования между магнитными полями ротора и статора;  $M_c(\omega)$  — зависимость момента сопротивления в ГДО от скорости вращения ротора;  $\varphi$  — угол поворота ротора;  $\alpha$  — угол поворота вектора магнитного поля статора;  $F_\alpha(t)$  — функция,

описывающая изменение углового положения (вращения) вектора магнитного поля статора во времени;  $\varphi^* = p\varphi$  — угол поворота вектора магнитного поля ротора, эл. град;  $p$  — число пар полюсов двигателя.

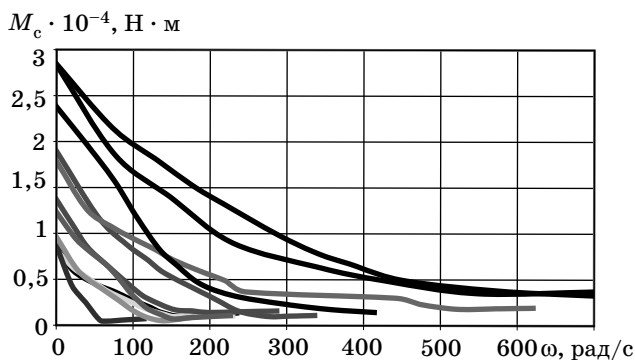
Зависимость момента сопротивления вращению в ГДО имеет сложный характер: содержит участок с отрицательной зависимостью момента от скорости, нестабильна во времени, зависит от состояния поверхностей сфер опор и т. д. [1, 2, 6]. Величина момента сопротивления от начала движения до «всплытия» ротора может изменяться на порядок. Значения момента сопротивления при нулевой скорости и скорость «всплытия» зависят от состояния поверхностей опор и в процессе эксплуатации могут меняться в несколько раз. Изменения могут произойти в одной из опор прибора. Положение в пространстве гироскопа при каждом запуске произвольное, ротор может опираться на любую из опор или на две сразу, поэтому условия каждого нового запуска могут существенно меняться. На рис. 1 показаны зависимости моментов сопротивления от скорости вращения ротора, полученные экспериментально при испытаниях контрольной партии приборов.

В модели зависимость момента сопротивления представлена в виде выражения

$$M_c = M_{c0} e^{-\tau|\omega|} \text{sign}(\omega) + k\omega,$$

где  $M_{c0}$  — момент сил сухого трения в ГДО;  $\tau$  — параметр, характеризующий спадание момента сопротивления при всплытии ГДО;  $k$  — коэффициент вязкого трения в ГДО.

Функция  $F_\alpha(t)$  задана из условия, что вектор магнитного поля статора дискретно равноускоренно вращается из некоторого нулевого положения. Начальная скорость вращения вектора равна нулю, конечная соответствует скорости переключения электропривода в режим управления БДПТ по ЭДС, в рассматриваемом случае  $\omega = 200$  рад/с. Дискретное вращение означает, что вектор магнитного поля статора может поворачиваться на угол — шаг программы, равный (или кратный) некоторому минимальному значению  $\alpha_{\min}$ . Для трехфазных машин просто реализуется  $\alpha_{\min} = 30$  эл. град. Уравне-



■ Рис. 1. Зависимости момента сопротивления в ГДО

ние равноускоренного вращения вектора статора имеет вид

$$\alpha = \alpha_0 + \dot{\alpha}t + \frac{Kt^2}{2},$$

где  $K$  — скорость нарастания частоты вращения поля статора.

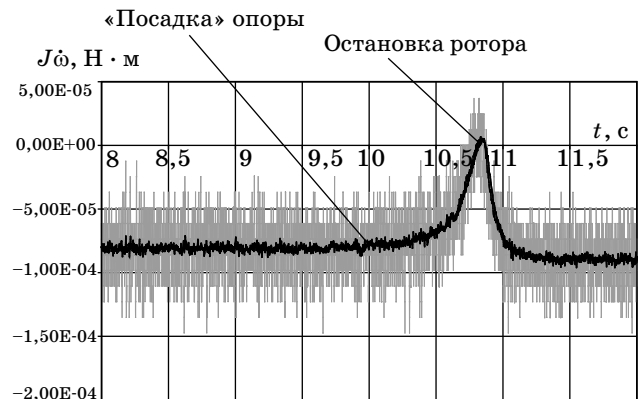
Поскольку вращение начинается при нулевых начальных условиях ( $\alpha_0 = 0$  и  $\dot{\alpha} = 0$ ), а угловое положение вектора может быть только кратным шагу, то время очередного шага  $t_N$  можно определить из выражения

$$t_N = \sqrt{\frac{2N\alpha_{\min}}{K}},$$

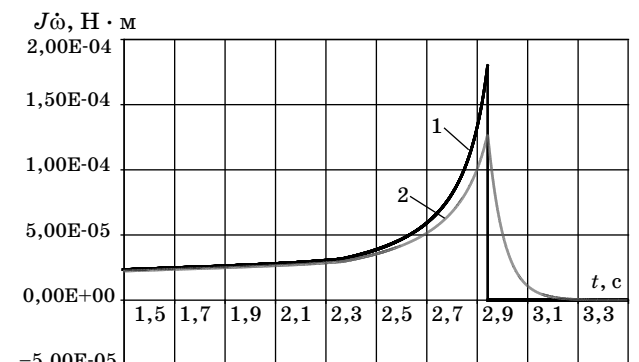
где  $N$  — порядковый номер очередного шага;  $\alpha_{\min}$  — минимальный угол поворота, рад.

Результаты компьютерного моделирования движения ротора и соответствующие им экспериментальные данные представлены на рис. 2–5. Динамический момент ротора  $M_{\text{дин}} = J\dot{\omega}$  измерялся с помощью измерителя динамического момента.

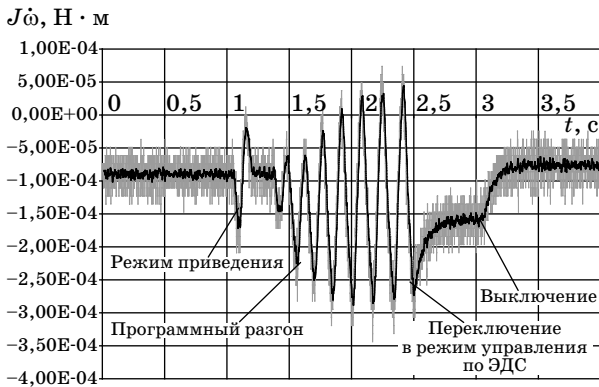
Результаты моделирования показали, что принятая модель в целом правильно отражает характер протекающих процессов.



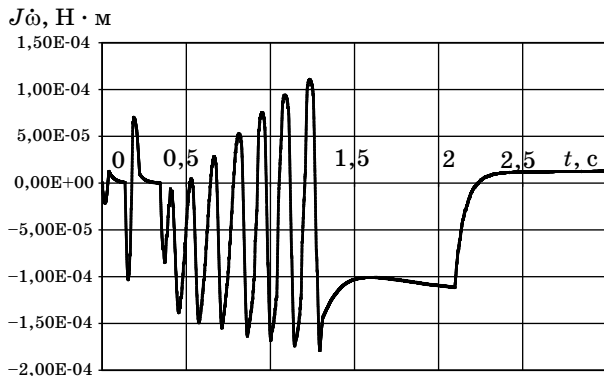
■ Рис. 2. Экспериментальная зависимость  $M_c(\omega)$



■ Рис. 3. Зависимость  $M_c(\omega)$ , полученная при моделировании остановки ротора: 1 — изменение динамического момента  $M_{\text{дин}}$ ; 2 — имитация показаний измерителя  $M_{\text{дин}}$  с учетом его постоянной времени

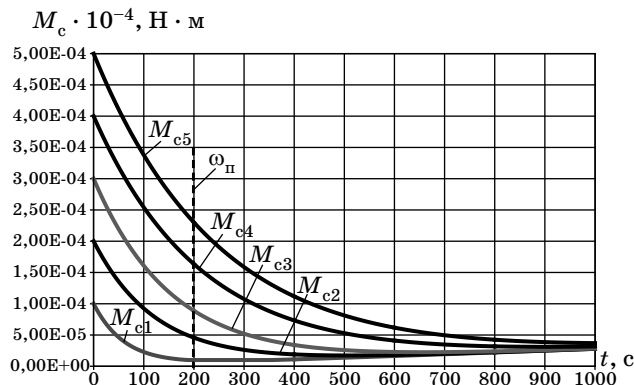


■ Рис. 4. Запись динамического момента



■ Рис. 5. Результат моделирования движения ротора

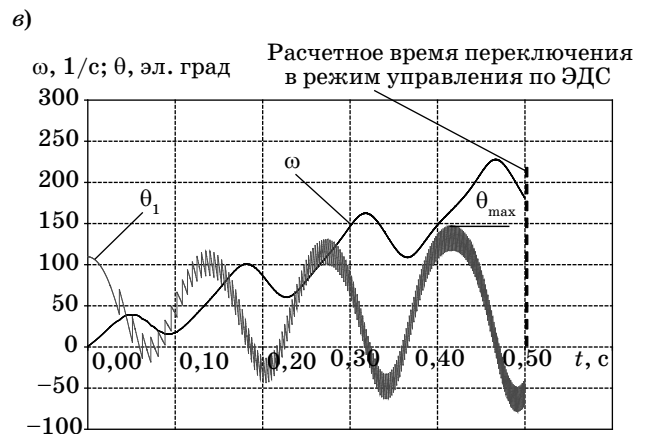
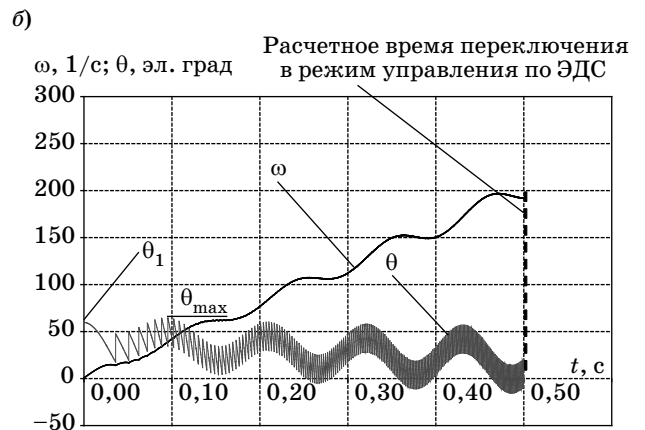
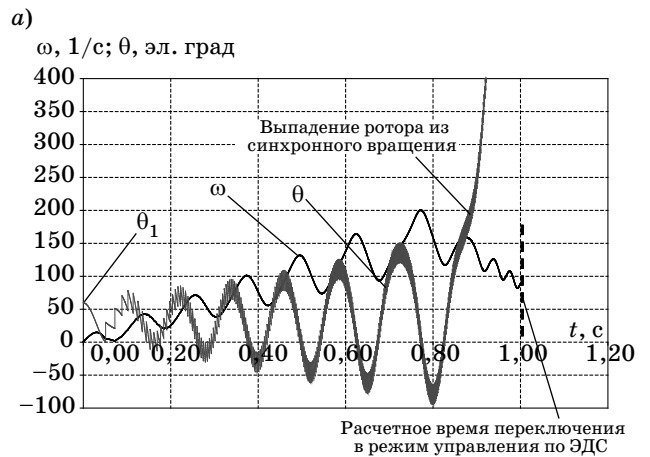
Из анализа работы системы и результатов моделирования можно утверждать, что динамика движения ротора по программе зависит от следующих параметров: максимального момента двигателя  $M_{max}$ , момента сопротивления  $M_c(\omega)$ , величины углового шага программы  $\alpha_{min}$ , начального угла рассогласования полей  $\theta_1$ , скорости нарастания частоты поля статора  $K$ . Как отмечалось



■ Рис. 6. Предполагаемые зависимости  $M_c(\omega)$ : кривая  $M_{c1}$  соответствует исходному, а  $M_{c5}$  — предельному (худшему) состоянию ГДО;  $\omega_n$  — скорость переключения в режим управления по ЭДС

выше, момент сопротивления в ГДО нестабильный, поэтому перед началом исследований необходимо определить предполагаемые изменения зависимости момента сопротивления от скорости (рис. 6).

На рис. 7, а—в приведены результаты компьютерного моделирования движения ротора при различных значениях  $K$  и угла  $\theta_1$ .



■ Рис. 7. Зависимости  $\theta = f(t)$  и  $\omega = f(t)$ : а —  $K = 200$  1/с<sup>2</sup>,  $\theta_1 = 60$  эл. град; б —  $K = 400$  1/с<sup>2</sup>,  $\theta_1 = 60$  эл. град; в —  $K = 400$  1/с<sup>2</sup>,  $\theta_1 = 110$  эл. град

Для количественной оценки динамики движения ротора по программе можно принять величину максимального угла рассогласования  $\theta_{\max}$  [5, 6]. Если угол рассогласования не выходит за пределы устойчивой работы двигателя ( $|\theta| < 180$  эл. град), то ротор прошел программу разгона синхронно с полем статора и достиг нужной скорости. По величине  $\theta_{\max}$  можно судить об оптимальности подобранных параметров программы разгона. Чем меньше абсолютное значение  $\theta_{\max}$ , тем, при прочих равных условиях, программа разгона более эффективна. Таким образом, критерий оптимальности программы разгона можно записать в виде

$$\theta_{\max}(M_{\max}, M_c(\omega), \theta_1, \alpha_{\min}, K) \rightarrow \min.$$

Для исследования влияния отдельных параметров на работу системы удобно результаты представить в виде зависимостей  $\theta_{\max} = f(\theta_1)$ . Зависи-

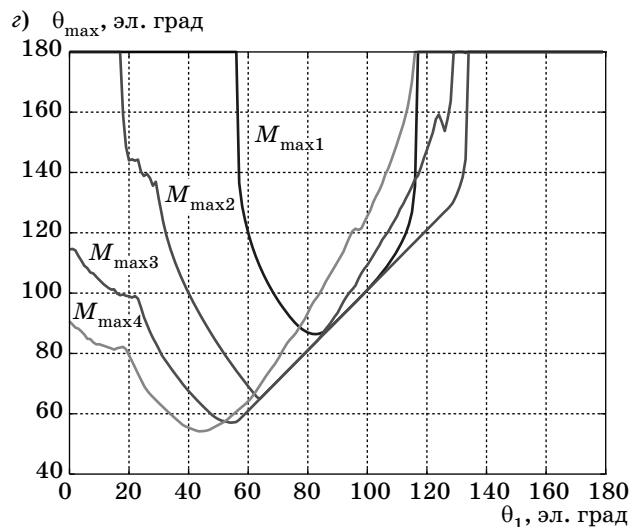
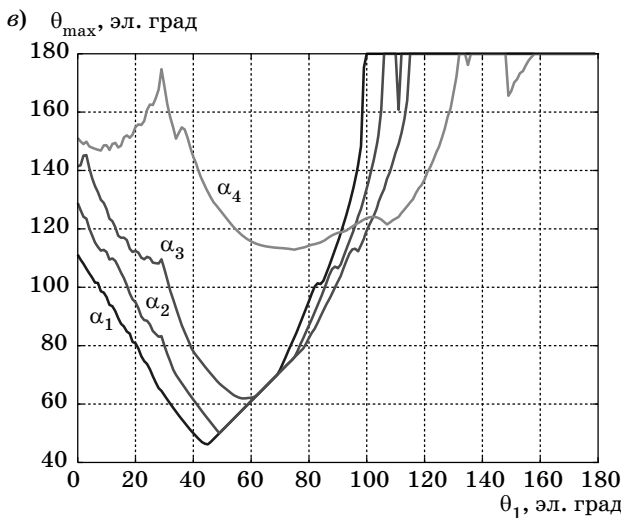
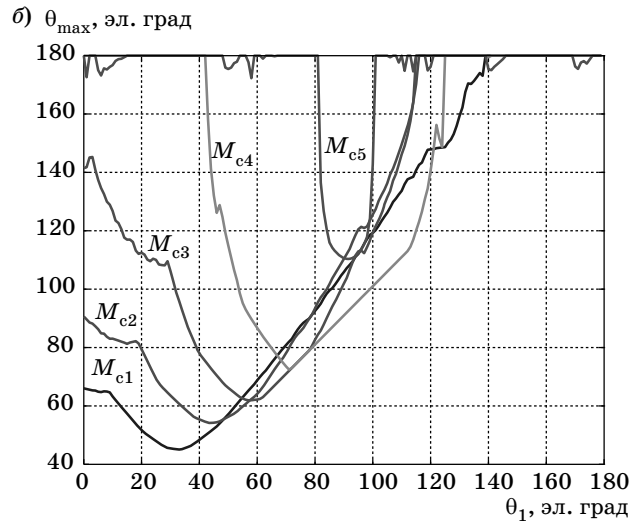
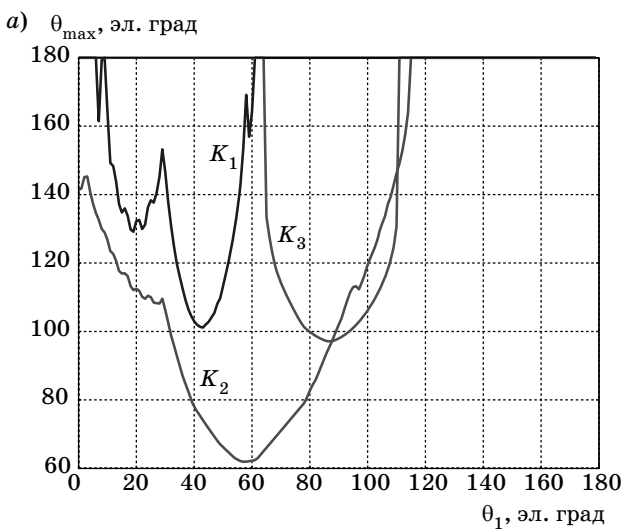
мости, полученные в процессе моделирования, показаны на рис. 8.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Зависимости  $\theta_{\max} = f(\theta_1)$  имеют параболический вид, существуют значения угла  $\theta_1 = \theta_{1\text{опт}}$ , при которых размах колебаний в процессе разгона минимальный. Чем меньше величина максимального угла рассогласования, соответствующего  $\theta_{1\text{опт}}$ ,  $\theta_{\max \min}$ , и меньше крутизна ветвей (минимум более пологий), тем при прочих равных условиях разгон более надежен.

2. Существует оптимальное значение скорости нарастания частоты  $K$ , при котором размах колебаний меньше и разгон обеспечивается в более широком диапазоне изменения  $\theta_1$  (см. рис. 8, а).

3. С увеличением момента сопротивления в ГДО величина  $\theta_{\max \min}$  растет, а пологость минимума



■ Рис. 8. Зависимости  $\theta_{\max} = f(\theta_1)$  при различных значениях: а — скорости нарастания частоты ( $K_1 < K_2 < K_3$ ); б —  $M_c(\omega)$ ; в — шага программы ( $\alpha_1 = 3$  эл. град,  $\alpha_2 = 15$  эл. град,  $\alpha_3 = 30$  эл. град,  $\alpha_4 = 60$  эл. град); г — момента двигателя ( $M_{\max1} < M_{\max2} < M_{\max3} < M_{\max4}$ )

уменьшается, поэтому целесообразно поиск оптимума крутизны проводить для максимальных значений момента сопротивления (худшего состояния опоры) (см. рис. 8, б).

4. С увеличением момента двигателя величина  $\theta_{\max \min}$  снижается, а пологость минимума увеличивается, поэтому целесообразно в приводе использовать максимальное допустимое значение момента двигателя (см. рис. 8, з).

5. Величину углового шага программы целесообразно принимать наименьшей. При этом следует учитывать сложность реализации выбранной величины шага. Например, для трехфазных систем просто реализуется шаг, равный 30 эл. град, одновременно эта величина вполне достаточна для работы (см. рис. 8, в).

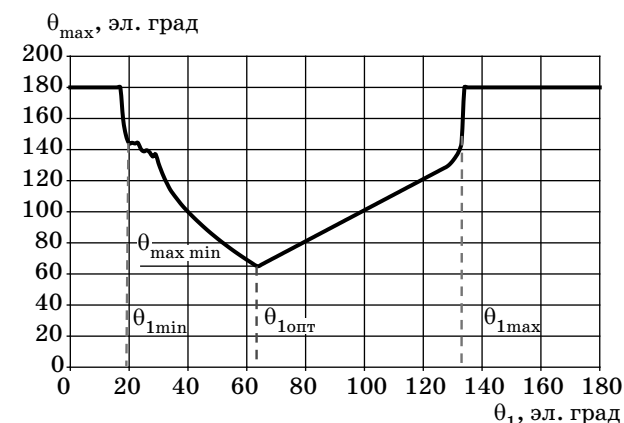
Таким образом, число изменяемых параметров уменьшается — остаются только скорость нарастания частоты  $K$  и начальный угол рассогласования. Величину углового шага программы, момент двигателя и зависимость момента сопротивления от скорости можно принять неизменными исходными параметрами. Критерий оптимальности упрощается:  $\theta_{\max}(\theta_1, K) \rightarrow \min$ .

В результате оптимизации получена зависимость  $\theta_{\max} = f(\theta_1)$  для оптимального значения  $K_{\text{опт}}$  и значения минимума максимального угла рассогласования  $\theta_{\max \min}$  и соответствующий ему начальный угол  $\theta_{1\text{опт}}$  (рис. 9).

Если рассмотреть фигуру  $S_0$ , ограниченную осями координат и зависимостью  $\theta_{\max} = f(\theta_1)$ , то минимум площади этой фигуры соответствует оптимально выбранным параметрам программы разгона. В этом случае критерий оптимальности принимает вид  $S_0(K) \rightarrow 0$ .

Использование критерия  $S_0$  предпочтительно, так как зависимость  $\theta_{\max} = f(\theta_1)$  может иметь несколько минимумов из-за дискретного вращения поля статора (см. рис. 8, а).

Если ротор начинает движение из нулевого положения, то целесообразно первый шаг программы принять равным  $\theta_{1\text{опт}}$ . Таким образом, процесс разгона делится на два этапа: приведение ротора



■ Рис. 9. Оптимальная зависимость  $\theta_{\max} = f(\theta_1)$

в некоторое нулевое положение — режим приведения, и частотный разгон. Используя характеристику  $\theta_{\max} = f(\theta_1)$ , можно определить требования к ошибке приведения ротора в нулевое положение. Величины допустимых ошибок можно определить из выражений

$$\varphi_{\max}^- = \alpha_1 - \theta_{1\max}; \quad \varphi_{\max}^+ = \alpha_1 - \theta_{1\min},$$

где  $\varphi_{\max}^-$ ,  $\varphi_{\max}^+$  — допустимые значения ошибки;  $\theta_{1\min}$ ,  $\theta_{1\max}$  — предельные значения углов  $\theta_1$ , при которых обеспечивается разгон. Значения выбраны из условия  $\theta_{\max} < 150$  эл. град, при этом момент двигателя снижается менее чем в 2 раза.

Простейший способ реализации режима приведения — это подача постоянного тока в течение некоторого времени (импульса тока) в фазы статора так, чтобы вектор сформированного магнитного поля был направлен в нулевое положение. Максимальное возможное значение ошибки  $\varphi_{1\max}$  [эл. град] можно определить из условия равновесия ротора, воспользовавшись выражениями

$$\varphi_{1\max} = \pm \arcsin \frac{M_{c0}}{M_{\max}} \frac{180}{\pi};$$

$$\varphi_{1\max} = 180 \pm \arcsin \frac{M_{c0}}{M_{\max}} \frac{180}{\pi}.$$

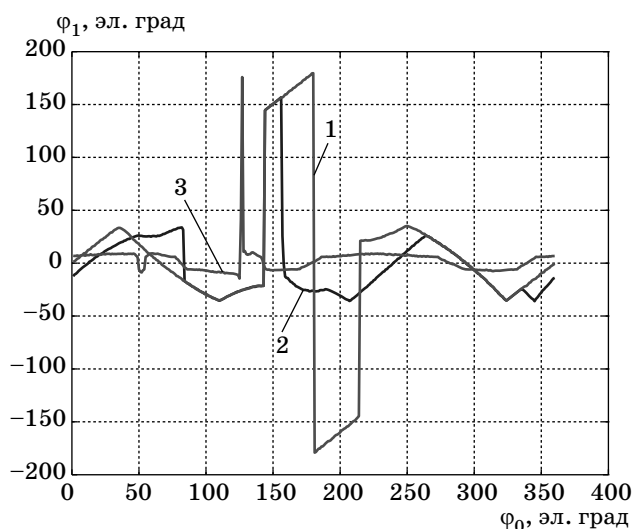
Первое выражение соответствует положению устойчивого равновесия ротора, второе — положению неустойчивого равновесия. Для вывода ротора из неустойчивого положения равновесия необходимо подать несколько импульсов тока. Магнитные поля, вызванные импульсами, должны быть развернуты друг относительно друга на некоторый угол. При подаче двух импульсов приведения выгодно развернуть действие полей на 90 эл. град.

Угловую ошибку можно снизить, если магнитное поле статора в течение действия импульса приведения будет колебаться около нулевого положения с некоторой частотой и амплитудой. Амплитуда колебаний может быть выполнена любой, но для трехфазной системы проще реализуются амплитуды, кратные 30 эл. град. Максимальное возможное значение угловой ошибки можно определить из соотношения

$$\varphi_{1\max} = \pm \arcsin \frac{M_{c0}}{M_{\max}} \frac{180}{\pi} \mp A,$$

где  $A$  — амплитуда угловых колебаний поля статора.

Результаты моделирования показали, что частота колебаний должна быть приблизительно в 10 раз выше собственной частоты ротора. Эффективность применения качающегося магнитного поля в режиме приведения выше при больших моментах сухого трения в ГДО. На рис. 10 показаны результаты моделирования движения ротора в ре-



**Рис. 10.** Зависимости угловой ошибки приведения ротора в нулевое положение от начального положения ротора  $\varphi_1 = f(\varphi_0)$  для различных способов реализации режима: 1 — одиночным импульсом; 2 — двумя импульсами; 3 — колеблющимся полем

жиме приведения для различных вариантов реализации режима. Из рисунка видно, что применение колеблющегося поля снижает ошибку приведения ротора в нулевое положение в 4–5 раз.

На основании приведенных исследований можно сделать выводы.

1. Предложенная модель движения ротора в целом правильно отражает характер протекающих процессов и позволяет проводить исследования работы электроприводов в особых режимах.

2. Динамика равноускоренного движения ротора существенно зависит от скорости нарастания частоты вращения поля и начального углового шага программы. Для определенной реализации привода (момента двигателя, зависимости момен-

та сопротивления от скорости и т. д.) существует оптимальное значение крутизны программы и начального шага. В случае с ГДО с большим моментом сопротивления система становится более зависимой к изменениям (отклонениям) параметров.

3. При оптимальных параметрах частотной программы разгона надежность разгона определяется точностью реализации режима приведения ротора в нулевое положение. Минимальная угловая ошибка приведения ротора в нулевое положение получается при подаче в обмотки статора двух (или более) импульсов тока, обеспечивающих создание магнитных полей, развернутых на 90 эл. град. Последний импульс должен быть сформирован так, чтобы его магнитное поле совершало колебания около нулевого положения с частотой, много большей собственной частоты ротора.

## Литература

- Гироскопические системы.** Элементы гироскопических приборов / Под ред. Д. С. Пельпора. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.
- Сипенков И. Е. и др.** Прецизионные газовые подшипники / Под ред. А. Ю. Филиппова и И. Е. Сипенкова; ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». СПб., 2007. 503 с.
- Тарасов В. Н., Нагайцев В. И., Останин С. Ю., Павлихина Е. В.** Сравнительная оценка прецизионных гироскопических электроприводов на базе синхронных электродвигателей // Гироскопия и навигация. 1996. № 1 (12). С. 41–47.
- Воронин С. Г.** Управление коммутацией вентильного двигателя по сигналам ЭДС вращения // Электричество. 2000. № 9. С. 53–59.
- Коршунов А.** Частотный пуск синхронного электродвигателя с постоянными магнитами на роторе // Силовая электроника. 2007. № 1. С. 51–57.
- Кан С. Г., Кан Э. М.** Время разгона и торможения гидродвигателей на газодинамических опорах: Сб. трудов МЭИ. М., 1985. № 80. С. 93–98.