

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИВОДА РАДИОМЕТРА

В.Я. Авербух, Д.М. Вейнберг, В.В. Федоров  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Рассматриваются вопросы моделирования динамики прецизионного привода сканера радиометра. Приводятся математические модели основных звеньев системы стабилизации скорости привода. Моделирование ведется в пакете Simulink. На основании результатов моделирования были проведены доработки модернизированного варианта привода.

**Ключевые слова:** моделирование, динамика, привод.

Привод радиометра предназначен для вращения антенны радиометра с постоянной скоростью.

Целями моделирования динамики привода являются:

- создание математических моделей, пригодных для анализа и совершенствования динамики привода и его устройств;
- определение динамической точности и времени переходных процессов для привода, разработанного в НПП ВНИИЭМ;
- разработка предложений по повышению динамической точности и уменьшению времени переходных процессов для модернизации разработанного привода.

### Описание устройств и моделей привода

Привод радиометра является системой автоматического регулирования скорости вращения. В этой системе объектом регулирования является ротор радиометра, а исполнительным органом служит двигатель постоянного тока. В качестве датчика обратной связи используется дискретный датчик угловых перемещений ротора.

Моделирование осуществлено в пакете Simulink системы MATLAB<sup>1</sup>.

Блок-схема модели привода радиометра приведена на рис. 1.

В состав привода входят следующие устройства:

- эталон движения (Reference);
- датчик перемещения (Sensor);
- детектор ошибки (Detector);

- регулятор привода (Regulator);
- усилитель мощности (Amplifier);
- двигатель привода (Motor);
- ротор радиометра (Rotor).

Эталон движения формирует временную программу требуемого перемещения ротора и выдает на вход детектора ошибки сигнал требуемого перемещения  $u_r$  в виде последовательности импульсов.

Датчик перемещения измеряет текущее перемещение ротора и выдает на вход детектора ошибки сигнал измеренного перемещения  $u_s$  в виде последовательности импульсов.

Детектор ошибки определяет рассогласование между сигналами требуемого и измеренного перемещения и выдает на вход регулятора сигнал ошибки  $u_d$  в виде напряжения постоянного тока.

Регулятор осуществляет частотную коррекцию сигнала ошибки  $u_d$  и выдает на вход усилителя мощности сигнал управления  $u_c$  в виде напряжения постоянного тока.

Усилитель мощности преобразует сигнал регулятора  $u_c$  в силовое напряжение  $u_a$ , поступающее на двигатель.

Двигатель привода преобразует напряжение усилителя мощности  $u_a$  в электромагнитный момент  $w$ , действующий на ротор радиометра.

Ротор радиометра преобразует электромагнитный момент двигателя  $w$  и момент сопротивления движению  $d$  в угловую скорость  $v$  и угловое перемещение  $u$  ротора радиометра.

Управляющим воздействием в системе регули-

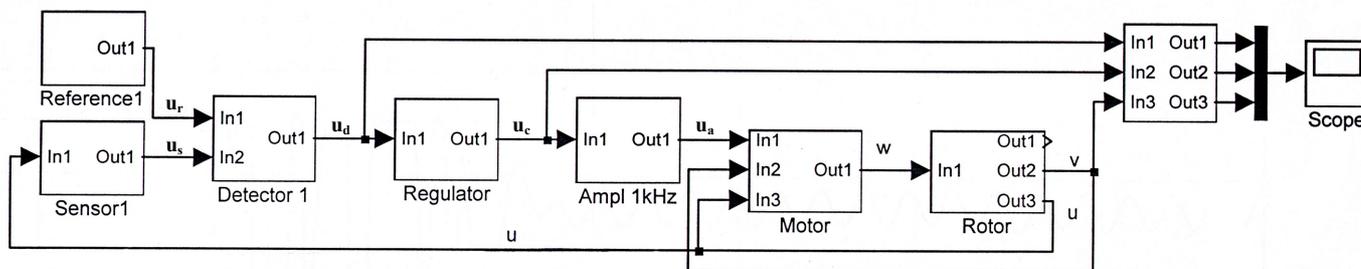


Рис. 1. Блок-схема модели привода радиометра

<sup>1</sup> Дьяконов В. Simulink: специальный справочник. СПб: Питер, 2002.

рования привода является электромагнитный момент двигателя.

Возмущающими воздействиями в области низких частот являются момент сопротивления вращению ротора и кинематическая погрешность датчика перемещения ротора.

Возмущающими воздействиями в области высоких частот являются дискретность датчика перемещения ротора и модуляция управляющего электромагнитного момента, связанная с импульсным питанием и конструктивными особенностями примененного в приводе электродвигателя.

**Модель эталона движения.** Эталон движения привода задаёт программу работы привода.

Программа работы  $h(t)$  задается в виде ступенчатой функции времени:

– при вращении привода –  $h(t) = c$ ;

– при остановке привода –  $h(t) = 0$ ,

где  $c$  – значение стационарной скорости вращения привода.

Эталонная скорость  $v_r$  и эталонное перемещение  $u_r$  определяются уравнениями:

$$v_r = h(t);$$

$$su_r = v_r,$$

где  $h(t)$  – ступенчатая функция времени (со значениями  $c$  и  $0$ );  $v_r$ ,  $u_r$  – эталонные скорость и перемещение;  $s$  – оператор дифференцирования.

Для формирования последовательности импульсов эталонный угол поворота  $u_k$  квантуется с дискретностью  $q$  и дифференцируется. Сигнал эталона в виде последовательности импульсов с угловым интервалом  $q = 2\pi/N$  поступает на эталонный вход детектора ошибки.

На блок-схеме привода модель эталона перемещений представлена блоком Reference.

**Модель датчика перемещений.** Датчик перемещений за один оборот ротора выдает  $N$  коротких импульсов по числу отверстий, расположенных на измерительном диске. Каждому импульсу датчика соответствует перемещение ротора на один квант  $q = 2\pi/N$ .

Модель датчика преобразует угол поворота ротора  $u$  в сигнал поворота датчика  $u_s$  с учетом гармонической ошибки в разметке измерительного диска:

$$u_s = u + e \sin u,$$

где  $u_s$  – угол поворота датчика перемещений;  $u$  – угол поворота ротора;  $e$  – амплитуда кинематической погрешности.

Для формирования последовательности импульсов угол поворота датчика  $u_s$  квантуется с дискретностью  $q$  и дифференцируется. Сигнал датчика в виде последовательности импульсов с угловым ин-

тервалом  $q = 2\pi/N$  поступает на измерительный вход детектора ошибки.

На блок-схеме привода модель датчика перемещений представлена блоком Sensor.

**Модель детектора ошибки.** Детектор ошибки привода формирует сигнал ошибки  $u_d$  как разность между эталонным  $u_r$  и измеренным  $u_s$  перемещениями ротора:

$$u_d = u_r - u_s.$$

На входы детектора ошибки поступают импульсные сигналы от эталона перемещений  $u_r$  и от датчика перемещений  $u_s$ . Выходной сигнал детектора сглаживается фильтром нижних частот.

В качестве детектора ошибки в существующем приводе используется фазовый дискриминатор импульсных сигналов.

Статическая характеристика сигнала фазового дискриминатора это трапециидальная периодическая функция угла рассогласования между эталонным и измеренным перемещениями.

Зона линейности фазового дискриминатора, а следовательно, и зона линейности детектора ошибки привода ограничена угловым интервалом между импульсами сопоставляемых сигналов:

$$0 \leq u_d \leq z_1; \quad z_1 = q = 2\pi/N,$$

где  $u_d$  – сглаженный сигнал фазового дискриминатора;  $z_1$  – зона линейности фазового дискриминатора;  $q$  – дискретность датчика перемещений;  $N$  – число меток на измерительном диске датчика перемещений.

Модель детектора ошибки состоит из модели фазового дискриминатора и сглаживающего фильтра. Модель фазового дискриминатора представляет собой логическую схему с импульсным выходным сигналом, сглаженное значение которого изменяется от 0 до 1. Поэтому коэффициент передачи сглаживающего фильтра в модели детектора принимается равным зоне линейности фазового дискриминатора, т. е. дискретности датчика перемещения ротора. Для сглаживания используется фильтр первого порядка, который характеризуется одной постоянной времени интегрирования.

На блок-схеме привода модель детектора ошибки привода представлена блоком Detector.

**Модель регулятора.** Регулятор преобразует сигнал детектора ошибки  $u_d$  в сигнал регулятора  $u_c$ , управляющий усилителем мощности:

$$u_c = C(s)u_d,$$

где  $u_c$  – сигнал регулятора, управляющий усилителем мощности;  $u_d$  – сигнал детектора ошибки;  $C(s)$  – передаточная функция регулятора.

В приводе радиометра используется регулятор с передаточной функцией:

$$C(s) = (T_d s + 1)/(T_i s + 1),$$

где  $T_d$  – постоянная времени дифференцирования;  $T_i$  – постоянная времени интегрирования.

На блок-схеме привода модель регулятора представлена блоком Regulator.

**Модель усилителя мощности.** В приводе радиометра используется усилитель постоянного тока с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения.

Усилитель мощности преобразует входной сигнал управления  $u_c$  в силовое напряжение  $U$ , поступающее на двигатель.

Выходная характеристика усилителя – зависимость относительной величины линейная с ограничением:

$$u_a = U/U_0 = u_c/z_0; \quad 0 < U/U_0 < 1,$$

где  $u_a$  – относительное выходное напряжение усилителя;  $U$  – абсолютное выходное напряжение усилителя;  $U_0$  – максимальное выходное напряжение усилителя;  $u_c$  – сигнал управления, поступающий из регулятора;  $z_0$  – зона линейности усилителя.

Линейность и ограничения выходной характеристики  $U(u_c)$  в усилителе мощности обеспечивает ШИМ.

Основными параметрами усилителя мощности являются:

- максимальное силовое напряжение  $U_0$ ;
- зона линейности усилителя  $z_0$ .

Зона линейности усилителя мощности должна быть не больше зоны линейности детектора ошибки привода:

$$z_0 \leq z_1,$$

где  $z_0$  – зона линейности усилителя мощности;  $z_1$  – зона линейности детектора ошибки.

В противном случае (при  $z_0 > z_1$ ) напряжение усилителя и момент двигателя будут недоиспользованы в системе управления.

Дополнительным параметром усилителя является частота модуляции  $f_{pwm}$ .

На блок-схеме привода модель усилителя мощности представлена блоком Amplifier.

**Модель двигателя.** В приводе радиометра используется трехфазный двигатель постоянного тока с шестью парами полюсов на роторе (ТД). Статорные обмотки ТД питаются от усилителя мощности. ТД преобразует напряжение усилителя мощности  $U$  в электромагнитный момент  $M$ , действующий на ротор.

Электромагнитная энергия ТД в первом приближении является функцией токов статорных обмоток  $I_1, I_2, I_3$  и угла поворота ротора  $u$ :

$$2W = L(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2) +$$

$$+ \Psi(I_1 \cos pu + I_2 \cos(pu - 2\pi/3) + I_3 \cos(pu + 2\pi/3)),$$

где  $L$  – индуктивность обмоток статора;  $\Psi$  – максимальное сцепление фазной обмотки статора с магнитным потоком ротора;  $u$  – угол поворота ротора относительно статора;  $p$  – число пар полюсов ротора.

Уравнения динамики ТД (в форме Лагранжа) имеют вид:

$$(Ls + R)I_1 + vp(\Psi/2)\sin pu = U_1;$$

$$(Ls + R)I_2 + vp(\Psi/2)\sin(pu - 2\pi/3) = U_2;$$

$$(Ls + R)I_3 + vp(\Psi/2)\sin(pu + 2\pi/3) = U_3;$$

$$M = -p(\Psi/2)(I_1 \sin pu + I_2 \sin(pu - 2\pi/3) + I_3 \sin(pu + 2\pi/3)),$$

где  $s$  – оператор дифференцирования;  $v$  – скорость поворота ротора ( $v = su$ );  $U_1, U_2, U_3$  – напряжения, подаваемые на фазные обмотки;  $R$  – сопротивление фазной обмотки.

Выходное напряжение усилителя мощности  $U$  подается на фазные обмотки поочередно:

– если  $\text{mod } \sin pu > 0,866$ ,

то  $U_1 = U \text{ sign } \sin pu, U_2 = U_3 = 0$ ;

– если  $\text{mod } \sin(pu - 2\pi/3) > 0,866$ ,

то  $U_2 = U \text{ sign } \sin(pu - 2\pi/3), U_3 = U_1 = 0$ ;

– если  $\text{mod } \sin(pu + 2\pi/3) > 0,866$ ,

то  $U_3 = U \text{ sign } \sin(pu + 2\pi/3), U_1 = U_2 = 0$ .

С учетом поочередной работы фазных обмоток уравнения динамики ТД можно упростить:

$$(Ls + R)I = U - vp(\Psi/2)k_3;$$

$$M = p(\Psi/2)Ik_3;$$

$$k_3 = \max(\text{mod } \sin pu, \text{mod } \sin(pu - 2\pi/3), \text{mod } \sin(pu + 2\pi/3)),$$

где  $I$  – потребляемый двигателем ток;  $k_3$  – коэффициент позиционной модуляции.

Основными параметрами ТД являются:

- пусковой момент  $M_0 = (p\Psi/2)U_0/R$ ;
- скорость холостого хода  $v_0 = 2U_0/p\Psi$ .

Пусковой ток связан с этими параметрами соотношением:  $I_0 = M_0 v_0 / U_0$ . Дополнительным параметром ТД является электромагнитная постоянная времени обмоток  $T = L/R$ .

Уравнения динамики ТД в относительных переменных не зависят от магнитного потока ротора:

$$(Ts + 1)(I/I_0) = (U/U_0) - k_3(v/v_0); \quad T = L/R;$$

$$M/M_0 = k_3(I/I_0);$$

$$k_3 = \max(\text{mod } \sin pu, \text{mod } \sin(pu - 2\pi/3), \text{mod } \sin(pu + 2\pi/3)),$$

где  $T$  – постоянная времени обмотки;  $k_3$  – коэффициент позиционной модуляции.

На блок-схеме привода модель ТД представлена блоком Motor.

**Модель ротора.** Ротор радиометра состоит из жестко соединенных роторов двигателя, датчика положения, токосъемника и приемной антенны.

При составлении уравнений вращения составного ротора упругие крутильные колебания его элементов и переносное движение основания не учитываются ввиду их малости. Это упрощающее допущение позволяет считать угловое перемещение и скорости всех элементов ротора одинаковыми.

Уравнения вращения ротора в этом случае имеют наиболее простой вид:

$$\begin{aligned} su &= v; \\ Jsv &= M - D; \\ D &= D_0 \operatorname{sign} v + D_1 \sin u, \end{aligned}$$

где  $u, v$  – угол и скорость вращения ротора;  $J$  – момент инерции ротора;  $M$  – управляющий электромагнитный момент двигателя;  $D$  – момент сопротивления;  $D_0$  – постоянный момент сопротивления;  $D_1$  – амплитуда переменного момента сопротивления ( $D_1 < D_0$ );  $s$  – оператор дифференцирования.

В уравнениях модели ротора удобно перейти к относительным значениям действующих на ротор моментов:

$$\begin{aligned} su &= v; \\ sv &= a(w - d); \\ d &= d_0 \operatorname{sign} v + d_1 \sin u; \\ a &= M_0/J; \quad w = M/M_0; \quad d_0 = D_0/M_0; \quad d_1 = D_1/M_0, \end{aligned}$$

где  $u, v$  – угол и скорость вращения ротора;  $a$  – пусковое ускорение ротора;  $w$  – относительный момент двигателя;  $d$  – относительный момент сопротивления;  $d_0$  – постоянная составляющая относительного момента сопротивления;  $d_1$  – амплитуда переменной составляющей относительного момента сопротивления.

Основным параметром модели ротора является пусковое ускорение  $a$ .

Дополнительными варьируемыми параметрами являются постоянный относительный момент сопротивления  $d_0$  и амплитуда переменного относительного момента сопротивления  $d_1$ .

На блок-схеме привода модель ротора представлена блоком Rotor.

### Определение динамических характеристик привода

Рассматривая колебания привода в установившемся режиме вращения, будем исходить из того,

что амплитуды колебаний малы и остаются в пределах зон линейности всех устройств.

Это допущение позволяет при предварительном анализе динамики привода использовать линейные модели изменения переменных:

$$\begin{aligned} su_r &= c; \quad d = d_0 + d_1 \sin ct; \quad u_s = u + e \sin ct; \\ v &= c - v'; \quad u = u_r - u'; \\ u_d &= u_r - u_s = u' - e \sin ct; \\ u_c &= C(s) u_d = C(s) u' - C(s) e \sin ct; \\ u_a &= u_c/z_0 = C(s)(u'/z_0) - C(s)(e/z_0) \sin ct; \\ w &= u_a - v/v_0 = C(s)(u'/z_0) - C(s)(e/z_0) \sin ct - c/v_0 + v'/v_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $c, u_r$  – стационарная частота вращения и эталонное перемещение ротора;  $v, u$  – скорость и перемещение ротора;  $v', u'$  – колебания скорости и перемещение ротора относительно эталонных значений;  $C(s)$  – передаточная функция канала управления;  $w$  – относительный момент двигателя;  $d$  – относительный момент сопротивления;  $d_0$  – постоянная составляющая относительного момента сопротивления;  $d_1$  – амплитуда переменной составляющей относительного момента сопротивления;  $e$  – амплитуда кинематической погрешности датчика;  $z_0$  – зона линейности усилителя мощности;  $v_0$  – скорость холостого хода двигателя.

Движение ротора описывается системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} su &= v; \\ sv &= a(w - d), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u, v$  – угол и скорость вращения ротора;  $a$  – пусковое ускорение ротора;  $w$  – относительный момент двигателя;  $d$  – относительный момент сопротивления.

Подставляя (1) в (2), получим линеаризованные уравнения колебаний ротора относительно стационарного движения:

$$\begin{aligned} su' &= v'; \\ (s^2 + \mu^2(C(s) + (z_0/v_0)s)) u' &= \\ = \mu^2(C(s) e \sin ct + z_0 c/v_0 + z_0 d_0 + z_0 d_1 \sin ct); \\ \mu^2 &= a/z_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $v', u'$  – колебания скорости и перемещение ротора относительно эталонных стационарных значений;  $C(s)$  – передаточная функция канала управления;  $c$  – стационарная частота вращения привода;  $\mu$  – собственная частота привода;  $a$  – пусковое ускорение ротора;  $z_0$  – зона линейности усилителя мощности;  $v_0$  – скорость холостого хода двигателя;  $d_0$  – постоянная составляющая относительного момента сопротивления;  $d_1$  – амплитуда переменной составляющей относительного момента сопротивления;  $e$  – амплитуда кинематической погрешности датчика.

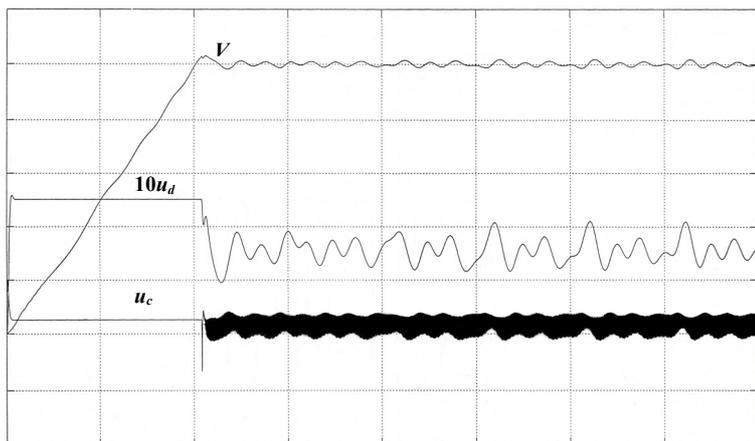


Рис. 2. Разгон привода:  $V$  – скорость привода;  $10u_d$  – сигнал детектора;  $u_c$  – сигнал регулятора

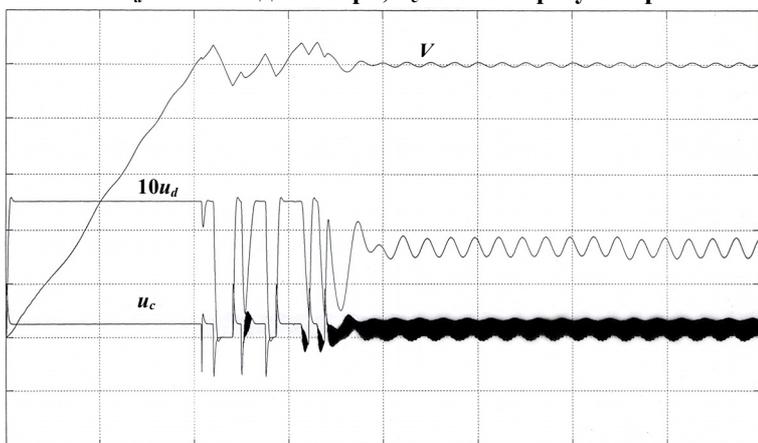


Рис. 3. Разгон привода. Частота модуляции 1 кГц

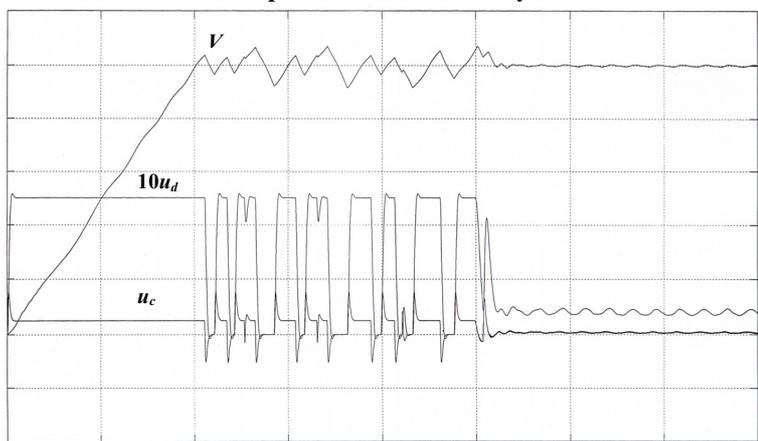


Рис. 4. Зона линейности ШИМ уменьшена в 4 раза

Передаточная функция канала управления  $C(s)$  определяется произведением передаточных функций фильтра детектора и ПД-регулятора:

$$C(s) = (T_d s + 1) / (T_i s + 1)^2,$$

где  $T_d, T_i$  – постоянные времени дифференцирования и интегрирования.

Коэффициент передачи канала управления на стационарной частоте вращения привода:

$$C(jc) = (1 + jcT_d) / (1 + jcT_i)^2,$$

где  $c$  – стационарная частота вращения.

Статическая ошибка по положению в соответствии с уравнением (3) является линейной функцией зоны линейности:

$$u'_s = z_0 c / v_0 + z_0 d_0.$$

Динамическая ошибка по положению (на стационарной частоте):

– от переменного момента сопротивления

$$u'_{dd} = z_0 d_1 / (C(jc) - c^2 / \mu^2);$$

– от ошибки датчика

$$u'_{de} = C(jc) e / (C(jc) - c^2 / \mu^2).$$

В этих выражениях учтено, что  $cz_0 / v_0 \ll \ll ImC(jc)$ .

### Результаты моделирования

В качестве контрольного режима, позволяющего определить временные и точностные характеристики привода, принимается режим разгона до требуемой скорости 2,5 рад/с.

В качестве контролируемых переменных принимаются:

- сигнал детектора ошибки привода  $u_d$ ;
- сигнал регулятора  $u_c$ ;
- скорость вращения привода  $v$ .

В качестве типовых возмущений принимаются:

- постоянный момент сопротивления с амплитудой 50% от пускового момента двигателя;
- переменный момент сопротивления с амплитудой 10% от пускового момента двигателя, действующий на частоте вращения привода;
- переменная ошибка датчика с амплитудой в 0,0006 рад, изменяющаяся на частоте вращения привода.

В качестве исходных параметров принимаются параметры разработанного во ВНИИЭМ привода:

- пусковое ускорение привода  $a = 0,33$  рад/с<sup>2</sup>;
- зона линейности усилителя мощности  $z_0 = 0,1256$  рад;
- зона линейности детектора ошибки  $z_1 = 0,1256$  рад;
- коэффициент усиления регулятора  $k = 1$ ;
- постоянная времени дифференцирования  $T_d = 0,7$  с;
- постоянная времени интегрирования  $T_i = 0,07$  с;
- частота модуляции напряжения  $f_{pwm} = 20$  Гц;
- коэффициент влияния скорости  $1/v_0 = 0,02$  с.

Результаты моделирования разгона привода с исходными параметрами приведены на рис. 2.

Привод разгоняется до требуемой скорости 2,5 рад/с за 20 с.

Переходный процесс заканчивается на 25 с.

Точность стабилизации углового положения ниже требуемой в 8 раз.

Размах низкочастотных колебаний сигнала детектора ошибки составляет примерно 0,045 рад. Сигнал детектора ошибки на графике увеличен в 10 раз и колеблется от 0,6 до 1,05. Колебания по положению ротора происходят с биением. В спектре колебаний, кроме частоты вращения 2,5 рад/с, присутствуют другие низкие частоты.

Размах высокочастотных колебаний сигнала регулятора составляет примерно 0,16 рад. Это выводит систему за пределы зоны линейности усилителя мощности и не позволяет повышать динамическую точность привода за счет увеличения жесткости.

Для устранения биений в низкочастотных колебаниях привода целесообразно повысить частоту модуляции напряжения, например до 1000 Гц вместо исходных 20 Гц.

Разгон привода с измененной частотой импульсной модуляции напряжения ( $f_{pvt} = 1$  кГц вместо 20 Гц) показан на рис. 3.

Привод разгоняется до требуемой скорости 2,5 рад/с за 20 с.

Переходный процесс заканчивается на 40 с.

Точность стабилизации углового положения ниже требуемой в 3,2 раза.

Размах низкочастотных колебаний сигнала детектора ошибки составляет примерно 0,016 рад. Колебания по положению ротора происходят без биений. В спектре колебаний присутствует только частота вращения.

Размах высокочастотных колебаний сигнала регулятора остался на прежнем уровне и составил 0,16 рад, что в 1,25 раз больше зоны линейности усилителя мощности.

Для уменьшения высокочастотных колебаний в регулятор целесообразно ввести дополнительный

сглаживающий фильтр, например с той же постоянной времени, что и фильтр нижних частот в детекторе ошибки 0,07 с.

Разгон привода с измененной частотой модуляции напряжения, дополнительным фильтром нижних частот и уменьшенной зоной линейности показан на рис. 4.

Привод разгоняется до требуемой скорости 2,5 рад/с за 20 с.

Переходный процесс заканчивается на 55 с.

Точность стабилизации углового положения совпадает с требуемой.

Размах низкочастотных колебаний сигнала детектора ошибки составляет не более 0,006 рад. Колебания по положению ротора происходят без биений. В спектре колебаний присутствует только частота вращения.

Размах высокочастотных колебаний сигнала регулятора составляет 0,0125 рад в размахе, что в 2,5 раза меньше зоны линейности (0,0314 рад).

Этот вариант привода удовлетворяет основному требованию по точности стабилизации положения ротора (не более 0,006 рад в размахе).

На основании выполненной работы по моделированию динамики привода радиометра можно сделать следующие выводы.

Первый вариант разработанного в НПП ВНИИЭМ привода не удовлетворяет требованию по динамической точности стабилизации положения ротора, при воздействии переменного момента сопротивления величиной 10% от пускового.

Повышение динамической точности до требуемого значения в разработанном приводе может быть достигнуто за счет изменения параметров регулятора и повышения частоты модуляции выходного напряжения усилителя мощности.

По результатам моделирования схема привода была доработана. Частота ШИМ была увеличена до 20 кГц. Экспериментальные проверки модернизированного электропривода подтвердили правильность результатов моделирования.

*Владимир Яковлевич Авербух, канд. техн. наук, зам. главного конструктора, т. 366-32-44.*

*Дмитрий Моисеевич Вейнберг, д-р техн. наук, начальник лаборатории, т. 366-32-44.*

*Владимир Васильевич Федоров, канд. техн. наук, начальник лаборатории, т. 366-20-56.*

*E-mail: vniiem@vniiem.ru.*