

УДК 623.4.01

А. В. Королёв, Р. Ф. Теляков, Д. К. Щеглов

Анализ методик динамической балансировки антенных постов

Рассмотрены две методики динамической балансировки вращающихся антенных постов. В первой методике сила и суммарный момент дисбаланса антенного поста уравниваются балансировочным грузом на одной определенной частоте вращения, во второй, универсальной методике сила и момент дисбаланса уравниваются балансировочными грузами на всем интервале частот вращения антенного поста.

Ключевые слова: динамическая балансировка, антенный пост, дисбаланс.

В числе требований, предъявляемых к антенным постам (АП), важное место занимает обеспечение высокой точности измерения координат объекта слежения и наводимых ракет. В них может вносить погрешность деформация несущих металлоконструкций АП. Возмущающими факторами, определяющими деформацию и вызывающими механические колебания, в частности, являются нагрузки, создаваемые статическим и динамическим дисбалансом вращающейся части АП. Механические колебания вносят случайные динамические погрешности в измерения координат объекта слежения и при отсутствии требований к жесткостным характеристикам металлоконструкции АП и точности балансировки могут давать существенные ошибки в измерениях.

Снижение динамических погрешностей углового положения антенного устройства АП относительно заданного в пространстве положения и достижение необходимой долговечности металлоконструкции и подшипника опорно-поворотного устройства (ОПУ) может быть достигнуто обеспечением необходимой жесткости металлоконструкции и снижением статического и динамического дисбалансов вращающегося АП.

Задачу балансировки АП можно подразделить на три части [1]:

- определение статического и динамического дисбаланса конструкции АП;
- устранение дисбаланса путем установки балансировочных грузов;
- проверка результатов балансировки.

Основные причины дисбаланса конструкции АП:

- конструктивные – обусловлены неоптимальным распределением оборудования в пространстве аппаратного контейнера антенного поста;

- технологические – обусловлены погрешностями изготовления;

- эксплуатационные – обусловлены износом оборудования.

АП считают статически и динамически сбалансированным, если центр масс расположен на вертикальной оси вращения $x_c = 0, y_c = 0$ и ось вращения является главной центральной осью инерции АП.

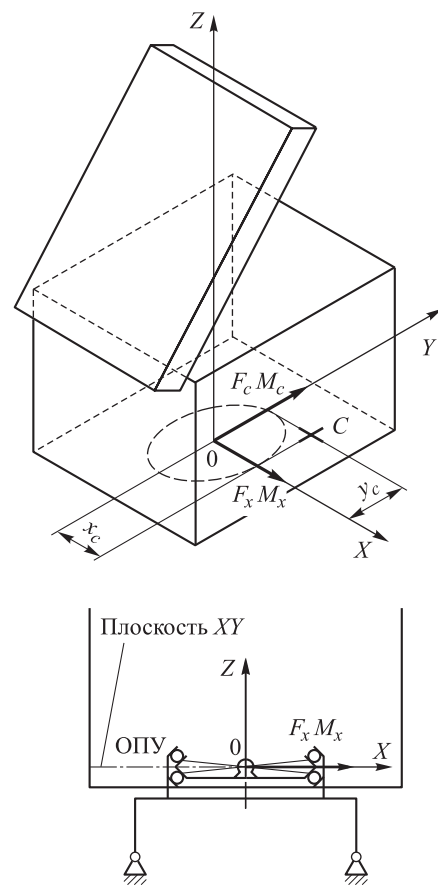


Рис. 1. Система координат, связанная с АП

Расчет моментов статического и динамического дисбаланса проводят относительно плоскости качения шаров ОПУ. Система координат, связанная с АП и проходящая через его ось вращения, приведена на рис. 1.

Одним из критериев балансировки АП является сведение к минимуму динамических реакций в опорах ОПУ. При вращении АП на каждый элемент конструкции действует центробежная сила, направленная горизонтально. Сила тяжести и центробежная сила создают соответствующие моменты относительно плоскости качения шаров ОПУ. Суммарный момент дисбаланса получается суммированием моментов дисбаланса для каждого элемента АП. Рассмотрим два варианта балансировки (рис. 2).

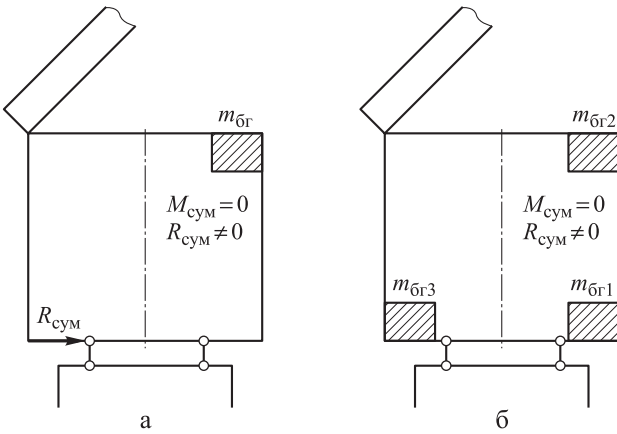


Рис. 2. Варианты балансировки АП:
а – вариант 1; б – вариант 2

Вариант 1.

На определенной заданной частоте вращения АП суммарный момент дисбаланса от сил тяжести и центробежных сил сводится к нулю ($M_{\text{сум}} = 0$); суммарная центробежная сила остается неуравновешенной ($R_{\text{сум}} \neq 0$).

Проекции момента статического дисбаланса от сил тяжести определяют по формулам [2]:

$$M_{\text{ст } x} = -g \sum_{i=1}^n (y_i m_i); \quad (1)$$

$$M_{\text{ст } y} = g \sum_{i=1}^n (x_i m_i), \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;
 m_i – масса i -го элемента конструкции АП, кг;
 x_i, y_i – координаты i -го элемента конструкции АП в системе координат XYZ , связанной с АП и осью вращения, м;

n – расчетное число элементов конструкции АП.

Проекции момента динамического дисбаланса от центробежных сил при заданной скорости вращения АП находят по формулам [3]

$$M_{\text{цб } x}(\Omega) = -(\pi\Omega/30)^2 \sum_{i=1}^n (y_i z_i m_i); \quad (3)$$

$$M_{\text{цб } y}(\Omega) = (\pi\Omega/30)^2 \sum_{i=1}^n (x_i z_i m_i), \quad (4)$$

где Ω – заданная скорость вращения АП, об/мин;

z_i – координата i -го элемента конструкции АП от плоскости вращения ОПУ, м.

Проекции суммарного момента дисбаланса при заданной скорости вращения АП определяют по формулам

$$M_{\text{цб } x}(\Omega) = M_{\text{ст } x} + M_{\text{цб } x}(\Omega); \quad (5)$$

$$M_{\text{сум } y}(\Omega) = M_{\text{ст } y} + M_{\text{цб } y}(\Omega). \quad (6)$$

Направление вектора суммарного момента дисбаланса и расположение плоскости установки балансировочного груза показаны на рис. 3. Угол наклона плоскости установки балансировочного груза рассчитывают по формуле

$$\gamma_0 = \text{arctg} \left(-\frac{M_{\text{сум } y}(\Omega)}{M_{\text{сум } x}(\Omega)} \right). \quad (7)$$

Для минимизации массы балансировочного груза необходимо установить его на крыше аппаратного контейнера АП в плоскости действия суммарного момента дисбаланса на максимально возможном удалении от оси вращения.

Координату центра тяжести балансировочного груза по оси X определяют с помощью выражения:

$$x_{\text{бг}} = y_{\text{бг}} \text{tg}(\gamma_0), \quad (8)$$

где $y_{\text{бг}}$ – координата центра тяжести балансировочного груза по оси Y , определяемая конструктивно возможным местом установки груза на аппаратном контейнере АП, м.

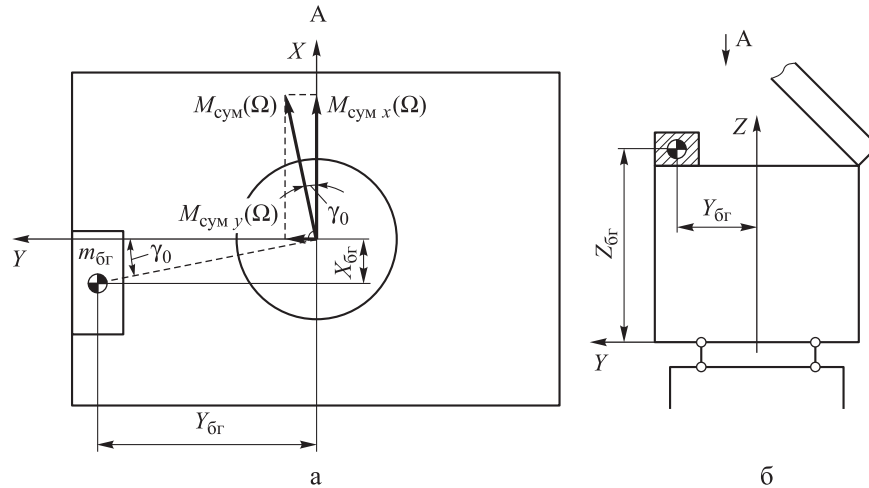
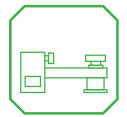


Рис. 3. Расположение плоскости установки балансировочного груза:
а – вид слева, б – вид справа

Массу балансировочного груза, необходимую для уравнивания суммарного момента дисбаланса при заданной частоте вращения АП, определяют выражением

$$m_{bg} = \frac{\sqrt{(M_{\Sigma x}(\Omega))^2 + (M_{\Sigma y}(\Omega))^2}}{((\pi\Omega/30)^2 z_{bg} + g)\sqrt{(x_{bg})^2 + (y_{bg})^2}}, \quad (9)$$

где z_{bg} – координата места установки балансировочного груза по оси Z, заданная расстоянием от плоскости ОПУ до конструктивно возможной плоскости установки груза на аппаратном контейнере АП, м.

Результаты расчета балансировочных грузов на заданной частоте вращения АП приведены на рис. 4 и в табл. 1.

Графики изменения проекций суммарного момента дисбаланса от времени при разгоне АП до заданной частоты вращения при установленном балансировочном грузе $m_{bg} = 535$ кг в неподвижной системе координат представлены на рис. 5.

Вариант 2 (универсальный).

На всем интервале частот вращения АП суммарный момент дисбаланса и центробежную силу сводят к нулю: $M_{\Sigma} = 0, R_{\Sigma} = 0$.

Статическая балансировка обеспечена установкой на нижней части АП (днище аппаратного контейнера) балансировочного груза, уравнивающего момент дисбаланса от сил тяжести. Установка груза на нижней части контейнера обусловлена минимальным расстоянием z_{bg} до плоскости ОПУ и соответствен-

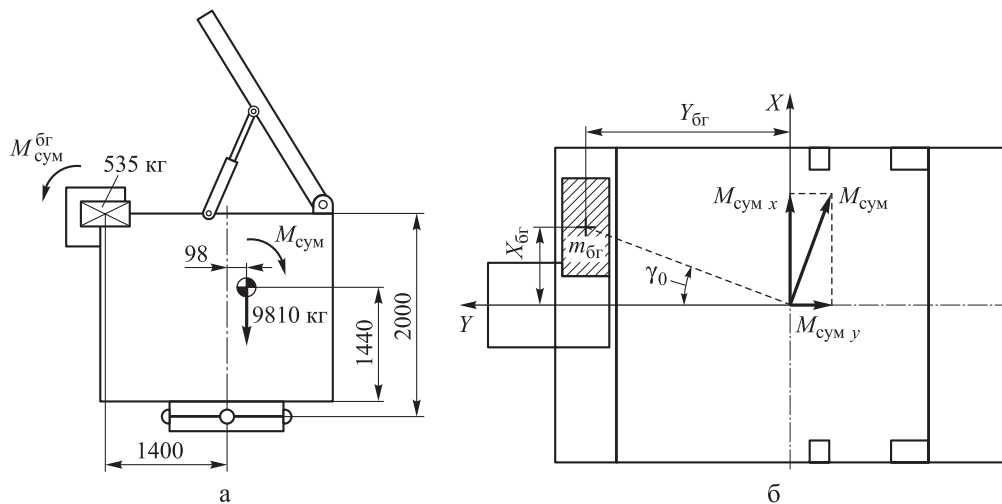


Рис. 4. Результаты расчета балансировки одним грузом:
а – вид сбоку; б – вид сверху



Таблица 1

Результаты расчета параметров балансировочных грузов

Расчетная методика	Параметр	Обозначение	Величина	
1	2	3	4	
Вариант 1. Балансировка на заданной частоте вращения АП	Масса груза	$m_{бг}$	535 кг	
	Координата груза по оси	x	$x_{бг}$	0,100 м
		y	$y_{бг}$	1,400 м
		z	$z_{бг}$	2,000 м
Вариант 2. Балансировка на всем интервале частот вращения АП (три груза)	Масса груза 1	$m_{бг}^{стат}$	685 кг	
	Координата груза 1 по оси	x	$x_{бг}^{стат}$	0,100 м
		y	$y_{бг}^{стат}$	1,400 м
		z	$z_{бг}^{стат}$	0
	Масса груза 2	$m_{бг}^{дин.1}$	430 кг	
	Координата груза 2 по оси	x	$x_{бг}^{дин.1}$	0,116 м
		y	$y_{бг}^{дин.1}$	1,620 м
		z	$z_{бг}^{дин.1}$	2,000 м
	Масса груза 3	$m_{бг}^{дин.2}$	630 кг	
	Координата груза 3 по оси	x	$x_{бг}^{дин.2}$	-0,080 м
y		$y_{бг}^{дин.2}$	-1,100 м	
z		$z_{бг}^{дин.2}$	0	
Вариант 2. Балансировка на всем интервале частот вращения АП (два груза)	Масса груза 1	$m_{бг}^{стат}$	190 кг	
	Координата груза 1 по оси	x	$x_{бг}^{стат}$	0,100 м
		y	$y_{бг}^{стат}$	1,400 м
		z	$z_{бг}^{стат}$	0
	Масса груза 2	$m_{бг}^{дин.1}$	430 кг	
	Координата груза 2 по оси	x	$x_{бг}^{дин.1}$	0,116 м
		y	$y_{бг}^{дин.1}$	1,620 м
z		$z_{бг}^{дин.1}$	2,000 м	

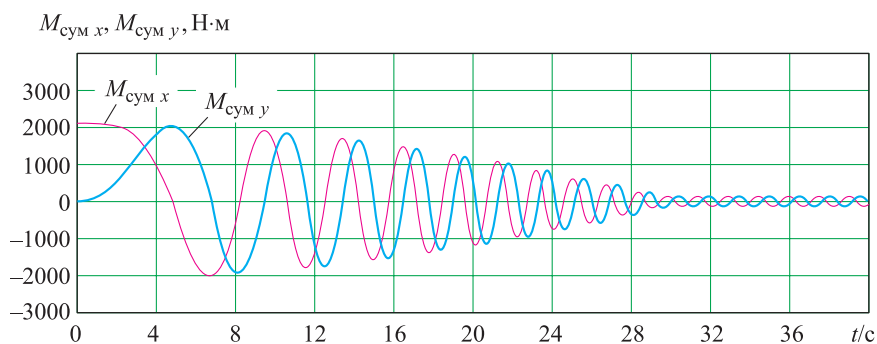
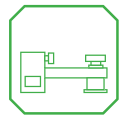


Рис. 5. Расчетная зависимость проекций суммарного момента дисбаланса от времени



но минимальным дополнительным моментом дисбаланса от центробежной силы, создаваемым балансировочным грузом.

Угол наклона плоскости установки балансировочного груза определяют выражением

$$\gamma_{ст} = \arctg\left(-\frac{M_{ст\ y}}{M_{ст\ x}}\right), \quad (10)$$

где $M_{ст\ x}$, $M_{ст\ y}$ – проекции момента статического дисбаланса, рассчитанные по формулам (1) и (2).

Координату центра тяжести балансировочного груза по оси Y определяют расстоянием от оси вращения АП до конструктивно возможного места установки груза $y_{бр}^{ст}$ (рис. 6)

Координату центра тяжести балансировочного груза по оси X определяют выражением

$$x_{бр}^{ст} = y_{бр}^{ст} \operatorname{tg}(\gamma_{ст}). \quad (11)$$

Массу балансировочного груза, необходимую для уравнивания опрокидывающего момента от сил тяжести, вычисляют по формуле

$$m_{бр}^{ст} = \frac{\sqrt{M_{ст\ x}^2 + M_{ст\ y}^2}}{g\sqrt{(x_{бр}^{ст})^2 + (y_{бр}^{ст})^2}}. \quad (12)$$

Динамическую балансировку АП получают с помощью установки пары балансировочных грузов на верхней (крыша аппаратного контейнера) и нижней (днище аппаратного контейнера) частях АП, уравнивающих

динамический момент от центробежных сил без нарушения статической балансировки. Угол наклона плоскости установки балансировочных грузов определяют выражением

$$\gamma_{дин} = \arctg\left(-\frac{M_{цб\ y}(\Omega) + (\pi\Omega/30)^2 x_{бр}^{ст} z_{бр}^{ст} m_{бр}^{ст}}{M_{цб\ x}(\Omega) - (\pi\Omega/30)^2 y_{бр}^{ст} z_{бр}^{ст} m_{бр}^{ст}}\right), \quad (13)$$

где $M_{цб\ x}(\Omega)$, $M_{цб\ y}(\Omega)$ – проекции момента динамического дисбаланса, определяемые по формулам (3) и (4);

$z_{бр}^{ст}$ – координата конструктивно возможного места установки груза по оси Z .

Координата центра тяжести верхнего балансировочного груза по оси Y равна расстоянию от оси вращения контейнера до конструктивно возможного места установки груза на верхней части АП $y_{бр}^{дин1}$ (рис. 7). Координату центра тяжести верхнего балансировочного груза по оси X рассчитывают так:

$$x_{бр}^{дин1} = y_{бр}^{дин1} \operatorname{tg}(\gamma_{дин}). \quad (14)$$

Координату центра тяжести нижнего балансировочного груза по оси Y считают от оси вращения контейнера до конструктивно возможного места установки груза на нижней части АП (см. рис. 7). Координату центра тяжести нижнего балансировочного груза по оси X вычисляют по формуле

$$x_{бр}^{дин2} = y_{бр}^{дин2} \operatorname{tg}(\gamma_{дин}). \quad (15)$$

Условие сохранения статической балансировки при установке грузов следующее:

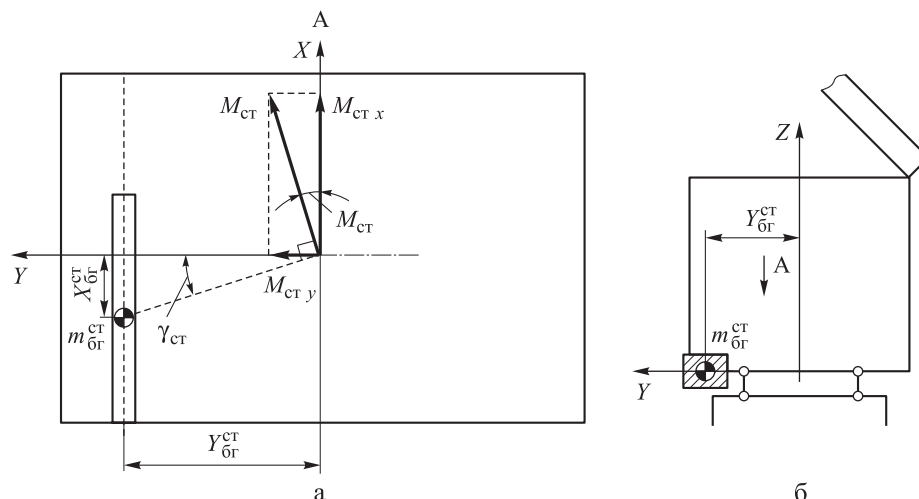


Рис. 6. Расчетная схема статической балансировки АП

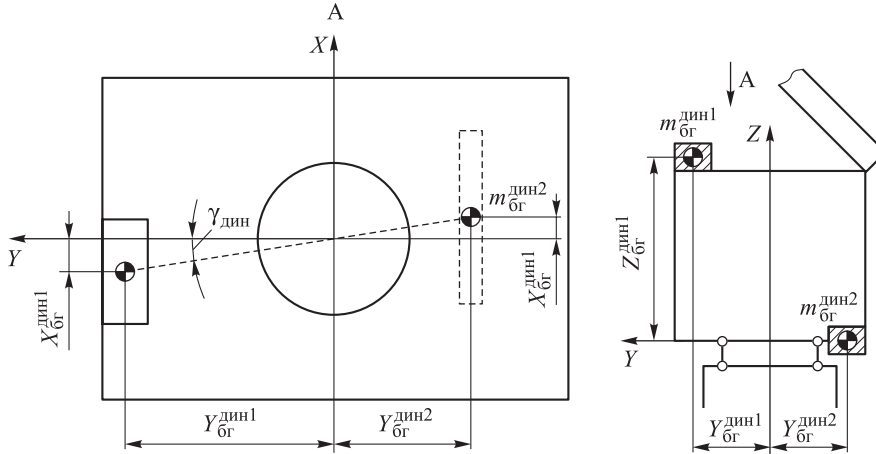


Рис. 7. Расчетная схема динамической балансировки АП

$$m_{бг}^{дин1} \sqrt{(x_{бг}^{дин1})^2 + (y_{бг}^{дин1})^2} - m_{бг}^{дин2} \sqrt{(x_{бг}^{дин2})^2 + (y_{бг}^{дин2})^2} = 0, \quad (16)$$

где $m_{бг}^{дин1}$ – масса верхнего балансировочного груза;

$m_{бг}^{дин2}$ – масса нижнего балансировочного груза.

Условие уравнивания динамического момента от центробежных сил [4]:

$$m_{бг}^{дин1} - \left(\frac{\pi \times \Omega}{30} \right)^2 \sqrt{(x_{13}^{дин1})^2 + (y_{13}^{дин1})^2} z_{13}^{дин1} - m_{бг}^{дин2} \left(\frac{\pi \times \Omega}{30} \right)^2 \sqrt{(x_{13}^{дин2})^2 + (y_{13}^{дин2})^2} z_{13}^{дин2} - M_{цб}(\Omega) = 0, \quad (17)$$

где $z_{бг}^{дин1}$ – координата центра тяжести верхнего балансировочного груза по оси Z, определяемая конструктивно возможным местом установки груза на верхней части АП;

$z_{бг}^{дин2}$ – координата центра тяжести нижнего балансировочного груза по оси Z, определяемая конструктивно возможным местом установки груза на нижней части АП;

$M_{цб}(\Omega)$ – суммарный динамический момент от центробежных сил,

$$M_{цб}(\Omega) = \left[\left(M_{цб,y}(\Omega) + (\pi \times \Omega/30)^2 x_{бг}^{ст} z_{бг}^{ст} m_{бг}^{ст} \right)^2 + \left(M_{цб,x}(\Omega) - (\pi \times \Omega/30)^2 y_{бг}^{ст} z_{бг}^{ст} m_{бг}^{ст} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (18)$$

Решая систему уравнений (16)–(18), получим значения $m_{бг}^{дин1}$, $m_{бг}^{дин2}$.

Если нет возможности установить груз в плоскости действия момента дисбаланса, то набор грузов необходимо поместить на имеющихся местах таким образом, чтобы общий центр масс грузов находился наиболее близко к плоскости действия момента дисбаланса.

Рассчитаем массы и координаты расположения балансировочных грузов для перспективного образца АП.

Антенный пост имеет следующие конструктивные параметры:

- масса вращающейся части АП $M = 9810$ кг;
- координаты центра масс АП $X_c = -0,007$ м; $Y_c = -0,098$ м; $Z_c = 1,440$ м;
- заданная частота вращения АП $\Omega = 40$ об/мин.

Результаты расчета моментов дисбаланса АП без установки балансировочных грузов приведены в табл. 2.

Графики зависимостей проекций суммарного момента дисбаланса от времени при разгоне АП до заданной частоты вращения без установки балансировочных грузов в неподвижной системе координат приведены на рис. 8.

Результаты расчета балансировочных грузов на всем интервале частот вращения АП даны на рис. 9 и указаны в табл. 1.

На рис. 9, а видно, что два нижних балансировочных груза $m_{бг}^{ст} = 685$ кг и $m_{бг}^{дин2} = 630$ кг и частично уравнивают друг друга, поэтому вместо двух балансировочных грузов можно использовать один груз массой $m_{бг}^{ст} = 190$ кг.

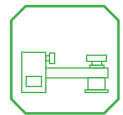


Таблица 2

Расчетные моменты дисбаланса АП без установки балансировочных грузов

Параметр	Обозначение	Величина
Момент статического дисбаланса	$M_{ст\ x}$	9431 Н·м
	$M_{ст\ y}$	-674 Н·м
Угол наклона плоскости действия момента статического дисбаланса	$\gamma_{ст}$	4,1°
Момент динамического дисбаланса	$M_{цб\ x}$	24290 Н·м
	$M_{цб\ y}$	-1735 Н·м
Угол наклона плоскости действия момента динамического дисбаланса	$\gamma_{дин}$	4,1°
Момент суммарного дисбаланса	$M_{сум\ x}$	33721 Н·м
	$M_{сум\ y}$	-2409 Н·м
Угол наклона плоскости действия момента суммарного дисбаланса	γ_0	4,1°

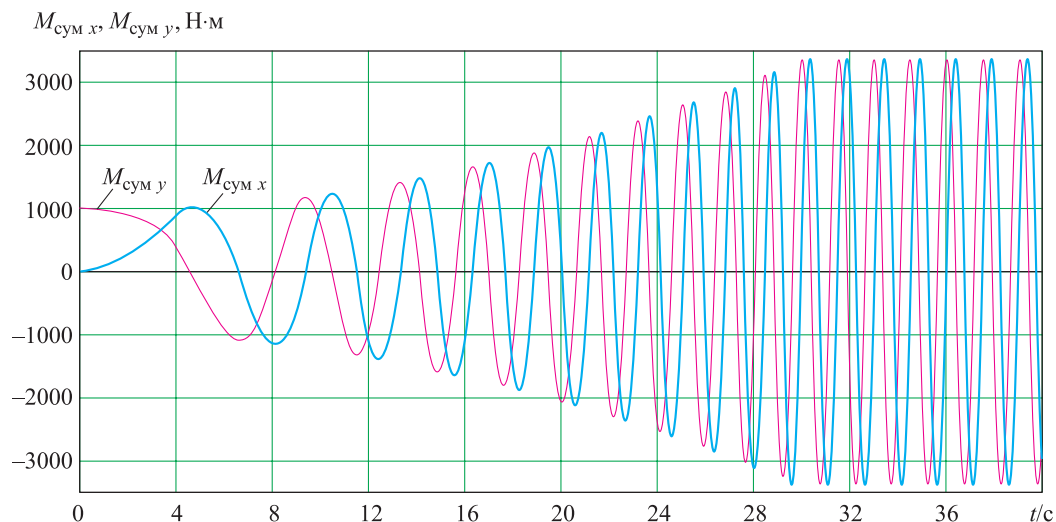


Рис. 8. Расчетная зависимость проекций суммарного момента дисбаланса от времени

Графики зависимости изменения проекций суммарного момента дисбаланса от времени при разгоне АП до заданной частоты вращения при установленных балансировочных грузах $m_{бр}^{дин1} = 430$ кг и $m_{бр}^{ст} = 190$ кг в неподвижной системе координат приведены на рис. 10.

Расчет показал, что для балансировки АП на одной определенной частоте вращения необходим балансировочный груз массой $m_{бр} = 535$ кг; для балансировки на всем интервале частот вращения АП нужно использовать три балансировочных груза суммарной массой $m_{бр} = 1745$ кг; для данного случая – два балансировочных груза суммарной массой $m_{бр} = 620$ кг.

Согласно приведенным расчетным оценкам для перспективного образца АП, наиболее эффективной по минимальной массе грузов является методика балансировки с использованием одного балансировочного груза. Такая балансировка привязана к номинальной частоте вращения АП. При наличии разброса частоты вращения АП могут возникнуть динамические реакции в ОПУ.

Последовательная балансировка двумя и более грузами универсальна для всех частот вращения АП и обеспечивает равенство нулю расчетных динамических моментов дисбаланса.

Выбор методики балансировки зависит от конструктивной возможности установки на АП необходимого количества балансировочных

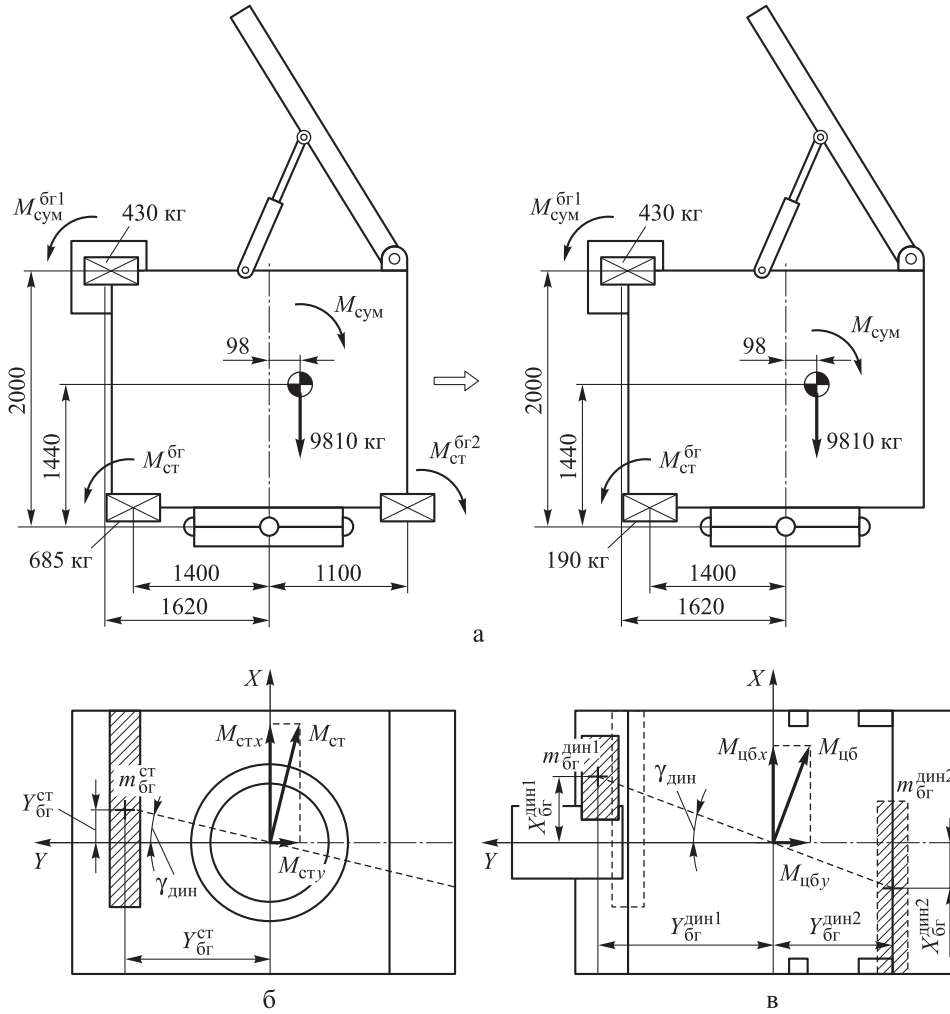


Рис. 9. Результаты расчета балансировки тремя грузами:
а – вид сбоку; б – вид снизу; в – вид сверху

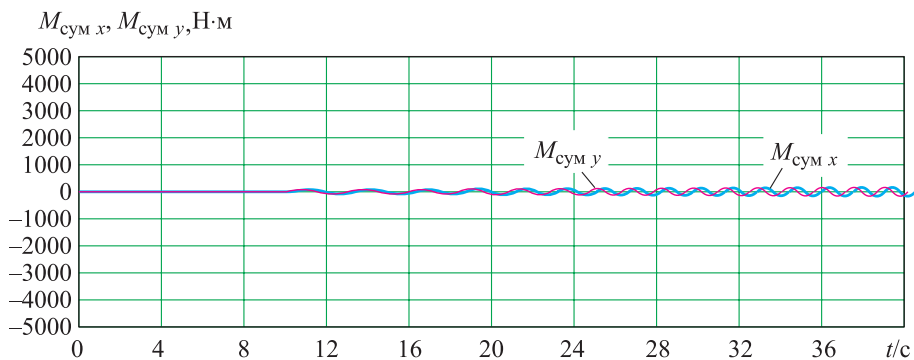
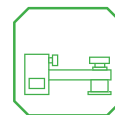


Рис. 10. Расчетная зависимость проекций суммарного момента дисбаланса от времени

грузов (компоновки АП и грузоподъемности), заданной точности балансировки, определяемой жесткостью металлоконструкции, техническими характеристиками привода вращения ОПУ и возможным диапазоном частот вращения АП.

Для перспективного образца АП использована универсальная методика балансировки на всем интервале частот вращения, на основании которой было разработано программное обеспечение для автоматизированного расчета параметров балансировки и балансировочных



грузов. Благодаря этим программам успешно проведена статическая и динамическая балансировка опытного образца перспективного АП.

Список литературы

1. *Щепетьникова В. А.* Основы балансировочной техники. Том 1. Уравновешивание жестких роторов и механизмов. М.: Машиностроение, 1975. 527 с.

2. *Левит М. Е., Рыженков В. М.* Балансировка деталей и узлов. М.: Машиностроение, 1986. 248 с.

3. *Степанов А. Г.* Динамика машин. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 302 с.

4. *Гусаров А. А.* Балансировка роторов машин. М.: Наука, 2005. 383 с.

Поступила 26.01.16

Королёв Андрей Валерьевич – начальник расчетно-исследовательского отдела АО «Конструкторское бюро специального машиностроения», старший преподаватель базовой кафедры «Средства ВКО и ПВО» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: создание наземного оборудования комплексов ВКО, ПВО и ВМФ, прикладная прочность конструкций, гидроприводы.

Теляков Рифат Фаридович – ведущий инженер расчетно-исследовательского отдела АО «Конструкторское бюро специального машиностроения», аспирант кафедры «Процессы управления» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: теория оптимального управления, теория дифференциальных игр, динамика полета, численные методики расчета, разработка алгоритмов и расчетных программ.

Щеглов Дмитрий Константинович – кандидат технических наук, заместитель начальника расчетно-исследовательского отделения – начальник лаборатории информационных технологий АО «Конструкторское бюро специального машиностроения», заведующий базовой кафедрой «Средства ВКО и ПВО» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: информационно-коммуникационные технологии, системный анализ, управление проектно-конструкторскими данными, системы поддержки принятия решений.

Analysis of dynamic balancing techniques for antenna stations

Two techniques of dynamic balancing of rotating antenna stations are considered. In the first one, the unbalance force and total momentum of an antenna station are neutralised by a balance weight at a single specific rotation frequency; in the second (universal) one, the unbalance force and momentum are neutralised by balance weights across the whole rotation frequency range of an antenna station.

Keywords: dynamic balancing, antenna station, rotating unbalance.

Korolev Andrey Valeryevich – Head of the Computation and Research Department, Joint stock company “Konstruktorskoye Byuro Spetsialnogo Mashinostroyeniya”; Senior Lecturer of the base Department of Aerospace and Anti-Air Defence Facilities, Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov, St. Petersburg. Research interests: developing ground-based equipment of aerospace defence, anti-air defence and Navy systems, applied durability of structures, and hydraulic actuators.

Telyakov Rifat Faridovich – Chief Engineer, Computation and Research Department, Joint stock company “Konstruktorskoye Byuro Spetsialnogo Mashinostroyeniya”; postgraduate student of the Management Processes Department, Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov, St. Petersburg. Research interests: optimal control theory, differential game theory, flight dynamics, numerical computation techniques, and algorithm and computation software development.

Scheglov Dmitriy Konstantinovich – Candidate of Engineering Sciences, Deputy Head of Computation and Research Department, Head of Information Technologies Laboratory, Joint stock company “Konstruktorskoye Byuro Spetsialnogo Mashinostroyeniya”; Head of the base Department Aerospace and Anti-Air Defence Facilities, Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov, St. Petersburg. Research interests: information and communication technologies, systems analysis, design project data management, decision-making support systems.