

УДК 629.7.036.5.062.3.001.24

## МОНОГАРМОНИЧЕСКИЙ МЕТОД АВТОИНТЕГРИРОВАНИЯ С ПОЛНЫМ ОСРЕДНЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФУРЬЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

**О.Б. Белоногов**

ОАО “Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королева”,  
Московская область, г. Королев, Российская Федерация  
e-mail: obelonogoff@mail.ru

*Исследуется работоспособность варианта метода автоинтегрирования с полным осреднением коэффициентов Фурье для расчета амплитудно-фазовых частотных характеристик нелинейных динамических объектов и систем управления с заданной погрешностью вычислений и за минимальное время. Предлагаемый вариант метода автоинтегрирования основан на численном интегрировании систем нелинейных дифференциальных уравнений математических моделей объектов и систем управления при моногармонических входных воздействиях на фиксированных частотах и анализе периодических откликов на эти воздействия методом Фурье. Процесс интегрирования на каждой из фиксированных частот продолжается до тех пор, пока средние значения коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического отклика динамического объекта на входное моногармоническое воздействие за пройденное число периодов входного сигнала не станут достаточно постоянными.*

**Ключевые слова:** частотные характеристики, динамические объекты, системы управления.

## MONOHARMONIC METHOD OF AUTOINTEGRATION WITH FULL AVERAGING OF FOURIER COEFFICIENTS FOR CALCULATION OF FREQUENCY RESPONSE OF DYNAMIC OBJECTS AND CONTROL SYSTEMS

**O.B. Belonogov**

ОАО “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”,  
Moscow region, Russian Federation  
e-mail: obelonogoff@mail.ru

*The workability of a variant of the method for autointegration with full averaging of Fourier coefficients to calculate gain-phase characteristics of nonlinear dynamic objects and control systems with a specified error of calculations and for the minimum time is investigated. The proposed variant of the autointegration method is based on the numerical integration of systems of nonlinear differential equations of mathematical models of objects and control systems with monoharmonic input actions at fixed frequencies and on the analysis of periodic responses to these actions using the Fourier method. The integration process for each of the fixed frequencies continues until the Fourier coefficients of the investigated harmonic of the output periodic response of the dynamic object to the input monoharmonic action, which are averaged over the number of input signal periods that have elapsed, become constant enough.*

**Keywords:** frequency response, dynamic objects, control systems.

Для проведения идентификации параметров, оптимизации и оценки соответствия выбранному критерию устойчивости динамических объектов, регуляторов и следящих систем управления требуется определение амплитудно-частотных и фазочастотных искажений, возникающих при обработке ими входных моногармонических сигналов на заданных частотах. Кроме того, при проектировании регуляторов и следящих систем часто требуется определять полосы их пропускания. С этой целью проводятся расчеты амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ).

Как показано в работе [1], частотные характеристики линейных или линеаризованных моделей регуляторов и следящих систем можно получить из их переходных характеристик, используя принцип взаимнооднозначного соответствия между функциями в области действительных переменных и в области комплексных переменных, осуществляемых преобразованиями Фурье и Лапласа. Однако такой метод не пригоден для расчетов частотных характеристик нелинейных объектов, так как достоверные частотные характеристики для нелинейных моделей могут быть получены только посредством возбуждения гармоническими входными сигналами на различных фиксированных частотах с последующим анализом реакций на эти возбуждения методом Фурье в режиме установившихся периодических колебаний [2, 3].

В то же время наблюдаются некоторые различия таких алгоритмов расчета. Так, в соответствии с алгоритмом, представленным в работе [3], интегрирование осуществляется в течение только одного (первого) периода колебаний входного моногармонического сигнала на каждой из фиксированных частот, при этом расчеты амплитуд и фазовых запаздываний первых гармоник выходных сигналов также проводятся по этим первым периодам. Чтобы устранить влияние переходных процессов втягивания системы в вынужденные колебания, алгоритмом расчета [4] предписывается проводить интегрирование в течение шести периодов колебаний входного сигнала на каждой из фиксированных частот, при этом амплитуды и фазовые запаздывания первых гармоник выходных сигналов рассчитываются по последним (шестым) периодам.

Таким образом, если в алгоритме расчета [3] никак не учитывается влияние на результаты расчетов переходных процессов втягивания системы в вынужденные колебания при синусоидальном возбуждении, то и алгоритм [4] также не гарантирует получения точных результатов.

В работе [5] авторами установлено, что переходные процессы втягивания в вынужденные колебания при гармонических входных воздействиях даже у некоторых линейных динамических объектов могут длиться достаточно долго, а у такого звена, как консервативное, переходные процессы могут не заканчиваться вообще. Поэтому для нели-

нейных и некоторых линейных динамических объектов заранее никогда неизвестно число периодов входного моногармонического сигнала, в течение которых длится переходный процесс втягивания в вынужденные колебания. Игнорирование этой особенности при расчетах частотных характеристик может приводить к существенным ошибкам.

Поэтому определенный теоретический и практический интерес представляет задача разработки методов и алгоритмов расчета частотных характеристик регуляторов и следящих систем, позволяющих получать результаты с заданной погрешностью вычислений и за минимальное время (так называемых методов автоинтегрирования) [6].

До определенного времени создание и внедрение подобных методов и алгоритмов для расчета АФЧХ следящих систем и других сложных динамических объектов, основанных на численном интегрировании нелинейных дифференциальных уравнений их математических моделей при моногармонических входных воздействиях, сдерживались низким уровнем быстродействия вычислительной техники.

Стремительное развитие вычислительной техники и совершенствование ее характеристик (в частности, возрастание уровня быстродействия компьютеров) в последние годы позволили практически полностью переориентировать методы расчета частотных характеристик динамических объектов и систем с приближенных, получаемых из переходных характеристик, на более точные, основанные на численном интегрировании дифференциальных уравнений математических моделей систем при моногармонических входных воздействиях на фиксированных частотах и анализе откликов на эти воздействия методом Фурье.

Анализ постоянства параметров реакций динамических объектов и систем на моногармонические воздействия можно проводить различными способами, которые, в частности, могут быть основаны на сравнении вычисляемых значений амплитуд и фазовых сдвигов или на сравнении вычисляемых значений коэффициентов Фурье исследуемых гармоник выходных сигналов (откликов).

В работе [7] показано, что наиболее эффективные алгоритмы метода автоинтегрирования должны базироваться на сравнении действительных и мнимых составляющих (коэффициентов Фурье) исследуемой гармоники периодического отклика динамического объекта на входное моногармоническое воздействие. При таком подходе к построению методов и алгоритмов существенно сокращается продолжительность вычислений АФЧХ нелинейных динамических объектов.

В свою очередь для анализа постоянства коэффициентов Фурье исследуемой гармоники периодического отклика динамического объекта или системы управления можно использовать различные варианты:

— значения коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала на  $n$ -м периоде колебаний входного моногармонического сигнала сравниваются со значениями этих же параметров на  $(n - 1)$ -м периоде (вариант метода автоинтегрирования без осреднения коэффициентов Фурье);

— средние за последние  $l$  периодов значения коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала на  $n$ -м периоде колебаний входного моногармонического сигнала сравниваются со средними за последние  $l$  периодов значениями этих же параметров на  $(n - 1)$ -м периоде (вариант метода автоинтегрирования с локальным осреднением коэффициентов Фурье);

— выполняется сравнение средних за  $n - n_k$  периодов значений коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала динамического объекта или системы управления, получаемых на  $n$ -м периоде входного моногармонического сигнала (здесь  $n_k$  — число неанализируемых периодов), со средними значениями этих же параметров на  $(n - 1)$ -м периоде (вариант метода автоинтегрирования с полным осреднением коэффициентов Фурье);

— значения коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала на  $n$ -м периоде колебаний входного моногармонического сигнала сравниваются со средними за последние  $l$  периодов значениями коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала на  $n$ -м периоде колебаний входного моногармонического сигнала (первый комбинированный вариант метода автоинтегрирования);

— осуществляется сравнение значений коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала на  $n$ -м периоде колебаний входного моногармонического сигнала со средними за  $n - n_k$  периодов значениями коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала динамического объекта или системы управления, получаемыми на  $n$ -м периоде входного моногармонического сигнала (второй комбинированный вариант метода автоинтегрирования);

— средние за последние  $l$  периодов значения коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала на  $n$ -м периоде колебаний входного моногармонического сигнала сравниваются со средними за  $n - n_k$  периодов значениями коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала динамического объекта или системы управления, получаемыми на  $n$ -м периоде входного моногармонического сигнала (третий комбинированный вариант метода автоинтегрирования).

В настоящей статье исследуется работоспособность варианта метода автоинтегрирования с полным осреднением коэффициентов Фурье.

**Описание варианта метода автоинтегрирования.** Предлагаемый метод автоинтегрирования для расчета АФЧХ динамических объектов, регуляторов и следящих систем управления базируется на сравнении средних значений коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала, получаемых на последнем периоде входного моногармонического сигнала, со средними значениями этих же коэффициентов Фурье на предпоследнем периоде.

Алгоритм предлагаемого метода предписывает завершение процесса интегрирования уравнений математической модели динамического объекта, регулятора или следящей системы управления на каждой из фиксированных частот входного моногармонического сигнала после того, как относительные изменения сравниваемых параметров станут по модулю меньше заранее заданного числа, регламентирующего погрешность вычислений.

Алгоритм метода имеет два основных цикла — по частоте и по времени, при этом текущее значение входного моногармонического сигнала вычисляется по соотношению [2]

$$U_i = A_i \sin[2\pi f(n_f)t],$$

где  $A_i$  — амплитуда входного моногармонического сигнала;  $f(n_f)$  — частота входного моногармонического сигнала ( $n_f$  — номер частоты);  $t$  — текущее время.

В цикле по частоте, который начинается с  $n_f = 1$  и заканчивается  $n_f = m$ , на каждой из фиксированных частот  $f(n_f)$  входного моногармонического сигнала выполняется интегрирование дифференциальных уравнений, составляющих математическую модель исследуемого динамического объекта.

В течение первых  $n_k$  периодов входного моногармонического сигнала (т.е. когда  $i \leq n_k$ ), где искажения наиболее велики, операции анализа не проводятся (здесь  $i$  — номер периода). По завершении  $n_k$ -го периода на каждом из следующих периодов последовательно выполняются следующие действия:

— вычисляются коэффициенты Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала по соотношениям [2]

$$P(i) = 2f(n_f) \sum_{j=1}^{jm} \frac{U_0(j) + U_0(j-1)}{2} h \sin[2\pi k_f(n_f)t];$$

$$Q(i) = 2f(n_f) \sum_{j=1}^{jm} \frac{U_0(j) + U_0(j-1)}{2} h \cos[2\pi k_f(n_f)t],$$

где  $P$  — действительная составляющая (действительный коэффициент Фурье)  $k$ -й гармоники выходного периодического сигнала;  $Q$  —

мнимая составляющая (мнимый коэффициент Фурье)  $k$ -й гармоники выходного периодического сигнала;  $U_0$  — выходной периодический сигнал динамического объекта;  $k$  — номер гармоники;  $T$  — период входного моногармонического сигнала,  $j$  — номер шага интегрирования;  $j_m = T/h$  — число шагов интегрирования  $h$ , содержащихся в одном периоде  $T$  входного моногармонического сигнала. Чтобы получить результаты вычислений с одинаковой точностью на каждой фиксированной частоте входного моногармонического сигнала, шаг интегрирования  $h$  по времени варьируется и его значение в зависимости от частоты  $f(n_f)$  вычисляется по выражению [1]

$$h = 1/K_f f(n_f),$$

где  $K_f$  — коэффициент, значение которого определяет максимальное значение шага интегрирования по времени на минимальной частоте входного моногармонического сигнала, обеспечивающего устойчивый процесс интегрирования. Он определяется экспериментально для каждой конкретной математической модели динамического объекта, регулятора или системы управления:

— определяются средние значения коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала за пройденное число периодов входного моногармонического сигнала по соотношениям

$$P_c(n) = \frac{\sum_{i=n_k+1}^n P(i)}{n - n_k},$$

$$Q_c(n) = \frac{\sum_{i=n_k+1}^n Q(i)}{n - n_k};$$

— проводится сравнение модулей отношений разности модулей средних значений каждого из коэффициентов Фурье исследуемой гармоники на последнем и предпоследнем периодах входного моногармонического сигнала к модулю среднего значения этого коэффициента на последнем периоде входного моногармонического сигнала с наперед заданным числом  $\varepsilon$ , определяющим заданную погрешность вычислений в процентах, по формулам

$$\left| \frac{|P_c(n)| - |P_c(n-1)|}{|P_c(n)|} \right| \cdot 100 \leq \varepsilon;$$

$$\left| \frac{|Q_c(n)| - |Q_c(n-1)|}{|Q_c(n)|} \right| \cdot 100 \leq \varepsilon.$$

Если оба неравенства выполняются, тогда вычисляются:

— относительная амплитуда исследуемой гармоники выходного периодического сигнала (коэффициент передачи) как отношение амплитуды исследуемой гармоники выходного периодического сигнала (определяемой по средним значениям коэффициентов Фурье на последнем периоде входного моногармонического сигнала) к амплитуде входного моногармонического сигнала возбуждения [2] по формуле

$$A(n) = \frac{\sqrt{P_c(n)^2 + Q_c(n)^2}}{A_i},$$

— фазовый сдвиг (в градусах) исследуемой гармоники выходного периодического сигнала к входному моногармоническому сигналу (определяемому по средним значениям коэффициентов Фурье на последнем периоде входного моногармонического сигнала) по известному соотношению [2]:

$$\varphi(n) = \begin{cases} 57,3 \operatorname{arctg} \frac{Q_c(n)}{P_c(n)} & \text{при } P_c(n) > 0 \text{ и } Q_c(n) < 0; \\ -180 + 57,3 \operatorname{arctg} \frac{Q_c(n)}{P_c(n)} & \text{при } P_c(n) < 0 \text{ и } Q_c(n) < 0; \\ -180 + 57,3 \operatorname{arctg} \frac{Q_c(n)}{P_c(n)} & \text{при } P_c(n) < 0 \text{ и } Q_c(n) > 0; \\ -360 + 57,3 \operatorname{arctg} \frac{Q_c(n)}{P_c(n)} & \text{при } P_c(n) > 0 \text{ и } Q_c(n) > 0; \\ 180 [-1 - 0,5 \operatorname{sign} Q_c(n)] & \text{при } P_c(n) = 0. \end{cases}$$

Для получения логарифмических АФЧХ (ЛАФЧХ) используется выражение

$$A_L(n) = 20 \operatorname{Lg} \frac{\sqrt{P_c(n)^2 + Q_c(n)^2}}{A_i}.$$

Возможность применения разработанного метода автоинтегрирования для расчета ЛАФЧХ существенно нелинейных динамических объектов исследуем на примере получения ЛАФЧХ первой и второй гармоник существенно нелинейного колебательного элемента с классическим сухим (кулоновым) трением для трех различных вариаций безразмерных величин — амплитуды входного гармонического воздействия и силы сухого трения.

**Математическая модель тестового существенно нелинейного динамического объекта.** Математическая модель колебательного элемента с сухим трением, с помощью которой исследуется работоспособность предлагаемого метода автоинтегрирования, представляет собой систему следующих нелинейных дифференциальных уравне-

ний, описывающих тестовый элемент для условий покоя и движения:

$$\frac{dY}{dt} = V;$$
$$\frac{dV}{dt} = F_R m^{-1},$$

где  $Y$  — безразмерное перемещение выходного органа колебательно-го элемента;  $V$  — безразмерная скорость движения выходного органа колебательного элемента;  $m$  — безразмерная масса выходного органа колебательного элемента;  $F_R$  — безразмерная движущая сила, действующая на выходной орган колебательного элемента, для режимов покоя и движения определяемая как

$$F_R = \begin{cases} U_i - F_{c,t} \text{sign}(V) - K_{\Pi} Y & \text{при } V \neq 0; \\ U_i - F_{c,t} \text{sign}(U_i - K_{\Pi} Y) - K_{\Pi} Y & \text{при } V=0 \text{ и } |U_i - K_{\Pi} Y| > F_{c,t}; \\ 0 & \text{при } V = 0 \text{ и } |U_i - K_{\Pi} Y| \leq F_{c,t}; \end{cases}$$

здесь  $K_{\Pi}$  — безразмерный коэффициент позиционной нагрузки;  $F_{c,t}$  — безразмерная сила сухого трения.

При проведении вычислительных экспериментов использовались следующие безразмерные параметры математической модели колебательного элемента с сухим трением:  $m = 2,533 \cdot 10^{-4}$ ;  $K_{\Pi} = 1$ ;  $A_F = 0,01$ .

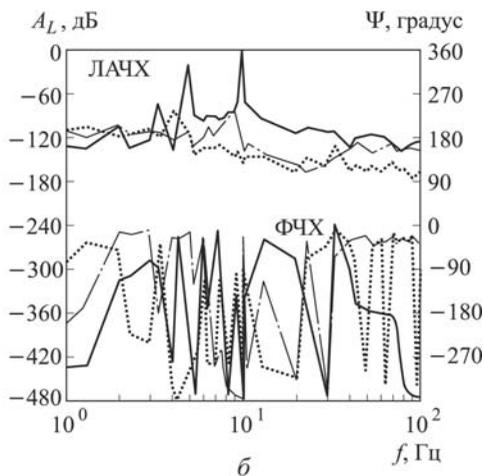
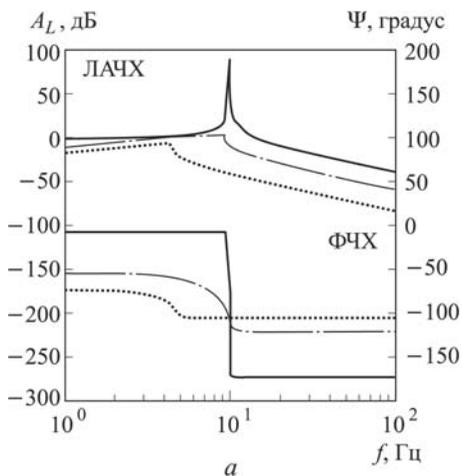
Указанные безразмерные параметры обеспечивают резонансную частоту колебательного элемента с сухим трением, равную приблизительно 10 Гц.

**Результаты вычислительных экспериментов.** Рассчитаем ЛАФЧХ колебательного элемента с сухим трением для следующего ряда фиксированных частот  $f(n_f)$ , Гц: 1; 1,3; 2; 2,3; 3; 3,3; 4; 4,3; 5; 5,3; 6; 6,3; 7; 7,3; 8; 8,3; 9; 9,3; 10; 10,03; 10,1; 10,2; 10,3; 10,4; 13; 20; 23; 30; 33; 40; 43; 50; 53; 60; 63; 70; 73; 80; 83; 90; 93; 100.

Вычислительные эксперименты были проведены для следующих значений безразмерной силы сухого трения  $F_{c,t}$ : 0,001; 0,008; 0,0095.

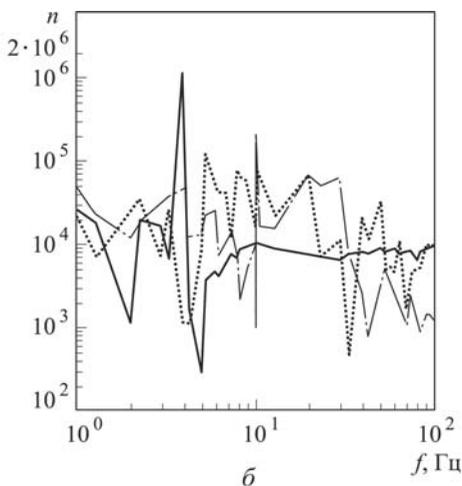
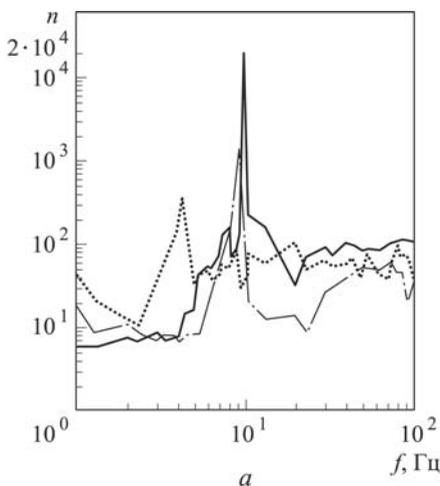
Результаты вычислительных экспериментов по определению ЛАФЧХ первой и второй гармоник выходного периодического сигнала колебательного элемента с сухим трением с погрешностью вычислений  $\varepsilon = 0,01\%$  для значений безразмерной силы сухого трения  $\bar{F}_{c,t} = F_{c,t}/A_F = 0,1; 0,8; 0,95$  представлены на рис. 1. На рис. 2 представлены зависимости числа  $n$  периодов интегрирования, необходимых для достижения заданной погрешности вычислений, от частоты входного моногармонического сигнала  $f$  для указанных гармоник.

Дальнейшие вычислительные эксперименты показали возможность вычисления ЛАФЧХ любых гармоник тестового динамического объекта с помощью предложенного метода автоинтегрирования.



**Рис. 1. ЛАФЧХ первой (а) и второй (б) гармоник колебательного элемента с сухим трением:**

— —  $\bar{F}_{c.t} = 0,1$ ; ·-·-· —  $\bar{F}_{c.t} = 0,8$ ; ····· —  $\bar{F}_{c.t} = 0,95$



**Рис. 2. Число периодов, необходимых для достижения заданной точности вычислений первой (а) и второй (б) гармоник колебательного элемента с сухим трением:**

— —  $\bar{F}_{c.t} = 0,1$ ; ·-·-· —  $\bar{F}_{c.t} = 0,8$ ; ····· —  $\bar{F}_{c.t} = 0,95$

В процессе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

— разработан и предложен вариант моногармонического метода автоинтегрирования для расчета АФЧХ динамических объектов, регуляторов и систем управления, основанный на численном интегрировании систем нелинейных дифференциальных уравнений математических моделей этих объектов при моногармонических входных воздействиях на фиксированных частотах и анализе периодических откликов на эти воздействия методом Фурье. Процесс интегрирования на

каждой из фиксированных частот продолжается до тех пор, пока сравниваемые параметры исследуемой гармоники периодического отклика динамического объекта на входное моногармоническое воздействие не станут достаточно постоянными;

— показано, что в качестве критерия достаточности постоянства коэффициентов Фурье в методе автоинтегрирования может быть использовано сравнение средних значений коэффициентов Фурье исследуемой гармоники выходного периодического сигнала динамического объекта или системы, получаемых на последнем периоде входного моногармонического сигнала, со средними значениями этих же коэффициентов Фурье на предпоследнем периоде;

— впервые получены семейства ЛАФЧХ первой, второй и последующих гармоник колебательного элемента с сухим трением.

**Выводы.** 1. Предложенный вариант моногармонического метода автоинтегрирования с полным осреднением коэффициентов Фурье применим для расчета АФЧХ динамических объектов, содержащих существенно нелинейные объекты типа колебательного элемента с сухим трением.

2. С помощью предложенного варианта метода автоинтегрирования можно рассчитывать частотные характеристики как четных, так и нечетных гармоник нелинейных динамических объектов и систем управления с заданной погрешностью вычислений и за минимальное время.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронов А.Л.* Основы теории автоматического управления. М.: Энергия, 1954. 312 с.
2. *Вавилов А.А., Солодовников А.И.* Экспериментальное определение частотных характеристик автоматических систем. М.–Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1963.
3. *Алексеев А.П., Котов Е.А., Чельшиев В.А.* Исследование двухполостного гидравлического привода дроссельного регулирования: сб.: Труды МВТУ. 221. Вопросы теории и проектирования автоматических систем. Вып. 2 / под ред. чл.-корр. АН СССР Е.П. Попова. М.: МВТУ, 1976.
4. *Карев В.И.* Алгоритмы расчета на ЦВМ характеристик динамической жесткости гидромеханической системы управления летательного аппарата // Сб.: Математические и цифровые модели следящих приводов летательных аппаратов. М.: МАИ. 1982.
5. *Исследование переходных процессов втягивания типовых динамических звеньев в вынужденные гармонические колебания / О.Б. Белоногов и др. // Ракетно-космическая техника. Сер. 12. 1998. Вып. 3–4. С. 245–258.*
6. *Коггер Н.Д.* Исследование частотной характеристики при синусоидальном возбуждении // Научно-технич. конф. “БРИТНАУЧПРИБОР-82”. Solartron Electronics Group Limited, 1982.
7. *Методы расчета частотных характеристик систем управления вектором тяги ракетных двигателей / О.Б. Белоногов и др. // Ракетно-космическая техника. Сер. 12. 1998. Вып. 3–4. С. 259–284.*

## REFERENCES

- [1] Voronov A.L. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Fundamentals of the theory of automatic control]. Moscow, Energiya Publ., 1954. 312 p.
- [2] Vavilov A.A., Solodovnikov A.I. *Ekspperimental'noe opredelenie chastotnykh kharakteristik avtomaticheskikh system* [Experimental study of frequency response of automatic systems]. Moscow–Leningrad, Gos. Energo. Izdat. Publ., 1963.
- [3] Alekseev A.P., Kotov E.A., Chelyshev V.A. The study of a bicameral hydraulic drive with throttle control. *Tr. MVTU "Voprosy teorii i proektirovaniya avtomaticheskikh system"* [Proc. of Moscow Higher Tech. School "Theory of automatic systems design", vol. 221, no. 2]. Moscow, MVTU Publ., 1976 (in Russ.).
- [4] Karev V.I. Numerical algorithms for computing dynamic stiffness characteristics of an aircraft hydromechanical control system. *Sb.: Matematicheskie i tsifrovye modeli sledyashchikh privodov letatel'nykh apparatov* [Collect. Works: Mathematical and numerical models for aircraft servo drives]. Moscow, MAI Publ., 1982 (in Russ.).
- [5] Belonogov O.B. Investigation of the transient shift of standard dynamic links to forced harmonic vibrations. *Raketno-Kosm. Tekhn.* [Aerosp. Tech.], Ser. 12, 1998, no. 3–4, pp. 245–258 (in Russ.).
- [6] Kogger N.D. The study of the frequency response to sinusoidal excitation. *Sci. Tech. Conf. "BRITNAUCHPRIBOR-82"*, Solartron Electron. Group Ltd., 1982.
- [7] Belonogov O.B. Methods for the numerical analysis of the frequency response of thrust vector control systems in rocket engines. *Raketno-Kosm. Tekhn.* [Aerosp. Tech.], Ser. 12, 1998, no. 3–4, pp. 259–284 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 14.01.2013

Олег Борисович Белоногов — канд. техн. наук, начальник сектора ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева». Автор 36 научных работ и 34 авторских свидетельств и патентов на изобретения в области расчета характеристик и идентификации параметров электрогидравлических и электропневматических систем и приводов ракет и космических аппаратов.

ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева», Российская Федерация, 141070, Московская область, г. Королев, ул. Ленина, д. 4а.

O.B. Belonogov — Cand. Sci. (Eng.), head of sector of the OAO «Korolev Rocket and Space Corporation «Energiya». Author of 36 publications and 34 author's certificates and patents for invention in the field of calculation of characteristics and identification of parameters of electric-hydraulic and electric-pneumatic systems and drives of rockets and spacecrafts.

OAO «Korolev Rocket and Space Corporation «Energiya», ul. Lenina, 4a, Korolev, Moscow region, 141075 Russian Federation.