

**ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМАЯ СТУПЕНЬ ПРЕДОХРАНЕНИЯ
ДЛЯ ВЗРЫВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА К КРЫЛАТОЙ РАКЕТЕ
С ПОДВОДНЫМ СТАРТОМ**

**AN ENERGY INDEPENDENT SAFETY AND ARMING SYSTEM
FOR THE UNDERWATER LAUNCHED CRUISE MISSILE FUSE**

Чл.-корр. РАРАН А.Б. Борзов¹, А.К. Ефремов¹, И.А. Живнова², Н.Ю. Макарова¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, ²АО «НИТИ им. П.И. Снегирёва»

A.B. Borzov, A.K. Efremov, I.A. Zhivnova, N.Yu. Makarova

Специфической особенностью закона перегрузки крылатой ракеты с подводным стартом является наличие двух участков, соответствующих обеим фазам ее движения. Учитывая требование энергонезависимости системы предохранения взрывателя предложено использовать механизм с зигзагообразным пазом. Показано, что он способен «отфильтровать» участок перегрузки во время фазы подводного движения ракеты и надежно взвестись при ее выходе на воздушную траекторию. Требование по безопасности при этом гарантированно выполняется.

Ключевые слова: взрыватель, крылатая ракета, подводный старт, фазы движения, закон перегрузки, энергонезависимая система предохранения, механизм с зигзагообразным пазом.

A specific feature of setback during the underwater launch of a cruise missile is the presence of two time-sections corresponding to both phases of its movement. Accounting the requirement of energy independence of the fuze safety and arming system, it is proposed to use a mechanism with a zigzag groove. It is shown that it is capable of «filtering out» the setback section during the underwater phase of the rocket movement and ensures reliable fuze arming when the rocket reaches the air trajectory. The safety requirement is guaranteed to be met.

Keywords: fuze, cruise missile, underwater launch, motion phases, setback function, energy independent safety and arming device, mechanism with a zigzag groove.

Введение

Активация бортовых энергосистем ракет при старте происходит в результате снятия ступеней предохранения взрывательного устройства (ВУ), по истечении заданного времени дальнего взведения. Как известно, характерной особенностью ракетных систем является относительно малый уровень перегрузок на активном участке траектории (ускорение — от единиц до десятков g). Поэтому практически исключается возможность применения в качестве автономных источников питания инерционных генераторов, например, магнито-

электрических и пьезоэлектрических (в совокупности с накопителями), поскольку для их инициирования необходимы перегрузки порядка $(15...20) \cdot 10^3$, что характерно для достаточно мощного артиллерийского выстрела [1]. Для микроэлектромеханических акселерометров требуется бортовой источник питания [2, 3].

Наблюдаемое ужесточение требований по миниатюризации ВУ предполагает внедрение новых принципов проектирования и конструирования. Одним из перспективных направлений представляется разработка системы предохранения, независимой от бортовой энергосистемы,

т.е. устройства чисто механического типа, выполняющего роль «инерционного включателя».

Однако при проектировании именно механической системы предохранения возникает проблема — обеспечить совместимость выполнения взаимно противоречивых требований по надежной взводимости при пуске и безопасности в условиях обращения. Сложность решения данной задачи связана с тем, что уровни динамических воздействий одинаковой физической природы, т.е. сил инерции, оказываются в этих условиях соизмеримыми. Тем не менее, опираясь на отличие длительности воздействий, проблеме удастся решить путем применения дискретных механических систем (ДМС), т.е. таких, в которых взводящееся звено совершает прерывистое движение [4, 5].

Наиболее целесообразна ступень предохранения в виде механизма с зигзагообразным пазом (МЗП), который в кинематическом смысле относится именно к дискретным системам. Преимущественная область применения МЗП — взрыватели к реактивным снарядам. Отметим очевидный, но принципиально важный для дальнейшего факт — взведение происходит при воздействии однократного импульса перегрузки на активном участке траектории.

Динамика подводного старта крылатых ракет (КР) предопределяет такую специфическую особенность закона перегрузки, как наличие двух участков, соответствующих начальным фазам движения ракеты [6–8]. Например, старт КР П-7 «Аметист» производился с глубины до 30 м из предварительно затопленного забортной водой контейнера («мокрый старт», реализованный впервые в мире). Крылья ракеты автоматически раскрывались под водой сразу же после выхода из контейнера. Под водой срабатывали четыре стартовых двигателя и двигателя подводного хода, после выхода ракеты на поверхность включались четыре стартовых двигателя воздушной траектории, а затем и маршевый двигатель [7, 8].

К ступени предохранения предъявляются следующие основные требования:

1) «отфильтровать» первый, более короткий, импульс перегрузки, т.е. не сработать при его воздействии;

2) гарантированно сработать при воздействии второго, более длительного, импульса, являющегося рабочим (взводящим);

3) обеспечить безопасность в условиях служебного обращения и боевого применения.

Математическая модель МЗП

В процессе взведения предохранительного механизма дискретного типа происходит циклическое нарушение плавности движения взводящейся детали вследствие частичного поглощения энергии, сообщаемой силой инерции. Фазы движения в пределах одного цикла процесса взведения таковы:

1) совместное движение ведущего и ведомого звеньев при их контакте, т.е. при наличии кинематической связи;

2) нарушение контакта;

3) раздельное движение звеньев;

4) восстановление контакта (и кинематической связи), сопровождающееся ударом и потерей скорости звеньев, т.е. частичным поглощением их кинетической энергии.

Отсюда видно, что это — сложный объект теоретического исследования, поскольку фазы движения необходимо описывать раздельно, с учетом трудно определяемых циклических начальных условий [3, 4]. Расчетная схема МЗП представлена на рис. 1. Гильза, имеющая зигзагообразный паз на боковой поверхности, совершает поступательное и возвратно-вращательное движения, направляющий штифт неподвижен относительно корпуса взрывателя. Это — наиболее распространенный на практике вариант конструкции данного механизма, представляющего собой дискретную винтовую кинематическую пару. Ее своеобразие в том, что гильза одновременно выполняет роль ведущего и ведомого звеньев, поскольку происходит преобразование (трансформация) поступательного движения гильзы, обусловленного осевой перегрузкой, во вращательное, вследствие взаимодействия паза со штифтом.

Движение механизма рассматриваем во время взведения при пуске. На рис. 1 $I \approx mr^2$, m — момент инерции и масса гильзы (как тонкостенного цилиндра со средним радиусом r); N — сила реакции, нормальная к поверхности паза; f — коэффициент трения; α — угол наклона колена паза; $R_x = R(x)$ — силовая характеристика предохранительной пружины; x — смещение гильзы относительно начального положения.

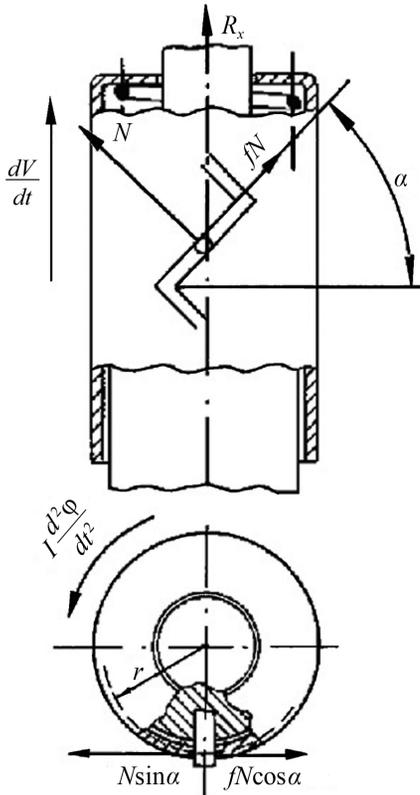


Рис. 1. Расчетная схема механизма с зигзагообразным пазом

Коэффициент кинематической связи между вращательным и поступательными движениями гильзы

$$\zeta = \frac{d\phi}{dx} = \frac{\operatorname{ctg}\alpha}{r},$$

где ϕ — угол поворота гильзы относительно продольной оси.

Дифференциальное уравнение поступательного движения звена приведения (гильзы) в пределах i -го участка ($1 \leq i \leq n$, где n — общее число участков) имеет вид

$$m_n \frac{d^2 x}{dt^2} = m_0 g k(t) - R_n(x), \quad (1)$$

где m_n , m_0 — приведенные массы, зависящие от конкретной кинематической структуры механизма; $k(t)$ — закон перегрузки при взведении или в служебном обращении; $R_n(x)$ — приведенная силовая характеристика (СХ) системы предохранения.

Возможны два способа представления СХ:

1) $R_n(x) = R_{0n} + c_n x$ — линеаризованная, где $R_{0n} = c_n \lambda_0$ — приведенное начальное сопротивление;

2) усредненная:

$$R_n \approx \operatorname{const} = R_{\text{сн}} = \frac{1}{a} \int_0^a R_n(x) dx,$$

где a — путь взведения.

Соответственно уравнение (1) можно записать левояко:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \begin{cases} \mu g [k(t) - k_{0n}] - \omega_{0n}^2 x \\ \mu g [k(t) - k_{\text{сн}}] \end{cases}, \quad (2)$$

где $\mu = m_0/m_n$ — кинематический параметр; $k_{0n} = R_{0n}/(m_0 g)$; $k_{\text{сн}} = R_{\text{сн}}/(m_0 g)$.

Внешне уравнение (1) имеет признаки линейного дифференциального уравнения. Однако СХ кусочно линейна, поскольку учитывается начальное сопротивление, необходимое для удержания взводящегося звена в исходном положении. Движение данной колебательной системы рассматривается лишь во время однократного (рабочего) хода звена, т.е. после отрыва от опоры. Поэтому применим аппарат решения линейных дифференциальных уравнений, но при оговорке, что величина $\omega_{0n} = \sqrt{c_n/m_n}$, должна трактоваться как условная приведенная частота собственных колебаний.

Ракетные системы, как отмечено, характеризуются длительно действующими силами инерции относительно малого уровня и на практике принимают следующий расчетный закон перегрузки:

$$k(t) \approx \operatorname{const} = k_{\max}, \quad 0 \leq t \leq T,$$

где T — длительность активного участка траектории.

Площадь под кривой перегрузки $k(t)$ в служебном обращении (удар боеприпаса о преграду при его случайном падении с высоты H обычно считают упругопластическим [9]) обладает следующим свойством [4]:

$$\int_0^{t_y} k(t) dt = \frac{V_0(1+\beta)}{g},$$

где $V_0 = \sqrt{2gH}$ — скорость падения боеприпаса; β — коэффициент восстановления скорости; t_y — длительность ударного процесса.

Для упрощения расчетов реальный закон перегрузки также можно заменить равновеликим прямоугольным импульсом $k(t) = k_m, 0 \leq t \leq t_y$, где k_m — средний уровень. Тогда условный закон перегрузки будет иметь такой же внешний вид, что и выше, что позволяет использовать единую простую математическую модель для обоих случаев. Если провести нормировку уравнений (2) по динамическим параметрам соответствующих прямоугольных законов перегрузки, то они также примут идентичный внешний вид. Так, для активного участка траектории ракеты можно записать

$$\frac{d^2 \bar{x}}{d\bar{t}^2} = \begin{cases} \mu(1 - \bar{k}_{он}) - \bar{v}^2 \bar{x} \\ \mu(1 - \bar{k}_{сн}) \end{cases}, \quad (3)$$

где $\bar{t} = t/T$; $\bar{x} = x/(gk_{max} T^2)$; $\bar{v} = v/(gk_{max} T)$; $\bar{k}_{сн} = k_{сн}/k_{max}$; $v = \omega_{он} T$. Для условий служебно-го обращения соответственно

$$\begin{aligned} \tilde{t} &= \frac{t}{t_y}; \quad \tilde{v} = \frac{v}{gk_m t_y} = \frac{v}{V_0(1+\beta)}; \\ \tilde{x} &= \frac{x}{gk_m t_y^2} = \frac{x}{V_0(1+\beta)t_y}; \quad \tilde{k}_{сн} = \frac{k_{сн}}{k_m}; \\ v &= \omega_{он} t_y. \end{aligned}$$

Для дальнейших выкладок используем вторую, т.е. наиболее простую, форму безразмерно-го уравнения (3)

$$\frac{d^2 \bar{x}}{d\bar{t}^2} = \frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = \bar{v} \frac{d\bar{v}}{d\bar{x}} = \mu(1 - \bar{k}_{сн}).$$

Учитывая относительную малость длительности этапа нарушения и последующего восстановления кинематической связи между ведущим и ведомым звеньями, будем считать, что эта фаза движения протекает мгновенно. Эффект падения скорости ведущего звена вследствие контактного соударения с ведомым звеном количественно характеризуем коэффициентом восстановления κ , условно считая его постоянным во время взведения. Это означает, что если скорость взводящейся детали в конце $(i-1)$ -го участка равна v_{i-1} , то в начале i -го участка ее принимаем равной κv_{i-1} . Опуская промежуточные выкладки, приведем окончательное выражение для времени взведения [6, 7]

$$\bar{t}_B = \bar{t}_{вн} \cdot f(n, \kappa), \quad (4)$$

где $\bar{t}_{вн} = \sqrt{2\bar{a}/[\mu(1 - \bar{k}_{сн})]}$ — время взведения при непрерывном движении; \bar{a} — путь взведения, нормированный по соответствующим динамическим параметрам;

$$f(n, \kappa) = \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1 - (\kappa^2)^i}{1 - \kappa^2}} - \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{\kappa^2 - (\kappa^2)^i}{1 - \kappa^2}} \right].$$

Если конкретное значение κ неизвестно, можно использовать усредненное представление функции

$$f(n, \kappa) \approx f_{cp}(n, \kappa) = \frac{f(n, 1) + f(n, 0)}{2} = \frac{1 + \sqrt{n}}{2},$$

где $\kappa = 0$ соответствует абсолютно пластичному удару; $\kappa = 1$ — упругому. Из табл. 1 видно, что среднее значение функции $f(n, \kappa)$ примерно соответствует $\kappa \approx 0,4$.

Для МЗП параметры, фигурирующие в уравнении (1), имеют следующий вид:

$$m_0 = m; \quad m_{п} = m[1 + \text{ctg}(\alpha - \rho)\text{ctg}\alpha],$$

$$\mu = \frac{1}{1 + \text{ctg}(\alpha - \rho)\text{ctg}\alpha},$$

где m — масса взводящегося звена (гильзы); $\rho = \text{arctg}f$ — угол трения.

Количественным критерием кинематической оптимальности МЗП является следующее выражение [4]

$$B_{\eta} = \frac{\text{ctg}^2 \alpha}{1 + \text{ctg}(\alpha - \rho)\text{ctg}\alpha},$$

которое обращается в ноль при $\alpha = \pi/2$ (холостой ход) и при $\alpha = \alpha_c = \rho$ (самоторможение) и представляет собой множитель в выражении для мгновенного КПД η . Оптимальное значение α находится из условия $dB_{\eta}/d\alpha = 0$, которое преобразуется в кубическое уравнение:

$$\text{tg}^3 \alpha - \frac{3f}{2} \text{tg}^2 \alpha - \frac{f}{2} = 0.$$

Результаты численного решения этого уравнения приведены в табл. 2.

Таблица 1

Функция $f(n, \kappa)$

n	κ										$\frac{1+\sqrt{n}}{2}$	
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0		
1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2	1,347	1,287	1,233	1,186	1,144	1,107	1,075	1,047	1,022	1,0	1,0	1,207
3	1,622	1,522	1,431	1,348	1,273	1,205	1,144	1,090	1,042	1,0	1,0	1,366
4	1,857	1,726	1,606	1,495	1,392	1,297	1,210	1,131	1,061	1,0	1,0	1,500
5	2,065	1,909	1,765	1,630	1,504	1,385	1,274	1,172	1,080	1,0	1,0	1,618
6	2,255	2,076	1,911	1,755	1,608	1,469	1,336	1,212	1,100	1,0	1,0	1,725
7	2,429	2,231	2,046	1,872	1,707	1,549	1,397	1,252	1,118	1,0	1,0	1,823
8	2,592	2,375	2,174	1,983	1,801	1,626	1,455	1,291	1,137	1,0	1,0	1,914

Таблица 2

Оптимальные параметры МЗП

f	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
α_{opt}^0	23,06	30,48	36,16	40,91	45,0
μ_{opt}	0,117	0,170	0,205	0,231	0,250

Условие безопасности для МЗП очевидно: $n_b < n$, где n_b — число участков, которые преодолит взводящаяся деталь в результате удара при падении блока с инерционным взрывателем (ИВ) на ту или иную преграду. Движение детали распадается на два этапа: вынужденное во время воздействия ударного импульса длительностью t_y , и последующее свободное движение.

Принимая в (4) $\bar{t}_b = 1$ (время перемещения на n_b участков прерывистого движения приравнивается к длительности ударного процесса), условие безопасности можно записать следующим образом, учитывая, что $f(n, \kappa)$ — функция возрастающая по n :

$$f(n_b, \kappa) = \sqrt{\frac{\mu(1-\tilde{k}_{cn})}{2\tilde{a}}} < f(n, \kappa), \quad (5)$$

где $\tilde{a} = a/(gk_m t_y^2)$. Приравняем площадь под кривой перегрузки площади условного (прямоугольного) закона $V_0(1+\beta)/g = k_m t_y$, откуда $t_y = V_0(1+\beta)/(gk_m)$. Подставив это выражение в (5) и разрешая неравенство относительно H , получим

$$H < H_\phi = H_0 \cdot \frac{1}{\tilde{k}_{cn}(1-\tilde{k}_{cn})} \cdot f^2(n, \kappa),$$

где $H_0 = (ak_{cn})/[\mu(1+\beta)^2]$ — фактическая высота безопасного падения для кинематически подобной аналоговой механической системы; H_ϕ — фактическая высота безопасного падения для МЗП. Максимальное значение функции $\tilde{k}_{cn}(1-\tilde{k}_{cn})$ равно 0,25, при $\tilde{k}_{cn} = 0,5$. Получающееся неравенство

$$H < 4f^2(n, \kappa)H_0 \approx (1+\sqrt{n})^2 H_0 \quad (6)$$

представляет собой условие безопасности МЗП в служебном обращении. Поскольку, множитель при H_0 минимален, то если условие (6) выполнено для данного (наихудшего) случая, то оно будет гарантированно удовлетворяться в любых других случаях. Множитель при H_0 по существу является количественной мерой эффективности ДМС по сравнению с аналоговой системой.

Из (5) следует важное для дальнейшего неравенство:

$$k_{\text{сн}} > \frac{\mu H (1 + \beta)^2}{4af^2(n, \kappa)} \approx \frac{\mu H (1 + \beta)^2}{a(1 + \sqrt{n})^2}. \quad (7)$$

Оценка реализуемости МЗП как энергонезависимой степени предохранения

Расчетный закон перегрузки условно представим в виде последовательности двух прямоугольных импульсов, отличающихся по уровню и длительности:

$$k_1(t) = k_{1m}, 0 \leq t \leq T_1; k_2(t) = k_{2m}, t_2 \leq t \leq t_3.$$

При этом $\Delta t = t_2 - T_1$ — задержка второго импульса; $t_3 - t_2 = T_2$ — его длительность. Кроме того, предполагаем, что $k_{1m} < k_{2m}$ и $T_1 < T_2$. При расчете задержкой Δt , учитывая ее относительную малость, будем пренебрегать, условно считая, что второй импульс будет воздействовать на ИВ сразу после окончания первого импульса.

Строго говоря, взводящееся звено сначала дополнительно сместится в процессе свободного движения, а затем совершит небольшое возвратное движение под действием предохранительной пружины. Этот эффект можно косвенно учесть, считая, что если во время первой фазы звено переместится на n_b участков, то при расчете второй фазы начальное число участков принять равным $n_b - 1$, а начальное смещение взводящегося звена, соответственно, $(n_b - 1) \cdot \Delta a$.

Рассмотрим первую фазу работы ИВ, т.е. «фильтрацию» первого импульса перегрузки, в конце воздействия которого перемещение взводящегося звена должно быть меньше величины рабочего хода a (число пройденных участков прерывистого движения должно быть меньше общего их числа). Математически это условие совпадает с условием безопасности в обращении, и можно воспользоваться неравенством (5), принимая

$$\bar{a} = \frac{a}{gk_{1m}T_1^2}; \bar{k}_{\text{сн}} = \frac{k_{\text{сн}}}{k_{1m}}.$$

Получаем условие, ограничивающее сопротивление предохранительной пружины:

$$k_{\text{сн}} > k_{m1} - \frac{2a \cdot f^2(n, \kappa)}{\mu g T_1^2} \approx k_{m1} - \frac{a(1 + \sqrt{n})^2}{2\mu g T_1^2}. \quad (8)$$

Расчет процесса взведения при воздействии второго импульса более сложен, поскольку, строго говоря, необходимо учитывать предысторию, т.е. частичное перемещение взводящегося звена во время первой фазы. Возможны два варианта действий.

Упрощенный вариант расчета. Пренебрегаем первой фазой, считая, что «фильтрация» первого импульса осуществлена, а взводящееся звено вернулось в исходное положение под действием предохранительной пружины. В этом случае, второй этап взведения происходит при нулевых начальных условиях, а взведение должно гарантированно завершиться в пределах длительности второго импульса, т.е. должно быть выполнено условие: $t_b < T_2$ или $\bar{t}_b < 1$. Более жестким является ограничение $\bar{t}_b < \vartheta < 1,0$, в котором можно принять традиционное значение запаса $\vartheta = 2/3$. Обратившись к неравенству (4), перепишем его следующим образом:

$$\bar{t}_b = \bar{t}_{\text{вн}} \cdot f(n, \kappa) < \vartheta,$$

откуда получаем

$$k_{\text{сн}} < k_{m2} - \frac{2af^2(n, \kappa)}{\mu g (\vartheta T_2)^2} \approx k_{m2} - \frac{a}{2\mu g (\vartheta T_2)^2 (1 + \sqrt{n})^2}. \quad (9)$$

Таким образом, на величину $k_{\text{сн}}$ наложены два ограничения «снизу» (безопасность и «фильтрация» первого импульса), определяемые выражениями (7) и (8), и одно «сверху» (надежное взведение во второй фазе), согласно (9).

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\mu H (1 + \beta)^2}{4af^2(n, \kappa)} \\ k_{m1} - \frac{2af^2(n, \kappa)}{\mu g T_1^2} \end{array} \right\} < k_{\text{сн}} < k_{m2} - \frac{2af^2(n, \kappa)}{\mu g (\vartheta T_1)^2}. \quad (10)$$

Более жестким, очевидно, является требование безопасности, т.е. должно быть гарантированно выполнено условие

$$\frac{\mu H (1 + \beta)^2}{4af^2(n, \kappa)} > k_{m1} - \frac{2af^2(n, \kappa)}{\mu g T_1^2}$$

или

$$k_{m1} < \frac{\mu H(1+\beta)^2}{4af^2(n, \kappa)} + \frac{2af^2(n, \kappa)}{\mu gT_1^2}. \quad (11)$$

Введем обозначение

$$z = \frac{2af^2(n, \kappa)}{\mu} \quad (12)$$

и перепишем (11) в виде

$$k_{m1} < \frac{H(1+\beta)^2}{2z} + \frac{z}{gT_1^2}.$$

Правая часть неравенства имеет экстремум типа минимума. Дифференцируя ее по z и приравнявая производную к нулю получим

$$z_{\min} = \frac{V_0 T_1 (1+\beta)}{2}.$$

Соответственно

$$(k_{m1})_{\min} = \frac{V_0(1+\beta)}{gT_1} = \frac{1}{T_1} \int_0^{t_y} k(t) dt \approx k_m \frac{t_y}{T_1}.$$

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что условие $k_{m1} < (k_{m1})_{\min}$ на практике выполняется. Таким образом, согласно (10) и (11), можно записать

$$\frac{\mu H(1+\beta)^2}{4af^2(n, \kappa)} < k_{\text{сн}} < k_{m2} - \frac{2af^2(n, \kappa)}{\mu g(\vartheta T_2)^2}. \quad (13)$$

Условие совместимости требований по безопасности и надежной взводимости очевидно:

$$\frac{\mu H(1+\beta)^2}{4af^2(n, \kappa)} < k_{m2} - \frac{2af^2(n, \kappa)}{\mu g(\vartheta T_2)^2}. \quad (14)$$

Используя обозначение (12), перепишем (13) в виде

$$k_{m2} > (k_{m2})_{\min} = \frac{H(1+\beta)^2}{2z} + \frac{z}{g(\vartheta T_2)^2}.$$

Вновь приравняв к нулю производную, найдем

$$z = (\vartheta T_2)(1+\beta) \sqrt{\frac{gH}{2}} = \frac{(\vartheta T_2)(1+\beta)V_0}{2},$$

и соответственно

$$a = \frac{\mu(\vartheta T_2)(1+\beta)V_0}{4f^2(n, \kappa)} \approx \frac{\mu(\vartheta T_2)(1+\beta)V_0}{(1+\sqrt{n})^2}.$$

Таким образом, можно записать

$$k_{m2} > \frac{(1+\beta)V_0}{g(\vartheta T_2)},$$

откуда

$$\vartheta T_2 > \frac{(1+\beta)V_0}{gk_{m2}};$$

$$a > \frac{\mu(1+\beta)^2 V_0^2}{4f^2(n, \kappa) gk_{m2}} \approx \frac{2\mu(1+\beta)^2 H}{(1+\sqrt{n})^2 k_{m2}}.$$

В результате получаем соотношение, позволяющее выбрать ориентировочное число участков прерывистого движения

$$n > \left[(1+\beta) \sqrt{\frac{2\mu H}{ak_{m2}}} - 1 \right]^2.$$

Приведем иллюстративный пример. Принимая $H = 6$ м (как для морских боеприпасов); $\beta = 0,3$; $\mu = 0,2$; $k_{m2} = 10$, найдем

$$n > \left(\frac{20,0}{\sqrt{a}} - 1 \right)^2.$$

Так, при $a = 20$ мм должно быть $n > 12$. Шаг получается около 2 мм, т.е. недопустимо малым; увеличив рабочий ход до 25 мм, получим $n > 9$. Кроме того,

$$\vartheta T_2 > \frac{1,3 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 6}}{9,8 \cdot 10} = 0,14 \text{ с.}$$

Усложненный вариант расчета представляет, вообще говоря, лишь теоретический интерес, и целесообразно руководствоваться рекомендациями, относящимися к первой фазе. Это объясняется тем, что условия надежного взведения при нулевых начальных условиях более жесткие, так что их выполнение гарантирует взведение и при некотором начальном смещении исполнительного звена.

Необходимо сделать следующее замечание. Изложенная методика расчета основана на замене силовой характеристики предохранительной пружины ее средним сопротивлением R_c .

В более строгой записи уравнение движения взводящей детали (гильзы), согласно (2), будет иметь вид

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_{0n}^2 = \mu g [k(t) - k_{0n}].$$

Это уравнение необходимо интегрировать, последовательно переходя от участка к участку при следующих начальных условиях: при $t = t_{i-1}$, $x = x_{i-1} = (i-1) \cdot \Delta a$, $v = kv_{i-1}$. Для конца участка $x = x_i = i \Delta a$, $t = t_i$, $v = v_i$. Расчет ведется до момента времени t_a , когда $x = a = n \cdot \Delta a$. При строгом исследовании целесообразно сравнить результаты расчета при усредненной и кусочно-линеаризованной СХ предохранительной пружины, однако это возможно лишь при конкретных значениях параметров механизма.

Выводы

1. Рассмотрена возможность разработки энергонезависимой, т.е. чисто механической ступени предохранения ВУ для крылатой ракеты с подводным стартом. Специфической особенностью динамики подводного старта является наличие двух последовательных участков закона перегрузки.

2. В качестве ступени предохранения предлагается использовать механизм с зигзагообразным пазом, являющийся представителем дискретных систем. Сложность процедуры проектирования МЗП обусловлена тем, что необходимо «отфильтровать» импульс перегрузки при подводном движении ракеты и обеспечить надежное взведение при ее выходе на воздушную траекторию.

3. Методика расчета основана на использовании математической модели дискретных механических систем. Закон перегрузки приближенно представлен в виде последовательности

прямоугольных импульсов, отличающихся по уровню и длительности.

4. Показано, что при выборе параметров в пределах ограничивающих диапазонов МЗП способен обеспечить выполнение предъявляемых требований. При этом также должны учитываться особенности условий эксплуатации носителя, т.е. подводной лодки.

Литература

1. Faber M., Lauer S., Hüttner R. Design evolution of setback generators — based on the increased demand of energy / 59th Annual Fuze Conference. May 3–5. 2016. Charleston, Sc.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. — М.: Машиностроение. 2007. 499 с.
3. Ефремов А.К., Капустян А.В. Перспективы использования микроэлектромеханических систем во взрывателях // Боеприпасы и высокоэнергетичные конденсированные системы. 2008. № 1. С. 52–54.
4. Автономные информационные и управляющие системы. В 4 т. / Под ред. А.Б. Борзова / Ефремов А.К. Т. 4. — М.: ООО НИЦ «Инженер». ООО «Онико-М». 2011. 332 с.
5. Ефремов А.К. Инерционные предохранительные системы дискретного типа // Оборонная техника. 2002. № 11.
6. Богоряд И.Б. Введение в динамику ракет. Изд. 2-е. — Томск: Изд-во ГТУ. 2013. 136 с.
7. Широкопад А.Б. Огненный меч российского флота. — М.: Яуза. Эксмо. 2004. 416 с.
8. Ефремов Г.А. Крылатые ракеты — национальное оружие России: предпосылки (<http://submarine.sten.lv/history/b62.shtml>).
9. Инженерные методы исследования ударных процессов. Изд. 2-е / Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. — М.: Машиностроение. 1977. 240 с.