электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Исследование погрешности наведения управляемого снаряда на перемещающуюся цель

Илюхин И.М., Серякова Ю.В.
УДК.629.7.05(083)

МГТУ имени Н.Э. Баумана
sva_msk@mail.ru

Введение

Основным показателем качества и эффективности системы наведения **управляемого реактивного снаряда** (УРС) на быстро перемещающуюся цель является значение ожидаемой погрешности или промаха снаряда на конечном этапе его сближения с целью. Значение этой погрешности зависит от многих факторов, основными из которых считают:

- влияние на работу системы управления снаряда всякого рода внешних и внутренних случайных воздействий;
- используемый алгоритм управления или метод наведения УРС на цель, который определяет вид траектории его сближения с целью;
- параметры, определяющие начальное положение цели относительно снаряда в момент его запуска, а также значение их скоростей и возможности по выполнению манёвров.

Влияние случайных воздействий на процесс управления всегда приводит к возникновению неустранимой погрешности наведения снаряда, называемой его техническим рассеянием. Эта погрешность в первую очередь определяется пороговым углом рассогласования датчика сигнала управления, степенью его пространственной стабилизации от случайных колебаний снаряда вокруг своего центра масс, а также быстродействием исполнительных органов системы управления снаряда. Как показывает практика эксплуатации УРС техническое рассеяние снарядов в зависимости от их массы, а также типа датчика рассогласования и исполнительных

органов системы управления может составлять значение порядка γ = 2-3 мрад [1]. Так как любой датчик рассогласования при достижении снарядом некоторой минимальной дальности l_m до цели прекращает формирование сигналов управления, то неустранимая погрешность наведения снаряда на цель вследствие его технического рассеяния – **технический промах** определяется как $\Delta_T = l_m \cdot \gamma$.

Оптические датчики рассогласования – **оптические головки самонаведения** (ОГС) в зависимости от эффективных размеров цели $a_ц$, фокусного расстояния $f_{ОБ}$ объектива и размера анализатора изображения $D_{АИ}$ (они формируют угловое поле ОГС) прекращают работу вследствие своего «ослепления» (изображение цели становится равным $D_{АИ}$) на дальностях порядка $l_m = f_{ОБ} \times a_ц / D_{АИ} \approx (300 \div 500)$ метров. Тогда ожидаемый технический промах при наведении УРС на цель пространственно стабилизированной ОГС составит величину порядка:

$\Delta_T = (300 \div 500) \times (2 \div 3) \times 10^{-3} = \pm(0.6 \ldots 1.5)$ метра.

Такое значение технического промаха УРС считают допустимым при атаке цели с эффективным размером не менее чем $a_ц \geq 2\Delta_T$, т.е. даже при нанесении точечных ударов. Для получения более точной оценки значения технического рассеяния необходимо проведение специальных исследований работы системы наведения УРС. Задача эта реализуема только при наличии конкретных сведений о динамических характеристиках всех функциональных блоков системы управления снаряда [2]. По этой причине подобные исследования в настоящей работе не предусмотрены.

Метод наведения УРС на цель определяют способом установки ОГС на снаряде и информативностью сигнала, формируемого датчиком рассогласования. От этого зависит как соответствующее схемотехническое исполнение ОГС, так и степень кривизны траектории сближения снаряда с целью, а также возможность возникновения специфических (обусловленных особенностями реализуемого метода) погрешностей наведения снаряда.

Степень кривизны траектории сближения, реализуемая системой наведения УРС, в свою очередь зависит от начального положения цели относительно снаряда в момент его запуска (курсового угла цели q_0 и дальности до неё l_0), соотношения их скоростей (понятно, что скорость снаряда V_C должна быть всегда больше скорости цели V_Z) и возможностей по совершению маневров (изменению вектора их скорости). Следует помнить, что способность к выполнению маневров всегда ограничена значением допустимой перегрузки n_g объекта управления.

В предлагаемой работе реализуется:

- математическое моделирование динамики процесса сближения УРС с целью;
- исследование влияния начальных параметров пуска снаряда, а также соотношения скоростей цели и снаряда на значение промаха, обусловленного возникающими перегрузками УРС, применительно к трем чаще всего используемым методам его наведения.

1 Методы прямого наведения и параллельного сближения

Простейший для реализации метод прямого наведения УРС, когда ОГС неподвижна, а её оптическая ось параллельна продольной оси снаряда, при атаке быстро перемещающейся цели кроме всего прочего всегда сопряжен с возникновением дополнительной (методической) погрешности наведения. Она обусловлена появлением угла атаки α_A между продольной осью УРС (следовательно, и осью ОГС) и вектором его скорости. Этот угол возникает только при движении снаряда по криволинейной траектории и необходим для создания управляющей силы на его воздушных рулях. Вследствие этого УРС летит в некоторую точку пространства, которая отстаёт от цели на расстояние, зависящее от текущей дальности и угла атаки. Угол атаки при существенной кривизне траектории сближения снаряда может достигать 1-2 градусов, что приведет к методической погрешности наведения как минимум порядка 4-10 метров. Поэтому этот метод наведения используют только при стрельбе прямой наводкой по неподвижным или мало подвижным целям, когда траектория движения УРС близка к прямолинейной, а угол его атаки стремится к нулю.

Метод параллельного сближения является разновидностью метода наведения с постоянным углом упреждения и всегда реализуется на конечном этапе сближения снаряда с целью при использовании наиболее совершенного метода пропорционального наведения. Вследствие этого два выше указанных метода наведения УРС в настоящей работе не исследуются.

2 Исследование возможностей системы наведения УРС по методу погони

При реализации метода погони после пуска снаряда ОГС с помощью простейшего флюгерного устройства набегающим воздушным потоком так разворачивается относительно его корпуса, чтобы оптическая ось головки самонаведения совпадала с вектором скорости УРС. При атаке перемещающейся цели пропорционально непрерывно возникающему углу рассогласования ОГС формирует сигнал управления. По его команде исполнительные органы системы управления поворачивают воздушные рули, обеспечивая такой разворот снаряда, при котором рассогласование стремится к нулю. Благодаря этому вектор V_C непрерывно направляется на цель по направлению её линии визирования и тем самым устраняется негативное влияние угла атаки на процесс наведения снаряда.

Траектория атаки УРС не маневрирующей воздушной цели (V_Z = const) с задней её полусферы по методу погони в виде их пошаговых перемещений с временным интервалом $\Delta t = 200/V_Z$ представлена на рис. 1. По мере сближения УРС с целью кривизна траектории его движения увеличивается (радиус кривизны r_i уменьшается), что вызывает увеличение

действующей на снаряд инерциальной силы и перегрузок, вычисляемых по формуле (1):

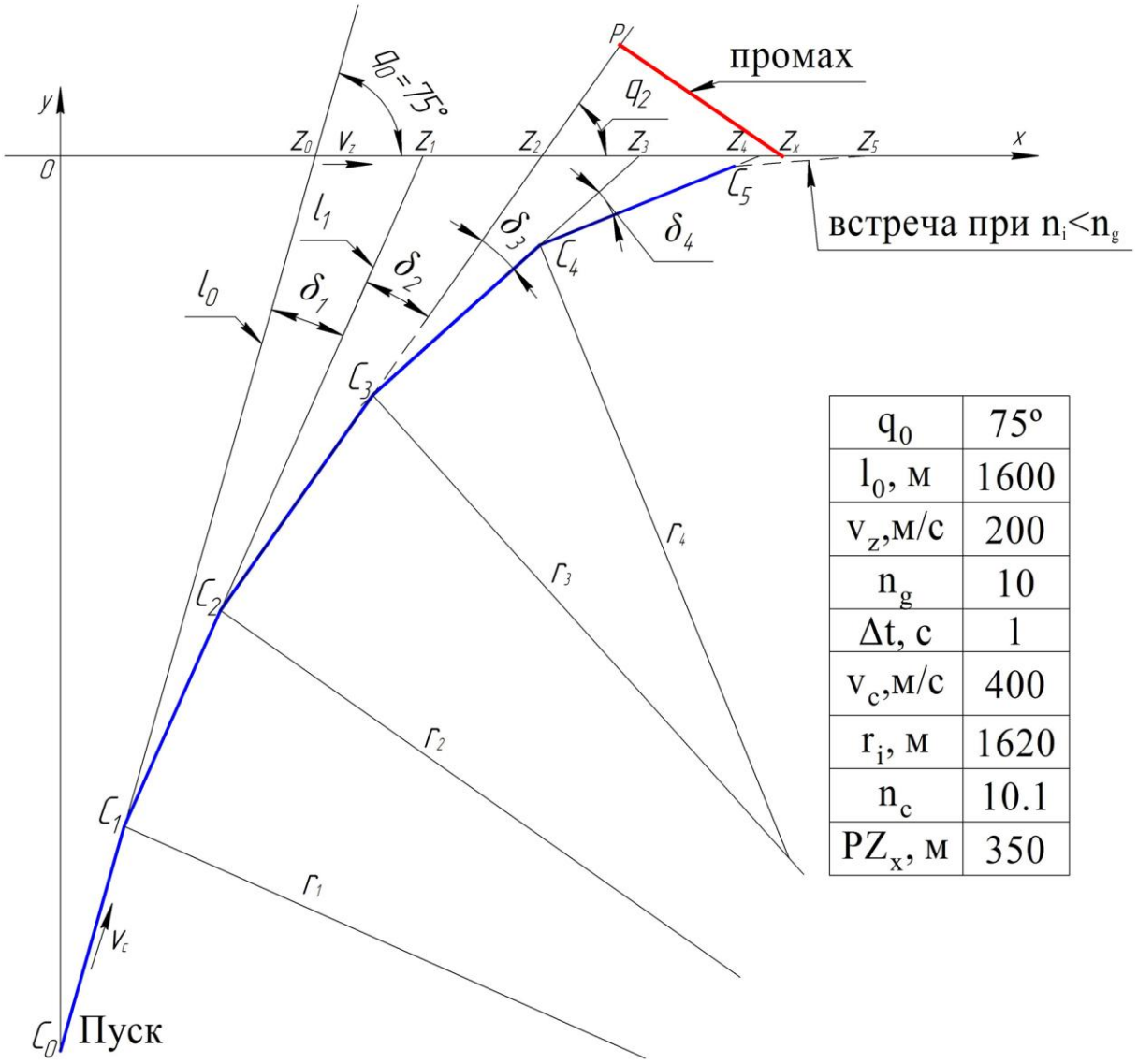
$$n_i = \frac{V_C^2}{(g \times r_i)}, \quad (1)$$

где g = 9.81, м/с^2 − ускорение силы тяжести.

В некоторый момент времени с момента пуска УРС t_i, фактическая перегрузка снаряда n_i превысит её предельно допустимое значение n_g. Это приведет к срыву снаряда с траектории его наведения, так как инерциальная сила станет больше управляющей, и он начнет перемещаться уже прямолинейно (точка C_3 на рис. 1). Согласно рис. 1 за время пролета снарядом расстояния C_3Z_2 цель переместится из точки Z_2 в некоторую точку Z_X. Фактический промах снаряда определим по формуле (2):

$$\Delta_\varphi = PZ_X = Z_2Z_X \times \sin q_2 = (l_{i-1} - V_C\Delta t) \times V_Z \sin q_{i-1} / V_C, \quad (2)$$

где l_{i-1} и q_{i-1} − дальность до цели и её курсовой угол в момент нахождения снаряда в точке, предшествующей моменту его срыва с траектории наведения (на рис. 1 это точка C_2).



q_0	75°
l_0, м	1600
v_z,м/с	200
n_g	10
Δt, с	1
v_c,м/с	400
r_i, м	1620
n_c	10.1
PZ_x, м	350

Рис. 1 − Траектория атаки цели УРС по методу погони в виде их пошаговых перемещений с временным интервалом $\Delta t = 200/V_C$.

На основе рис. 1 с учетом выбранных параметров V_C, V_Z, l_0, q_0 получают аналитические выражения для последовательного пошагового расчета текущих значений параметров траектории сближения снаряда с целью: угла δ_i разворота УРС, курсового угла q_i и дальности l_i до цели, радиуса r_i кривизны траектории и действующей на снаряд перегрузки n_i. Алгоритм расчета этих параметров прилагается ниже.

Так как атака цели со стороны её передней полусферы ($q_0 \geq \pi/2$) почти всегда приведет к срыву УРС с траектории его наведения, то исследования целесообразно проводить, например, в следующей последовательности.

Ясно, что чем короче временной интервал Δt, тем точнее будут все расчеты и их графическая иллюстрация. Так как процесс управления УРС всегда прекращается на дальности

«ослепления» его ОГС, то целесообразно выбирать $\Delta t \le l_0 / V_C = 200 / V_C$, при этом число шагов при выполнении расчетов и графических построений будет не более $k = l_0 / 200$.

Понятно также, что если цель, обнаружив атакующий её УРС, совершит маневр по увеличению своей скорости, то это неизбежно приведёт к увеличению кривизны его траектории и действующих на него перегрузок. В результате снаряд еще раньше сорвется с траектории наведения, что увеличит значение его промаха. Влияние скоростного маневра на процесс наведения УРС проиллюстрируем ниже на примере метода его наведения с постоянным углом упреждения.

Графические построения при $q_0 \le 90^o$ выполняют в следующей последовательности:

- при построении графика сближения УРС с целью на оси OX последовательно откладывают отрезки $Z_0Z_1 = V_Z\,\Delta t = Z_1Z_2 = Z_2Z_3 = ...$ и так далее;
- под углом q_0 к оси OX проводят отрезок длиной $Z_0C_0 = l_0$ и от точки C_0 откладывают отрезок $C_0C_1 = V_C\Delta t$;
- через точки C_1 и Z_1 проводят прямую и вдоль неё от точки C_1 откладывают отрезок $C_1C_2 = V_C\Delta t$ и так далее;
- из точки C_i, в которой либо перегрузка снаряда становится больше её допустимого значения, или $C_iZ_i \le V_C\Delta t$, проводят прямую C_iZ_i и от точки Z_i откладывают отрезок $Z_iZ_X = C_iZ_i \times V_Z/V_C$;
- наконец, из точки Z_X на прямую C_iZ_i опускают перпендикуляр, пересекающийся с ней в точке P. Отрезок PZ_X и будет промахом снаряда.

Расчеты выполняют в следующей последовательности:

- определяют значение угла $\angle Z_0C_1Z_1 = \delta_1 = arctg\left[(V_Z\Delta t \sin q_0) / (l_0 - V_C\Delta t + V_Z\Delta t \cos q_0)\right]$;
- находят затем курсовой угол $q_1 = q_0 - \delta_1$ и дальность до цели $l_1 = C_1Z_1 = (l_0 - V_C\Delta t)\sin q_0 / \sin q_1$;
- определяют радиус кривизны траектории сближения $r_1 = V_C\Delta t / \sin\delta_1$ и перегрузку снаряда $n_1 = V_C^2 / r_1$ в точке C_1. Если $n_1 \le n_g$, то расчет продолжают до тех пор, пока в некоторой точке i перегрузка снаряда $n_i \ge n_g$, или текущая дальность до цели $l_i \le V_C\Delta t$;
- наконец, определяют значение промаха снаряда как $PZ_X = (l_{i-1} V_C\Delta t)V_Z \sin q_{i-1} / V_C$.

3 Исследование метода наведения с постоянным углом упреждения

Для наведения УРС на перемещающуюся, но не маневрирующую цель предпочтительно использовать метод наведения с постоянным углом упреждения. Для его реализации необходимо ещё до запуска снаряда рассчитать значение угла упреждения по формуле (3):

$$\phi_0 = \arcsin\left(\frac{V_Z \times \sin q_0}{V_C}\right), \quad (3)$$

и развернуть на этот угол ОГС относительно продольной оси УРС. Затем разворотом пусковой установки направить оптическую ось ОГС на цель так, чтобы продольная ось снаряда (вектор его скорости) был направлен в предполагаемую (упрежденную) точку встречи снаряда с целью. После чего осуществляют запуск снаряда. При правильном определении угла φ_0 и соответствующем развороте ОГС перед стартом УРС траектория его сближения с не маневрирующей прямолинейно перемещающейся целью тоже будет прямолинейной, а промах снаряда будет определяться только его техническим рассеянием.

На рис. 2 представлена траектория сближения УРС, запущенного в точке C_0 под углом упреждения $\varphi_0 = \arcsin(V_{Z0} \times \sin q_0 / V_C) = 30^\circ$ к линии визирования C_0Z_0. При сохранении начальной скорости цели $V_{Z0} = 150$ *м/с* снаряд встретился бы с ней в упреждённой точке A_y. Однако в точке Z_2 цель совершает маневр по резкому увеличению своей скорости с ускорением $g_Z = 100$ *м/с*^{2} (с перегрузкой более десяти), и в точке Z_3 её скорость становится равной $V_{Z3} = 250$ *м/с*. Далее она движется уже с этой постоянной скоростью. Система наведения уже в точке C_2 заставит УРС начать разворот вслед за ускоряющейся целью так, что между линиями визирования C_2Z_2 и C_3Z_3 в точке C_3 образуется угол δ_3. При дальнейшем движении снаряда текущая линия визирования (оптическая ось ОГС) будет непрерывно направляться на перемещающуюся цель, а вектор его скорости будет составлять с ней угол φ_0. В результате снаряд начнет перемещаться по криволинейной траектории до тех пор, пока непрерывно уменьшающийся курсовой угол цели не станет равным его новому значению $q_i = \arcsin(V_C \times \sin \varphi_0 / V_{Z3})$. Затем УРС вновь начнет перемещаться прямолинейно, обеспечив попадание в цель с техническим промахом. Понятно, что такой благоприятный сценарий сближения будет реализован только в том случае, если на криволинейном участке своей траектории снаряд не сорвется с режима управления из-за недопустимо больших перегрузок.

Рассмотренный вариант маневра управляемой цели (например, пилотируемый летательный аппарат), когда она резко увеличивает свою скорость (включается кратковременный форсажный режим работы двигателей), наиболее просто реализуется и приводит к промаху, зависящему от приращения скорости цели. Маневр, связанный с одновременным изменением скорости цели как по величине, так и по направлению чреват возникновением ёще больших перегрузок и трудно реализуем.

Аналитический расчет процесса сближения УРС с целью после совершения ею скоростного маневра затруднителен, но может быть проиллюстрирован графически путем построения последовательности сопряженных отрезков, определяющих текущее положение цели, снаряда и линии визирования. При этом текущий вектор скорости снаряда должен составлять с линией визирования неизменный угол упреждения φ_0. Точка на графике движения снаряда, в которой имеет место наибольший «излом» между векторами его скорости, может быть точкой

срыва УРС с траектории наведения. На рис. 2 ею является точка C_5, в которой радиус кривизны траектории сближения снаряда $r_5 \approx 810\,м$, а его перегрузка $n_5 \approx 10.3$ больше допустимого её значения $n_g \approx 10$. В результате снаряд полетит по прямой C_5M, а цель за время C_5M / V_C переместится на отрезок Z_5Z_X. Тогда промах снаряда PZ_X составит согласно масштабу рис. 2 величину порядка 150 м.

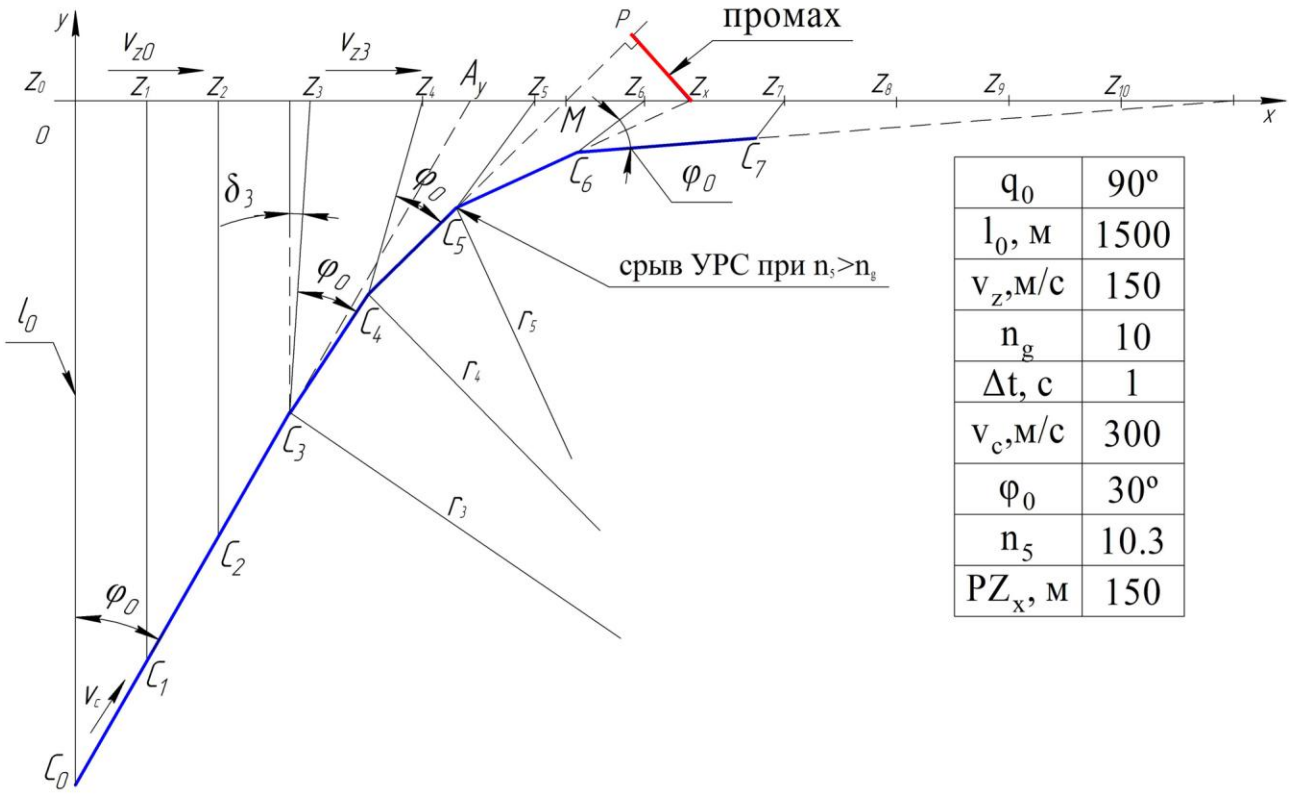


Рис. 2 − Траектория атаки цели УРС, запущенного в точке C_0 под углом упреждения $\varphi_0 = 30^\circ$ к линии визирования C_0Z_0.

Алгоритм построения графика сближения УРС с целью согласно рис. 2 следующий:

- по оси OX последовательно откладывают отрезки $Z_0Z_1 = Z_1Z_2 = V_{Z0}\,\Delta t$, $Z_2Z_3 = V_{Z0}\Delta t + g_Z\Delta t^2$, $Z_3Z_4 = V_{Z3}\Delta t = (V_{Z0} + g_Z\Delta t)\times\Delta t = Z_4Z_5 = Z_5Z_6 = \ldots$ и так далее;
- под углом q_0 к оси OX проводят отрезок C_0Z_0 длиной l_0 и из точки C_0 последовательно откладывают отрезки $C_0C_1 = V_C\Delta t = C_1C_2 = C_2C_3 = \ldots$;
- через точки C_3 и Z_3 проводят прямую и от неё под углом $\varphi_0 = \arcsin(V_{Z0}\times\sin q_0 / V_C)$ проводят отрезок $C_3C_4 = V_C\Delta t$;
- проводят отрезок C_4Z_4 и от него под углом φ_0 строят отрезок $C_4C_5 = V_C\Delta t$ и так далее, пока очередной отрезок C_iC_{i+1} не пересечется с осью OX, которая является гипотетической точкой встречи с целью; фактически, снаряд уже в точке C_5 или C_6 сорвется с траектории наведения и

начнет перемещаться прямолинейно, пройдя мимо цели с некоторым промахом;

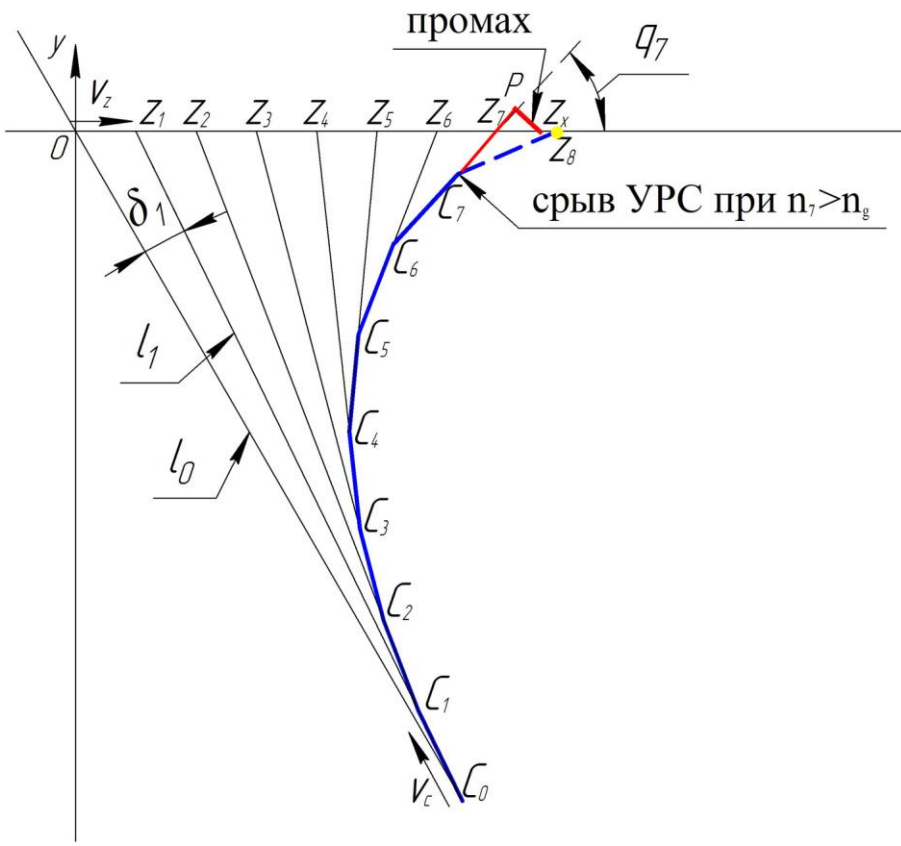
- для демонстрации значения промаха из точки C_i, в которой наблюдается наибольший «излом» между отрезками C_iC_{i+1}, проводят отрезок C_iM как продолжение отрезка C_iC_{i+1} и от точки Z_i откладывают отрезок $Z_iZ_X = C_iM \times V_{Z3} / V_C$; затем из точки Z_X опускают перпендикуляр на продолжение отрезка C_iM до получения точки P; отрезок PZ_X и будет значением ожидаемого промаха УРС в предположении, что в точке C_i его перегрузка превышала допустимое значение.

В порядке исследований можно варьировать значениями g_Z, l_0 и q_0, а также отношением (V_C/V_Z), но так, чтобы $V_{Z3} < V_C$.

Недостатком рассмотренного метода наведения является необходимость точного определения значений V_Z и q_Z в момент запуска снаряда, расчет угла упреждения и соответствующий разворот ОГС, а затем и УРС на этот угол, а также неизбежное искривление траектории движения снаряда в случае выполнения целью маневра по скорости. Исключить эти недостатки может лишь метод пропорционального наведения.

4 Метод пропорционального наведения УРС

При реализации метода пропорционального наведения УРС линия визирования ОГС с помощью специального привода (лучше всего − гироскопического) непрерывно следит за перемещающейся целью. Благодаря этому ОГС формирует сигнал управления, пропорциональный текущей угловой скорости цели Ω_Z, а система управления разворачивает УРС с угловой скоростью $\Omega_C = K_\Omega \Omega_Z$, где K_Ω − коэффициент пропорциональности, чаще всего принимаемый равным двум. При таком законе управления вектор скорости снаряда непрерывно направляется в текущую упрежденную точку встречи с целью, так как угол её упреждения φ_i изменяется пропорционально изменению Ω_{Zi}. Поэтому снаряд даже при атаке со стороны передней полусферы может встретиться с целью с погрешностью не более технического рассеяния, если будут выполняться условия: $\Omega_Z \leq \Omega_{Cmax}$, а перегрузка снаряда не превышает её допустимое значение. Эти условия будут реализованы лишь при некотором благоприятном сочетании начальных значений l_0 и q_0, при которых снаряд в процессе своего разворота успевает выйти на атаку цели со стороны её задней полусферы.



q_0	120°
l_0, м	2500
v_z,м/с	150
n_g	12
Δt, с	1
v_c/v_z	2
r_7, м	620
n_7	15
PZ_x, м	90

Рис. 3 − Траектория сближения УРС с целью согласно методу пропорционального наведения.

Траектория сближения УРС с равномерно и прямолинейно перемещающейся целью согласно методу пропорционального наведения представлена на рис. 3, когда снаряд запускается на встречном курсе с $q_0 = 120°$. Его «встреча» с целью произойдет в районе точки Z_8, если $C_7Z_7 \geq V_C\Delta t$ и $n_7 \leq n_g$. Если же снаряд из-за недопустимых перегрузок или «ослепления» ОГС сорвется с траектории наведения уже в точке C_7, то за время пролета им отрезка пути C_7M цель пройдет путь Z_7Z_X и промах УРС PZ_X составит примерно 90 метров. При срыве снаряда в точке Z_6 его промах стал бы равен отрезку Z_6Z_X.

С помощью машинного моделирования мы показали, что с увеличением значения q_0 или при уменьшении l_0 вероятность срыва управления и промах снаряда будут возрастать.

Задача анализа возможностей метода пропорционального наведения сводится к последовательному расчету и построению графиков сближения УРС с целью, а также оценке возникающего при этом промаха при различных комбинациях начальных параметров q_0 и l_0. Это позволит определить их разрешенные значения, при которых перегрузка снаряда не будет превышать её допустимое значение.

Расчет и графические построения при произвольном значении параметра q_0 могут быть выполнены в следующей последовательности, желательно, при $\Delta t \leq 200/V_C$.

При построении графика сближения УРС с целью на оси OX последовательно откладывают отрезки $Z_0Z_1 = V_Z\,\Delta t = Z_1Z_2 = Z_2Z_3 = \ldots$ и так далее. Затем под углом q_0 к оси OX проводят отрезок длиной $Z_0C_0 = l_0$; через точки C_0 и Z_1 проводят прямую и вдоль неё от точки C_0 откладывают отрезок $C_0C_1 = V_C\Delta t$. Через точки C_1 и Z_2 проводят прямую и вдоль неё от точки C_1 откладывают отрезок $C_1C_2 = V_C\Delta t$. Из точки C_i, в которой либо перегрузка снаряда становится больше её допустимого значения, или $C_iZ_i \le V_C\Delta t$, проводят прямую C_iZ_i и от точки Z_i откладывают отрезок $Z_iZ_X = C_iZ_i \times V_Z/V_C$. Наконец, из точки Z_X на прямую C_iZ_i опускают перпендикуляр, пересекающийся с ней в точке P. Отрезок PZ_X − промах снаряда.

Расчеты выполняют в следующей последовательности:

- определяют значение угла $\angle Z_0C_0Z_1 = \delta_1 = arctg\left[V_Z\Delta t\sin(\pi - q_o)/(l_0 - V_Z\Delta t\cos(\pi - q_0))\right]$;
- курсовой угол $q_1 = q_0 - \delta_1$ и дальность до цели $C_1Z_1 = l_1 = l_0\sin(\pi - q_0)/\sin q_1 - V_C\Delta t$;
- радиус кривизны траектории сближения $r_1 = V_C\Delta t / \sin\delta_1$;
- перегрузку снаряда $n_1 = V_C^2 / r_1$ в точке C_1. Если $n_1 \le n_g$, то расчет продолжают до тех пор, пока в некоторой точке i перегрузка снаряда $n_i \ge n_g$, или текущая дальность до цели $l_i \le V_C\Delta t$;
- наконец, определяют значение промаха снаряда как $PZ_X = l_i \times V_Z\sin q_i / V_C$.

5 Компьютерное моделирование методов наведение УРС на цель

Для визуализации методов наведения УРС на цель и проведения расчетно-графических построений была составлена программа, блок схема которой приведена на рис. 4.

Программа реализует графическое построение траекторий сближения УРС с целью согласно трем методам его наведения, рассчитывает время атаки цели, приводит результаты расчета промаха при срыве снаряда с траектории его движения. Это позволяет определить разрешенные начальные параметры движения УРС применительно к допустимым его перегрузкам.

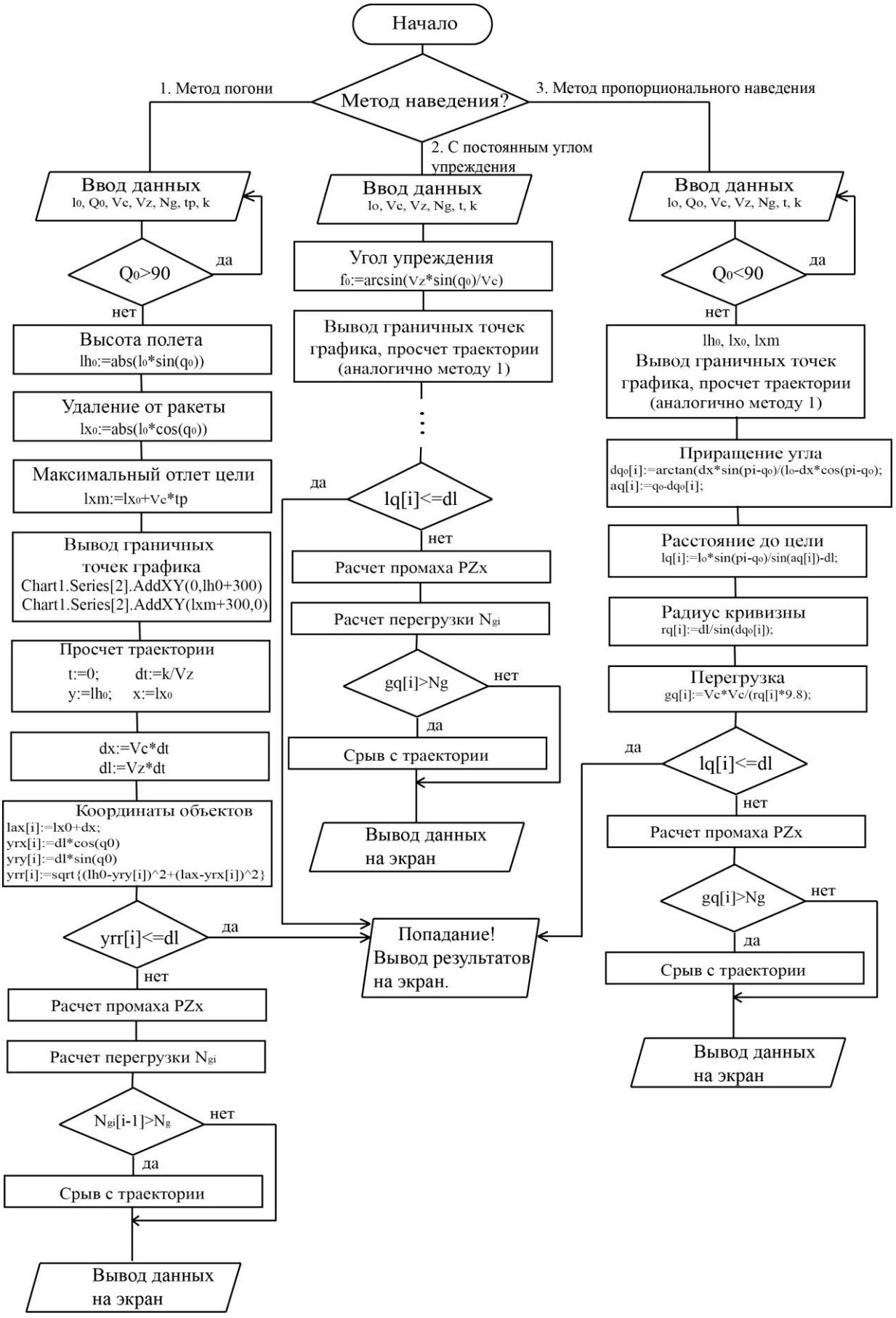


Рис. 4 − Обобщенная схема алгоритма программы наведения УРС на цель

Заключение

Проведенные в работе исследования позволяют утверждать, что:

- независимо от используемого метода управления недопустимая погрешность наведения (промах снаряда) может возникнуть лишь вследствие больших перегрузок, действующих на снаряд при его движении по криволинейной траектории;
- степень кривизны траектории, действующие на снаряд перегрузки и, как следствие, промах возрастают с увеличением отношения (V_C/V_Z) и начального курсового угла цели q_0, а также с уменьшением начальной дальности пуска УРС l_0 и при атаке маневрирующей цели;
- при равных начальных условиях наибольшую кривизну траектории сближения с целью снаряд будет иметь в случае использования системы управления по методу погони, а наименьшую – по методу пропорционального наведения;
- только метод пропорционального наведения может обеспечить при благоприятных условиях запуска снаряда успешную атаку даже маневрирующей цели со стороны её передней полусферы;
- точностные преимущества одного метода наведения перед другим обеспечивают за счет использования более совершенного аппаратного средства (ОГС), которое благодаря особенностям своего схемотехнического исполнения и более совершенного алгоритма формирования сигнала управления (по углу рассогласования или угловой скорости) существенно уменьшает динамическую погрешность системы наведения снаряда.

Литература:

1. Кринецкий Е.И. Системы самонаведения. М.: Машиностроение, 1970. -236 с.
2. Локк А.С. Управление снарядами. Гостехиздат, 1957. -775 с.

Reference

1. Krinetskiy E. I. Launching systems. M.: Mechanical engineering, 1970. -236 p.
2. Lokk A. S. Локк А.С. Shells control. State Technical Press, 1957. -775 p.