

**И.А. Попов****СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АВТОПИЛОТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ САМОЛЕТА-АМФИБИИ БЕ-200 ВО ВРЕМЯ ЗАБОРА ВОДЫ**

*Статья посвящена решению проблемы управления самолетом-амфибией Бе-200 при заборе воды в режиме глиссирования. Указанный режим полета самолета-амфибии (СА) относится к одному из самых напряженных для пилотирования. Управление самолетом в режиме глиссирования требует от летчика высочайшей концентрации, поскольку гидродинамические характеристики уменьшаются, но растут аэродинамические, из-за чего появляются ситуации, при которых СА становится неуправляемым. Для обеспечения безопасной эксплуатации СА во время забора воды, а также обеспечения установившегося взлета, летчик вынужден постоянно выдерживать определенное значение скорости, угла дифферента, а также тяги двигателей путем перебора ручки управления двигателем (РУД). В этой связи, представляется весьма целесообразным использование технических средств автопилота, обеспечивающего контроль скорости, тяги двигателя и угла дифферента для обеспечения устойчивости движения СА во время забора воды. В работе рассматривается проблема синтеза автопилота для управления движением самолета-амфибии во время забора воды, и при этом решаются следующие задачи: синтез автопилота для управления продольным движением самолета-амфибии, а также управлением посадкой на воду с последующим забором воды и взлетом с воды. Приведено обоснование выбора математической модели движения самолета на воде. Представлена процедура синергетического синтеза регулятора автопилота самолета-амфибии в режиме забора воды. Новизна проводимого исследования заключается не только в рассмотрении устойчивого движения самолета-амфибии во время его эксплуатации на водной поверхности, а также и в моделировании самого процесса забора воды на глиссировании, что является более комплексной задачей с точки зрения синтеза. В результате были получены законы управления для автопилота, обеспечивающие устойчивое движение самолета-амфибии при снижении по глиссаде, посадке на воду, заборе воды и последующем взлете с демпфированием продольных колебаний по углу дифферента на всем цикле водозабора.*

*Самолет-амфибия; Бе-200; режим глиссирования; скольжение по воде; забор воды; синергетический синтез; автопилот; демпфирование колебаний.*

**I.A. Popov****SYNERGETIC SYNTHESIS OF AN AUTOPILOT TO CONTROL THE BE-200 AMPHIBIAN AIRCRAFT DURING WATER INTAKE**

*The article is devoted to solving the problem of controlling the Be-200 amphibious aircraft when taking water in the gliding mode. The specified mode of flight of an amphibious aircraft (AA) is one of the most intense for piloting. Controlling an aircraft in gliding mode requires the highest concentration from the pilot, since the hydrodynamic characteristics decrease, but the aerodynamic ones increase, which causes situations in which the SA becomes uncontrollable. To ensure the safe operation of the AA during water intake, as well as to ensure a steady takeoff, the pilot is forced to constantly maintain a certain value of speed, trim angle, and engine thrust by moving the engine control stick (ECS). In this regard, it seems very appropriate to use the technical means of the autopilot, which provides control of the speed, engine thrust and trim angle to ensure the stability of the movement of the SA during the intake of water. The article deals with the problem of synthesizing an autopilot to control the movement of an amphibian aircraft during water intake, and at the same time the following tasks are solved: the synthesis of an autopilot to control the longitudinal movement of an amphibian aircraft, as well as control landing on water, followed by water intake and takeoff from the water. The substantiation of the choice of a mathematical model of the movement of an aircraft on water is given. A procedure for the synergistic synthesis of the autopilot controller of an amphibious aircraft in the water intake mode presented. The novelty of the ongoing research lies not only in considering the stable movement of an amphibious aircraft during its operation on the water surface, but also in modeling the process of water*

*intake in planning mode, which is a more complex task from the point of view of synthesis. As a result, the control laws for the autopilot obtained, which ensure the stable movement of the amphibious aircraft when descending along the glide path, landing on water, taking in water and subsequent takeoff with damping of longitudinal oscillations along the trim angle throughout the entire water intake cycle.*

*Amphibious aircraft; Be-200; gliding mode; water gliding; water intake; synergetic synthesis; autopilot; oscillations damping.*

**Введение.** Одним из характерных режимов полета любого самолета-амфибии (СА) является режим глиссирования – режим движения, при котором самолет удерживается на воде за счет его скоростного напора (скольжения). Данный режим движения возникает благодаря специальной форме корпуса, а также из-за большой скорости движения лодки. При коэффициенте числа Фруда  $F_r > 3$  гидродинамическая сила становится основной силой поддержания объекта на воде, происходит всплывание судна на определенный угол дифферента  $\varphi$ . В результате общая масса лодки практически полностью уравнивается гидродинамической подъемной силой.

При скольжении самолета по воде и смачиваемая поверхность корпуса гидросамолёта, и возмущение воды, вызванное движением гидросамолёта, существенно меньше, чем при «нормальном» плавании с той же скоростью. Соответственно, уменьшаются и затраты энергии на преодоление сопротивления воды движению летательного аппарата. Подъемная сила гидросамолёта, позволяющая реализовать режим глиссирования, является суммой аэродинамической подъемной силы крыла и динамической реакции воды. Для этого днище гидросамолёта выполняется с реданом и скулами. Такая форма днища способствует срыву струй на режиме глиссирования, вследствие чего уменьшаются смачиваемая поверхность корпуса и сила трения о воду [1].

В настоящей статье представлено решение задачи синергетического синтеза автопилота для управления СА в режиме забора воды и учитывающая специфику движения на границе сред.

**Особенности режима глиссирования.** Ключевая особенность режима глиссирования СА – существование граничных значений углов дифферента, выход за которые влечет за собой возникновение продольных колебаний даже на спокойной воде, что создает существенные проблемы управления самолетом-амфибией, особенно на высоких скоростях глиссирования [2]. В проектировании гидросамолетов устанавливаются границы устойчивости движения СА по воде, выход за которые означает потерю устойчивости (рис. 1).

Наиболее эффективное глиссирование лодки достигается при наличии редана – ступеньки на днище, которая служит для отрыва потока от днища и уменьшения смачиваемой поверхности лодки, что, в свою очередь, ведет к уменьшению гидродинамического сопротивления.

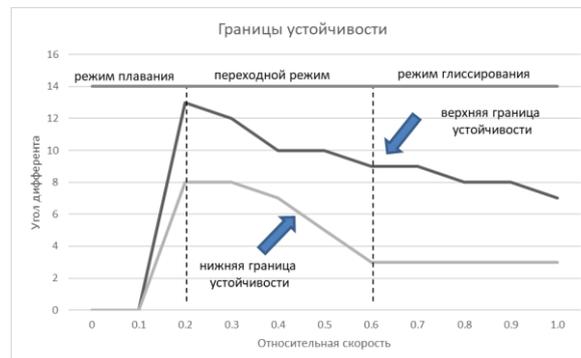


Рис. 1. Границы устойчивости самолета-амфибии

При изучении особенностей режима глиссирования также важно знать, что возникающие колебания по углу дифферента (продольные угловые колебания в вертикальной плоскости) также способствуют появлению наибольших вертикальных перемещений (колебаний) центра тяжести гидросамолета, что является главной причиной потери путевой устойчивости.

Процесс разбега СА не всегда может окончиться успешным взлетом, т.к. в целом ряде случаев сопротивление воды оказывается столь значительным, что максимальная тяга СА, вполне достаточная для его полета в воздухе, не может способствовать самолета в достижении скорости отрыва с водной поверхности [3].

**Гидродинамика глиссирующего судна.** При движении гидросамолёта на воде вся смоченная поверхность его лодки и поплавков подвергается силовому воздействию со стороны воды. Находясь в движении и противодействуя возникающим силам, гидросамолёт расходует свою энергию, которая передается воде. Эта энергия остаётся в ней в виде энергии движения, превращающейся в тепло и со временем затухающей. Со стороны воды на корпус лодки действуют сила гидродинамического подталкивания и сила сопротивления движению глиссирования на воде.

Взаимодействие вязких свойств воды и воздуха приводит к возникновению аэро- и гидродинамических сил и моментов, постоянно действующих на гидросамолет. Отличие движения тела в воздухе от движения в воде с точки зрения физики является только количественным, эти физические процессы подобны. Как правило, различаются только коэффициенты жидкости и газа (плотность, вязкость и т.д.) [4].

В соответствии с законами аэро- и гидродинамики, действующими в процессе разбега, несущие поверхности по мере увеличения скорости движения гидросамолета начинают нести все больший вес, помогая этим самым гидростатическим силам, действующим на днище лодки, выталкивать самолет из воды. И в тот момент, когда гидросамолет приобретает скорость, при которой подъемная сила крыльев становится равна весу, происходит отрыв самолета с воды [5].

Описание физических явлений, возникающих при глиссировании, является достаточно сложной задачей, поскольку картина изменения и распределения скоростей и давлений обтекающего лодку потока значительно затрудняет разработку законов, наиболее адекватно и достоверно описывающие явление глиссирования на высоких скоростях.

При переходе в режим глиссирования происходит резкое снижение волнообразования вокруг корпуса, за счет чего уменьшается общее сопротивление. При движении в режиме глиссирования из-за увеличения скорости движения судна общее сопротивление судна возрастает прямо пропорционально увеличению сопротивления трения [6]. Скачки сопротивления особенно заметны на реданных суднах.

Одной из важных особенностей режима глиссирования является появление существенных нагрузок на корпус лодки самолета-амфибии, что является результатом ударного (динамического) взаимодействия с водой, что особенно сильно проявляется при волновых возмущениях.

Образование брызговых струй, волн и сильных перепадов давления сильно влияют на определение движения массы возмущенной воды вокруг глиссирующего судна, что, в свою очередь, влияет на возникновение наибольших продольных колебаний гидросамолета по углу дифферента (продольные угловые колебания в вертикальной плоскости).

Основными проблемами при исследовании явления глиссирования твёрдых тел по поверхности жидкости заключается в определении гидродинамических сил, действующих на тело, а также в решении проблемы удара об воду твердого тела.

**Ключевые особенности забора воды СА.** Самым оптимальным режимом для забора воды является режим глиссирования. Это обусловлено несколькими факторами [7]:

- ◆ высокий диапазон скоростей, из-за чего самолет после набора воды сразу может взлететь;
- ◆ интенсивный рост аэродинамических характеристик (по сравнению с режимом плавания и переходным режимом), что позволит легко компенсировать вес набранной воды увеличивающейся подъемной силой крыла;
- ◆ незначительное влияние гидростатических характеристик (практически нет осадки, нагрузки на воду от веса самолета, брызгообразования и заливания надводных частей);
- ◆ суммарное (аэродинамическое+гидродинамическое) сопротивление самолета на высоких скоростях меньше, чем на низких из-за физического процесса изменения сил, действующих на самолет.

Однако, из-за динамики движения самолета по воде на больших скоростях, возникают свои проблемы, требующие внимания, а именно:

- ◆ большой разброс значений скорости самолета из-за худших (по сравнению с сухой взлетно-посадочной полосой (ВПП)) возможностью визуального контроля высоты (проблема посадки на воду, удар об воду твердого тела);
- ◆ при заборе воды, чтобы избежать преждевременного взлета, пилот постоянно регулирует скорость, перебирая РУДы «по состоянию», что требует повышенной концентрации только из-за контроля скорости. Из-за инерционности самолета это регулирование скорости не может быть точным, поэтому сильно повышается вероятность «провалов» скорости, что, в результате, может повлиять как на величину дистанции забора воды, так и на возможность выполнения правильного взлета с воды в соответствии с разработанной методикой.

Скорость при заборе воды должна выдерживаться автоматически, при этом разрабатываемая автоматика должна управлять как положением водозаборного устройства (ВЗУ), так и тягой двигателя.

Набор воды на глиссировании должен выполняться таким образом, чтобы не превысить максимально допустимый вес самолета. В системе набора воды на самолете Бе-200 предусмотрены 3 варианта количества забираемой воды: 6т, 9т и 12т. Пилот, при заходе на посадку, зная остаток топлива и посадочный вес самолета, устанавливает возможное количество воды из условия не превышения максимального взлетного веса самолета  $G_{max}$ :

$$G_{max\_vzl} = G_{pos} + G_{vod} \leq G_{max}, \quad (1)$$

где  $G_{pos}$  – вес самолета при посадке,

$G_{vod}$  – количество забираемой воды,

$G_{max}$  – максимальный взлетный вес (у Бе-200 максимальный взлетный вес  $G_{max} = 43т$ ) [8].

**Математическая модель СА во время забора воды.** Наиболее сложной задачей при разработке математической модели движения самолета-амфибии в режиме глиссирования является нахождение коэффициентов гидродинамических сил и моментов, действующих на объект.

В данной работе рассматривалось только продольное движение СА. При построении математической модели считается, что углы крена и рыскания СА пренебрежимо малы, а соответствующие им угловые скорости и ускорения равны нулю [9]. Тогда полученная в итоге система уравнений динамики СА имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\vartheta - \theta) + \frac{qS}{m} (c_x \cos(\vartheta - \theta) - c_y \sin(\vartheta - \theta)) - c_W, \\
 \dot{\theta} &= -\frac{g}{V} \cos \theta + \frac{P}{mV} \sin(\vartheta - \theta) + \frac{qS}{mV} (c_x \sin(\vartheta - \theta) + c_y \cos(\vartheta - \theta)) + c_B, \\
 \dot{\omega}_z &= \frac{qSb_A}{J_z} (m_z - m_{z_h}) \\
 \dot{x} &= V \cos \theta, \\
 \dot{H} &= V \sin \theta, \\
 \dot{\vartheta} &= \omega_z,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $V$  – скорость движения самолета;

$\theta$  – угол наклона траектории;

$\omega_z$  – угловая скорость;

$x$  – перемещение;

$H$  – высота;

$\vartheta$  – угол тангажа.

Гидродинамические характеристики самолета определены по данным буксировочных испытаний моделей самолета Бе-200 в гидроканале ЦАГИ [10]. При помощи теории подобия был сделан пересчет полученных характеристик с модельных значений на натурные, после чего получены безразмерные коэффициенты гидродинамических сил и гидродинамического продольного момента [11, 12].

Выражения для вычисления гидродинамических сил  $c_W$  и  $c_B$ , а также гидродинамического продольного момента  $m_{z_h}$  можно записать следующим образом [13]:

$$c_W = \frac{W}{\rho V^2 B^2}, \tag{3}$$

где  $c_W$  – коэффициент полного гидродинамического сопротивления,

$W$  – полное гидродинамическое сопротивление (с учетом сопротивления воды и сопротивления ВЗУ),

$\rho$  – плотность воды ( $\approx 998 \text{ кг/м}^3$ ),

$B$  – ширина лодки (смачиваемой поверхности самолета).

$$c_B = \frac{A}{\rho V^2 B^2}, \tag{4}$$

где  $c_B$  – коэффициент гидродинамической нагрузки на воду,

$A$  – гидродинамическая подъемная сила,

$$m_{z_h} = \frac{M_z}{\Delta B}, \tag{5}$$

где  $m_{z_h}$  – коэффициент гидродинамического продольного момента,

$M_z$  – продольный гидродинамический момент,

$\Delta$  – нагрузка на воду,

**Синтез автопилота для управления продольным движением СА.** Одной из наиболее востребованных задач автоматического управления СА является задача синтеза систем управления взлетом и посадкой на водную поверхность. Ключевой особенностью для решения этой задачи является разработка синтезированных законов управления, обеспечивающих балансировку самолета при взлете и посадке [14], а также учитывающих влияние внешней среды, т.е. адекватное изменение аэро- и гидродинамических характеристик [15].

Для разработки законов управления в работе используется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (метод АКАР), основанный на синергетической теории управления [16–18].

При решении задачи управления СА на взлете и посадке рассматривается только продольное движение самолета. Математическая модель движения самолета, дополненная выражениями аэро- и гидродинамических сил, и момента уже была упомянута ранее (2). Управление продольным движением СА достигается путем отклонения органов управления: РУДов и руля высоты [19]. Соответственно, в модели продольного движения СА будет только 2 управляющих воздействия: изменение силы тяги двигателей  $P$ , зависящей от отклонения РУДов, и суммарный продольный момент  $m_z$ , зависящий от угла стабилизатора высоты, который выставляется путем отклонения руля высоты.

Согласно методу АКАР, введем первую совокупность макропеременных, которые будут обеспечивать установившееся продольное движение в определенном интервале времени с заданной скоростью и высотой:

$$\psi_1 = V - V_0. \quad (6)$$

$$\psi_2 = \sin \theta - \varphi_1. \quad (7)$$

В итоге, на пересечении инвариантных многообразий при  $\psi_i = 0, i = 1, 2$  происходит динамическая декомпозиция (сжатие фазового пространства), и динамика рассматриваемой системы будет описываться следующей декомпозированной моделью:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_z &= \frac{qSb_A}{J_z}(m_z - m_{z_h}) \\ \dot{x} &= V_0 \cos \theta \\ \dot{H} &= V_0 \varphi_1, \\ \dot{\vartheta} &= \omega_z. \end{aligned} \quad (8)$$

Следующим шагом введем еще одну макропеременную, которая будет обеспечивать стабилизацию движения гидросамолета на заданной высоте  $H_0$ :

$$\psi_3 = H - H_0. \quad (9)$$

В результате, закон управления движением самолета-амфибии ищется из решения системы функциональных уравнений АКАР:

$$T_1 \frac{d\psi_1}{dt} + \psi_1 = 0, \quad (10)$$

$$T_2 \frac{d\psi_2}{dt} + \psi_2 = 0. \quad (11)$$

$$T_3 \frac{d\psi_3}{dt} + \psi_3 = 0. \quad (12)$$

В итоге путем решения функциональных уравнений и уравнений модели была получена совокупность внешних управлений, обеспечивающих желаемые параметры движения СА.

**Особенности процедуры синтеза при посадке на воду и последующего забора воды.** Задача синергетического синтеза автопилота для посадки на воду аналогична задаче управления продольным движением на воде за исключением требований, рекомендованных к совершению посадки на воду в соответствии с РЛЭ самолета [8].

Задача управления самолетом в режиме посадки на воду заключается в приведении самолета на воду с необходимой скоростью  $V$  и выдержанным углом тангажа  $\vartheta$ , в результате чего возникающие продольные колебания вследствие удара самолета об воду будут минимальными.

Вводимые макропеременные будут идентичными (6) и (7), а декомпозированная модель, очевидно, будет такой же (8) за исключением гидродинамической составляющей от продольного момента:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_z &= \frac{qSb_A}{J_z} m_z \\ \dot{x} &= V_0 \cos \theta \\ \dot{H} &= V_0 \varphi_1, \\ \dot{\vartheta} &= \omega_z.\end{aligned}\quad (13)$$

Управление продольным движением самолета во время забора воды имеет свои особенности по сравнению с обычным продольным движением СА. При заборе воды в модели необходимо учитывать изменение массы самолета, а значит и изменение гидродинамического сопротивления. Данная зависимость учитывается добавлением расчетных формул изменения гидродинамического сопротивления, а также возрастанием скорости СА посредством увеличения тяги двигателя при его переходе на взлетный режим.

Также необходимо учитывать изменение гидродинамического сопротивления от выпуска ВЗУ, которое рассчитывается по формуле:

Управление продольным движением самолета во время забора воды имеет свои особенности по сравнению с обычным продольным движением СА. При заборе воды в модели необходимо учитывать изменение массы самолета, а значит и изменение сопротивления. Данная зависимость учитывается добавлением расчетных формул изменения гидродинамического сопротивления, а также возрастанием скорости СА посредством увеличения тяги двигателя при его переходе на взлетный режим.

Также необходимо учитывать изменение гидродинамического сопротивления от выпуска ВЗУ, которое рассчитывается по формуле:

$$W_{zab} = 0.93 * S_{zab} * \rho_{zab} * V^2, \quad (14)$$

где  $S_{zab}$  – площадь ВЗУ,

$\rho_{zab}$  – плотность воды при прохождении через водозаборный тракт,

$V$  – скорость СА (с учетом потерь при заборе воды).

В результате измененный коэффициент гидродинамического сопротивления будет выглядеть следующим образом:

$$C_W = \frac{W_{full}}{\rho V^2 B^2}, \quad (15)$$

где  $W_{full} = W_{zab} + W_{vod} + W_m$  – полное гидродинамическое сопротивление с учетом сопротивления ВЗУ ( $W_{zab}$ ), сопротивления воды ( $W_{vod}$ ) и изменения сопротивления самого СА из-за увеличения его массы ( $W_m$ ).

**Результаты моделирования.** Процедура синергетического синтеза модели продольного движения проводилась в Maple. Полученные законы управления в дальнейшем применялись для математического моделирования в пакете Matlab, а также для дальнейшего построения графиков функций. Результаты моделирования замкнутой системы представлены на рис. 2-5. Моделировалась снижение по глис-

саде, посадка на воду, забор воды и последующий взлет самолета. При моделировании процесса забора воды имитировалось линейное по времени возрастание массы СА. Взлет после забора осуществлялся путем изменения уставки автопилота по высоте при достижении массы СА установленного значения.

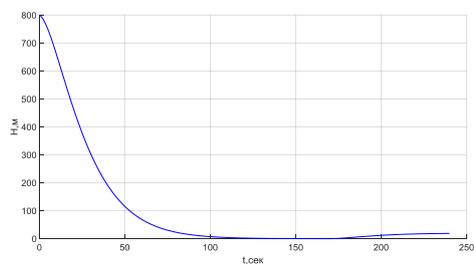


Рис. 2. График изменения высоты  $H$

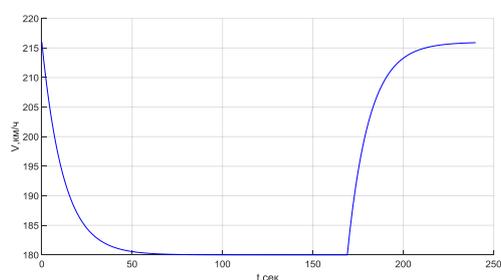


Рис. 3. График изменения скорости  $V$

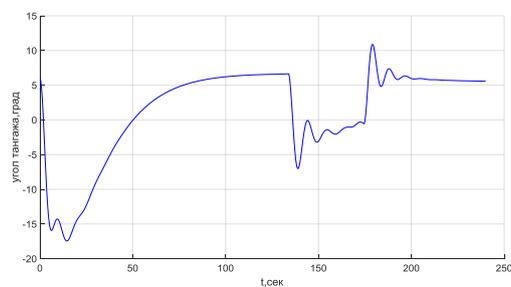


Рис. 4. График изменения угла тангажа (дифферента)  $\vartheta$  ( $\varphi$ )

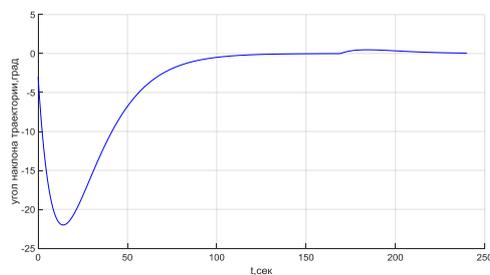


Рис. 5. График изменения угла наклона траектории  $\theta$

**Заключение.** Полученные результаты демонстрируют выполнение автопилотом поставленных задач, синтезированный регулятор обеспечивает асимптотическую устойчивость в рассматриваемом режиме движения СА. Значение угла дифферента стабилизируется на  $\varphi = 6^\circ$ . Это показывает, что он не выходит за верхнюю или нижнюю границы гидродинамической устойчивости при установившемся глиссировании, что соответствует РЛЭ самолета Бе-200 [8, 0]. График изменения скорости  $V$  также соответствует приведенному в РЛЭ диапазону скоростей забора воды на глиссировании и отрыва с водной поверхности ( $V = 180 \div 210$  км/ч). Полученные результаты показывают, что автопилот выдерживает необходимые значения скорости  $V$  и угла дифферента  $\varphi$  без вмешательства летчика, а также со временем полностью демпфирует продольные колебания, что обеспечивает установившееся устойчивое движение во всем эксплуатационном диапазоне. Это позволяет сделать вывод, что результаты моделирования полностью обеспечивают выполнение поставленных в данной работе задач. Использование математической модели в траекторной системе координат, в отличие от связанной и полусвязанной, которые применялись в работах [3, 12, 15, 21] показало хорошую сходимость с результатами уже существующих исследований.

Однако, несмотря на то, что регулятор полностью выполняет задачу обеспечения устойчивости движения самолета, при его синтезе он не учитывает изменение массы самолета при заборе воды на режиме глиссирования. Предполагается, что при учете в автопилоте изменения массы самолета, колебания по углу дифферента при движении самолета на воде, а, в частности, при посадке на воду, будут существенно демпфированы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авиация: Энциклопедия / гл. ред. Г.П. Свищев. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 736 с.
2. Косоуров К.Ф. Теоретические основы гидроавиации. – М.: Воениздат, 1961.
3. Кобзев В.А., Колесников А.А., Неуен Ф. Проблемы управления взлетом гидросамолетов в условиях действия возмущений внешней среды // Сб. докладов VIII Научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2008». – М.: Изд. ЦАГИ, 2008.
4. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами: учебник. – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.
5. Волков Г.В. Основы гидроавиации. – М.: Воениздат, 1940.
6. Лотов А.В. Глиссирование и быстрый вход тел в воду. – М.: Изд-во МФТИ, 1984.
7. Дурицын Ю.Г., Анастасов В.К., Самохин В.В., Сафронов П.В. Основы гидромеханики гидросамолета. – Таганрог: ИП Ашихмина О.С., 2016. – 362 с.
8. Самолёт-амфибия Бе-200ЧС. Руководство по лётной эксплуатации. Кн. 1 «Лётное руководство». А201.0000.000 РЛЭ-1.
9. Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 2005.
10. Дурицын Ю.Г., Дурицын Д.Ю. Гидродинамические испытания моделей гидросамолетов. – Таганрог: ИП Ашихмина О.С., 2015. – 283 с.
11. Эпштейн Л.А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов. – Л.: Судостроение, 1970.
12. Банников Ю.М., Лукашевский В.А., Лукьянов С.С. Математическая модель движения гидросамолета на волнении // Сб. докладов I Научной конференции по гидроавиации «Геленджик-96». – М.: Изд. ЦАГИ, 1996.
13. Справочник авиаконструктора. Т. II. Гидромеханика гидросамолета. – М.: Изд-во ЦАГИ, 1938.
14. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полётом. – М.: Наука: Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1987.
15. Колесников А.А. Новые нелинейные методы управления полетом. – М.: Физматлит, 2013. - 193 с.

16. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. ФЦ «Интеграция». Ч. II. – М.: Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
17. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
18. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: КомКнига, 2006.
19. Попов А.Н. Математические модели летательных аппаратов: учеб. пособие. – Таганрог: Изд. ТТИ ЮФУ, 2008.
20. Бондарец А.Я. Система автоматического управления углом хода самолёта-амфибии при движении по воде на режиме глиссирования // Сб. докладов V научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон – 2004». – М.: Изд-во ЦАГИ, 2004.
21. Никитин А.И. Реализация математической модели пространственного движения самолёта-амфибии Бе-200 в среде MATLAB/Simulink // Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности: Статьи и материалы конференции. – М.: ОАО «ОКБ Сухого», 2005. – С. 80-84.

## REFERENCES

1. Aviatsiya: Entsiklopediya [Aviation: Encyclopedia], chief ed. G.P. Svishchev. Moscow: Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya, 1994, 736 p.
2. Kosourov K.F. Teoreticheskie osnovy gidroaviatsii [Theoretical basics of hydroaviation]. Moscow: Voenizdat, 1961.
3. Kobzev V.A., Kolesnikov A.A., Nguen F. Problemy upravleniya vzletom gidrosamoletov v usloviyakh deistviya vozmushcheniy vneshney sredy [Problems of seaplane takeoff control under the influence of environmental disturbances], *Sb. докладов VIII Nauchoy konferentsii po gidroaviatsii «Gidroaviasalon-2008»* [Collection of reports of the VIII scientific conference on hydroaviation «Hydroaviasalon-2008»]. Moscow: Izd. CAGI, 2008.
4. Lukomskiy V.A., Chugunov V.S. Sistemy upravleniya morskimi podvizhnimi ob'ektami: uchebnyk [Control systems for marine mobile objects: tutorial]. Leningrad: Sudostroenie, 1988, 272 p.
5. Volkov G.V. Osnovy gidroaviatsii [Basics of hydroaviation]. Moscow: Voenizdat, 1940.
6. Lotov A.V. Glissirovanie i bystryy vkhod tel v vodu [Water gliding and rapid entry of bodies into the water]. Moscow: Izd. MFTI, 1984.
7. Dyritsin Y.G., Anastasov V.K., Samokhin V.V., Safronov P.V. Osnovy gidromekhaniki gidrosamoleta [Basics of seaplane hydromechanics]. Taganrog: IP Ashikhmina O.S., 2016, 362 p.
8. Samolet-amfibiya BE-200ChS. Rukovodstvo po letnoy ekspluatatsii [Flight manual]. Book 1 «Letnoe rukovodstvo». A201.0000.000 RLE-1.
9. Ostoslavskiy I.V., Strazheva I.V. Dinamika poleta. Traektorii letatelnykh apparatov [Flight dynamics. Aircraft trajectories]. Moscow: Mashinostroenie, 2005.
10. Dyritsin Y.G., Dyritsin D.Y. Gidrodinamicheskie ispytaniya modeley gidrosamoletov [Hydrodynamic testing of seaplane models]. Taganrog: IP Ashikhmina O.S., 2015, 283 p.
11. Epstein L.A. Metody teorii razmernostey i podobiya v zadachakh gidromekhaniki sudov [Methods of the theory of dimensions and similarity in problems of hydromechanics of ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1970.
12. Bannikov Y.M., Lukashevskiy V.A., Luk'yanov S.S. Matematicheskaya model' dvizheniya gidrosamoleta na volnenii [Mathematical model of seaplane motion in waves], *Sb. докладов I Nauchoi konferentsii po gidroaviatsii «Gelendzhik-96»* [Collection of reports of the I scientific conference on hydroaviation «Gelendzhik-96»]. Moscow: Izd. TsAGI, 1996.
13. Spravochnik aviakonstruktora. T. II. Gidromekhanika gidrosamoleta [Aircraft constructor's handbook. Vol. II. Seaplane hydromechanics]. Moscow: Izd. TsAGI, 1938.
14. Bukov V.N. Adaptivnye prognoziruyschie sistemy upravleniya poletom [Adaptive predictive flight control systems]. Moscow: Nauka: Gl. red. Fiz.-mat. lit., 1987.
15. Kolesnikov A.A. Novye nelineynye metody upravleniya poletom [New non-linear flight control methods]. Moscow: Fizmatlit, 2013, 193 p.
16. Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya: Sinergeticheskiy podkhod v teorii upravleniya [Modern applied control theory: Synergetic approach in control theory], ed. by A.A. Kolesnikova. FTs «Integratsiya». Part II. Moscow: Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000.

17. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1994.
18. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza [Synergetic methods for complex systems control: the theory of system synthesis]. Moscow: KomKniga, 2006.
19. *Popov A.N.* Matematicheskie modeli letatel'nykh apparatov: ucheb. posobie [Mathematical models of aircraft. Tutorial]. Taganrog.: Izd-vo TTI SFEDU, 2008.
20. *Bondarets A.J.* Sistema avtomaticheskogo upravleniya uglom khoda samoleta-amfibii pri dvizhenii po vode na rezhime glissirovaniya [The system of automatic control of the angle of the amphibious aircraft when moving through the water in the gliding mode], Sb. dokladov V Nauchoi konferentsii po gidroaviatsii «Gidroaviasalon-2004» [Collection of reports of the I scientific conference on hydroaviation «Gidroaviasalon-2004»]. Moscow: Izd. TsAGI, 2004.
21. *Nikitin A.I.* Realizatsiya matematicheskoy modeli prostranstvennogo dvizheniya samoleta-amfibii Be-200 v srede MATLAB/Simulink [Implementation of a mathematical model of the spatial motion of the Be-200 amphibious aircraft in MATLAB/Simulink], *Issledovaniya i perspektivnye razrabotki v aviatsionnoy promyshlennosti: Stat'i i materialy konferentsii* [«Research and advanced developments in the aviation industry»: Articles and conference materials]. Moscow: OAO «OKB Suhogo», 2005, pp. 80-84.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

**Попов Иван Андреевич** – Южный федеральный университет; e-mail: ivpopov@sfedu.ru; тел.: +79515014168; кафедра синергетики и процессов управления им. профессора А.А. Колесникова; аспирант.

**Popov Ivan Andreevich** – Southern Federal University; e-mail: ivpopov@sfedu.ru; phone: +79515014168; the department of synergetics and control processes named after professor A.A. Kolesnikov; graduate student.

УДК 551.594

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-171-181

**Г.В. Куповых, А.Г. Клово, Д.В. Тимошенко, Т.В. Кудринская, О.В. Белоусова**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РЕДУКЦИИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ**

*Исследуется проблема интерпретации данных атмосферно-электрических наблюдений, проводимые регулярно на сети наземных станций, являющихся составной частью общего мониторинга состояния атмосферы. Для решения общей задачи мониторинга - получение режимных данных об электрическом поле атмосферы и выявление трендов его изменений требуется проведения сравнительного анализа данных измерений в различных пунктах наблюдений. Напряжённость электрического поля (градиент потенциала) обычно измеряется на некоторой высоте от поверхности земли с использованием различных способов (геометрии) установки датчиков вблизи поверхности земли. Получаемые значения электрического поля могут сильно отличаться от эталонных, под которыми понимаются измерения на плоской поверхности в условиях равнины. В работе исследуется структура атмосферного электрического поля вблизи плоского электрода со сферической неоднородностью. Для совместного анализа данных различных пунктов наблюдений обычно производится их унификация путем введения коэффициента редукции: отношение значений напряжённости электрического поля в геометрически искажённых условиях к его эталонному значению на равнине. Показано, что значения коэффициента редукции сильно зависят не только от геометрии установки датчиков, но и от значений измеряемого электрического поля. Для корректного расчета коэффициента редукции электрического поля предложено использовать одновременно геометрический коэффициент искажения электрического поля и коэффициент, учитывающий влияние электродного эффекта вблизи поверхности земли. Выполнены расчеты значений коэффициента редукции в окрестностях сферической неоднородности поверхности электрода для случаев классического и турбулентного элек-*