

УДК 629.7.05

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПО ГЛИССАДЕ ПРИ СДВИГАХ ВЕТРА В РЕЖИМЕ ЗАХОДА НА ПОСАДКУ

Сусанна Вагинаковна ХЛГАТЯН, к. т. н.,

Людмила Андреевна ВОЛОДИНА

ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики»

E-mail: inbox@aomiea.ru

В статье рассмотрена проблема повышения точности движения самолета по глиссаде в условиях аномальных продольных сдвигов ветра вблизи поверхности земли, которые ухудшают стабилизацию приборной скорости, вызывая резкое падение скорости, что является небезопасным на конечном участке захода на посадку. Для решения этой задачи проведено исследование контура управления тягой двигателя в условиях идентифицированного на борту сдвига ветра.

***Ключевые слова:** аномальный сдвиг продольного ветра, путевая скорость, истинная скорость, заданная приборная скорость, поправка к приборной скорости.*

IMPROVING THE ACCURACY OF AIRCRAFT MOTION ALONG THE GLIDE PATH UNDER WIND SHEAR CONDITIONS DURING APPROACH

Susanna V. KHLGATIAN, PhD in Engineering,

Liudmila A. VOLODINA

Moscow Institute of Electromechanics and Automatics' PJSC

E-mail: inbox@aomiea.ru

The article considers the problem of improving the accuracy of aircraft motion along the glide path under conditions of abnormal longitudinal wind shear near the ground, which impairs the instrument speed stabilization, causing a sharp drop in speed, which is unsafe in the final approach leg. A study of the engine thrust control loop under conditions of wind shear, detected on board was carried out for solving the problem.

***Keywords:** abnormal longitudinal wind shear, ground speed, true airspeed, selected indicated air speed, indicated air speed correction.*

На характеристики режима захода на посадку большое влияние оказывает движение воздушных масс в приземном слое атмосферы. Особенно опасными являются резкие изменения направления и скорости ветра, так называемые сдвиги ветра, вызывающие недопустимые отклонения самолета от заданной траектории полета.

При действии аномального (встречно-попутного) продольного сдвига ветра, профиль которого представлен на рис. 1, наблюдается резкое падение приборной скорости и ухудшение качества стабилизации глиссады по точности управления.

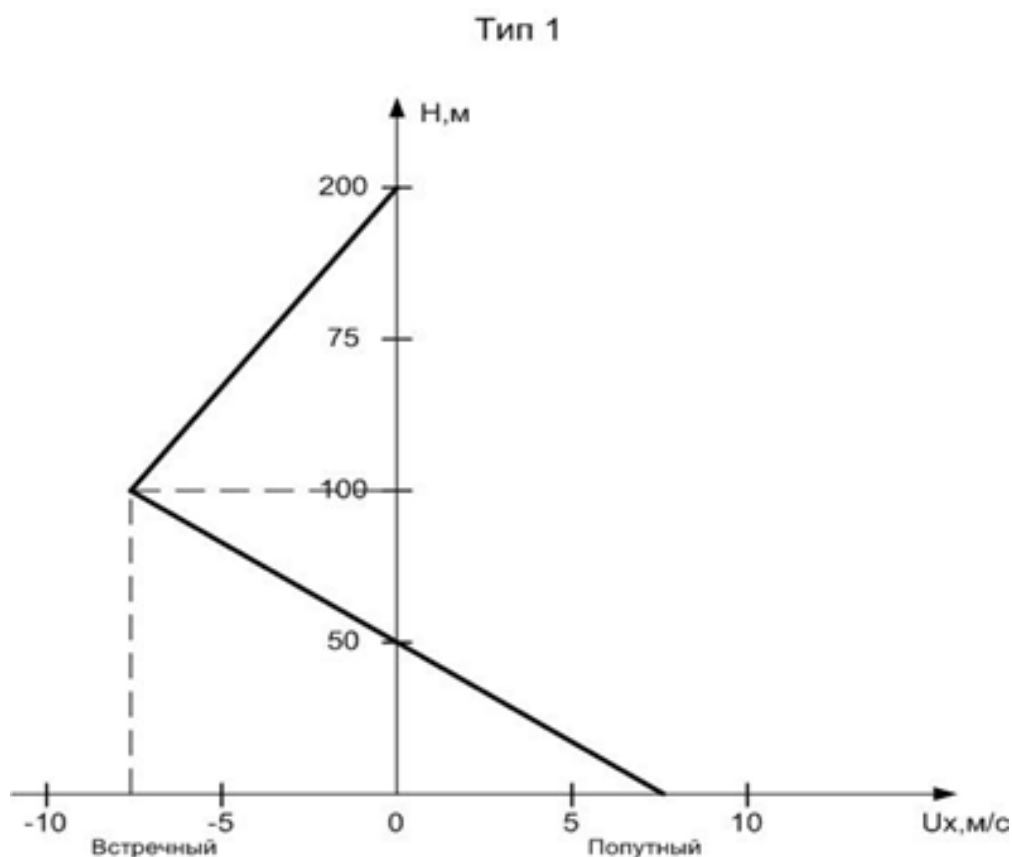


Рис. 1. Профиль аномального сдвига продольного ветра

Проведенное исследование показало, что при идентификации на борту сдвига ветра возможно устранить этот недостаток за счет корректировок управления тягой двигателей, согласно [5]. Эти корректировки заключаются, во-первых, в формировании заданной приборной скорости на глиссаде $V_{зад}^{ПУ}$, устанавливаемой на ПУ летчиком, с учетом дополнительного поправочного сигнала, и, во-вторых, в формировании заданного значения РУДов ($\alpha_{РУД_{зад}}$).

В закон управления в канале тяги предлагается внести поправку к пультной скорости $V_{зад}^{ПУ}$, равную разнице истинной скорости ($V_{ист}$) и путевой скорости ($V_{пут}$) с некоторым коэффициентом $K_{зад} = 0,5$, выбранным по результатам моделирования: $\Delta V_{зад\text{корр}} = 0,5(V_{ист} - V_{пут})$. Величина поправки $\Delta V_{зад\text{корр}}$ ограничивается значением 10 км/ч.

Таким образом, значение заданной скорости в контуре управления искусственно повышается (без изменения значения заданной скорости на пульте).

Поправка $\Delta V_{зад\text{корр}}$ вводится только при наличии встречного ветра, пока ветер не изменил свое направление на попутный и скорость не начала уменьшаться. При попутном ветре поправка отсутствует.

Для исключения влияния данной поправки при действии обычного градиентного встречного ветра ее введение производится только при превышении текущей приборной скоростью $V_{пр}$ заданного значения $V_{зад}^{ПУ}$, на 2 км/ч.

Таким образом, поправка $\Delta V_{зад\text{корр}}$ формируется при выполнении одновременно следующих условий:

- 1) При стабилизации на глиссаде, высота ниже 200 м ($H < 200$ м),
- и 2) $(V_{ист} - V_{пут}) > 0$ — встречная составляющая ветра,
- и 3) $(V_{пр} - V_{зад}^{ПУ}) > 2$ км/ч.

Окончательное условие для введения поправки выглядит следующим образом:

$$(H < 200) \wedge ((V_{ист} - V_{пут}) > 0) \wedge ((V_{пр} - V_{зад}^{ПУ}) > 2). \quad (1)$$

В противном случае поправка $V_{зад}^{ПУ}$ отсутствует.

Математическое моделирование в условиях встречно-попутного сдвига ветра показало, что для самолета с максимальным посадочным весом при условии коррекции, описанной выше, падение текущей приборной скорости относительно заданной скорости с пульта управления $V_{зад}^{ПУ}$ все-таки превышает 10 км/ч, поэтому для уменьшения падения скорости предлагается в автомате тяги ввести еще коррекцию непосредственно сигнала $\alpha_{руд}^{зад}$.

Аномальные и сильные сдвиги продольного ветра характеризуются своей интенсивностью, то есть большей скоростью изменения, чем обыкновенные градиентные ветры.

Предлагается определять интенсивность продольного ветра (\dot{W}_{xp}) следующим образом:

$$\dot{W}_{xp} = \frac{p}{p+1} W_{xp} [\text{м/с}^2]; \text{ н. у. } \dot{W}_{xp}(0) = 0; W_{xp}(0) = W_{xp}^{\text{тек}}; \quad (2)$$

$W_{xp} = (V_{пут} - V_{ист})/3,6$ — аналог продольной составляющей ветра (W_{xg}) в м/с,

где $V_{пут}$ — путевая скорость в км/ч с БИНС,

$V_{пр}$ — приборная скорость в км/ч с СВС.

По результатам моделирования определена допустимая интенсивность встречно-попутного сдвига продольного ветра, что составляет: $(\dot{W}_{xp}) \approx +0,4$ м/с², поэтому наличие интенсивного или аномального (встречно-попутного) ветра идентифицируется по условию: $\dot{W}_{xp} \geq 0,4$ м/с².

Предлагается при обнаружении ветра с интенсивностью $\dot{W}_{xp} \geq 0,4$ м/с² скачком в сигнал $\alpha_{руд}^{зад}$ добавлять корректировку $\tilde{\alpha}_{руд}^{доп}$, величина которой зависит от эквивалента веса самолета, т. е. заданной приборной скорости на «Посадке» ($V_{зад}^{ПУ}$) и соответственно равна:

$$\tilde{\alpha}_{руд}^{доп} = \begin{cases} 5^\circ, V_{зад}^{ПУ} = 237 \text{ км/ч } (G = 140 \text{ т}) \\ 7^\circ, V_{зад}^{ПУ} = 253 \text{ км/ч } (G = 170 \text{ т}) \\ 10^\circ, V_{зад}^{ПУ} = 289 \text{ км/ч } (G = 220 \text{ т}) \end{cases}, \quad (3)$$

с интерполяцией между узлами.

Таким образом, заданное значение РУДов с учетом дополнительного сигнала будет формироваться следующим образом:

$$\alpha_{руд}^{зад} = \tilde{\alpha}_{руд}^{зад} + \tilde{\alpha}_{руд}^{доп},$$

а при отказе двигателя:

$$\alpha_{руд}^{зад} = \tilde{\alpha}_{руд}^{зад} + 10 \cdot (ОД_1 \vee ОД_2 \vee ОД_3 \vee ОД_4) + \tilde{\alpha}_{руд}^{доп}.$$

Предлагаемые корректировки обоснованы математическим моделированием, результаты которого представлены в таблице 1 (стр. 40) и на графиках.

В целом, после внесенных корректировок в алгоритмы канала тяги наблюдается улучшение качества управления по точности следования по глиссаде, что представлено на графиках сравнения (вар. 1, 2), демонстрирующих уменьшение отклонения от глиссады.

Поскольку поправка заданной скорости формируются только при наличии встречной составляющей ветра, необходимо убедиться, что внесенные корректировки не ухудшили характеристики захода на посадку.

Таблица 1.

Угол наклона глissады $\theta_{\text{гл}} = -3^\circ$

Вес самолета	$G_{\text{max}} = 220 \text{ т}$	$G_{\text{ном}} = 170 \text{ т}$	$G_{\text{min}} = 140 \text{ т}$
Без коррекций при всех исправных двигателях	$\varepsilon_r = 0,055 \text{ ргм}$ $\Delta V = 20 \text{ км/ч}$	$\varepsilon_r = 0,059 \text{ ргм}$ $\Delta V = 15 \text{ км/ч}$	$\varepsilon_r = 0,063 \text{ ргм}$ $\Delta V = 12 \text{ км/ч}$
Без коррекций при отказе двигателя	$\varepsilon_r = 0,067 \text{ ргм}$ $\Delta V = 21 \text{ км/ч}$	$\varepsilon_r = 0,089 \text{ ргм}$ $\Delta V = 18 \text{ км/ч}$	$\varepsilon_r = 0,099 \text{ ргм}$ $\Delta V = 15 \text{ км/ч}$
С поправкой по $\Delta V_{\text{зад,корр}}$	$\varepsilon_r = 0,017 \text{ ргм}$ $\Delta V = 12 \text{ км/ч}$	$\varepsilon_r = 0,059 \text{ ргм}$ $\Delta V = 9 \text{ км/ч}$	$\varepsilon_r = 0,048 \text{ ргм}$ $\Delta V = 6 \text{ км/ч}$
С добавочным сигналом $\tilde{\alpha}_{\text{РУД}}^{\text{доп}}$	$\varepsilon_r = 0,015 \text{ ргм}$ $\Delta V = 7 \text{ км/ч}$	$\varepsilon_r = 0,042 \text{ ргм}$ $\Delta V = 5 \text{ км/ч}$	$\varepsilon_r = 0,032 \text{ ргм}$ $\Delta V = 3 \text{ км/ч}$

Список регистрируемых параметров и обозначения на графиках:

EPGM — отклонение от глissады [ргм];

YGT — вертикальная скорость [м/с];

DLB — руль высоты [град];

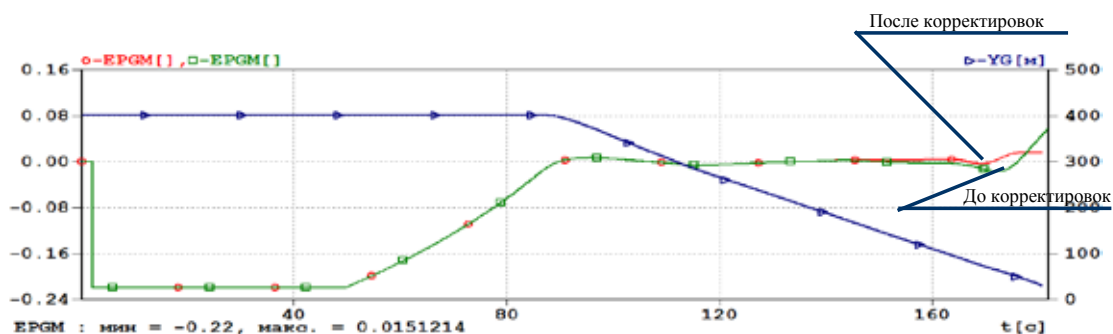
VP — приборная скорость [км/ч];

VPZ — заданное значение скорости [км/ч];

DVZAD — поправка к заданной скорости [км/ч];

ALRUD1 — положение РУД [град];

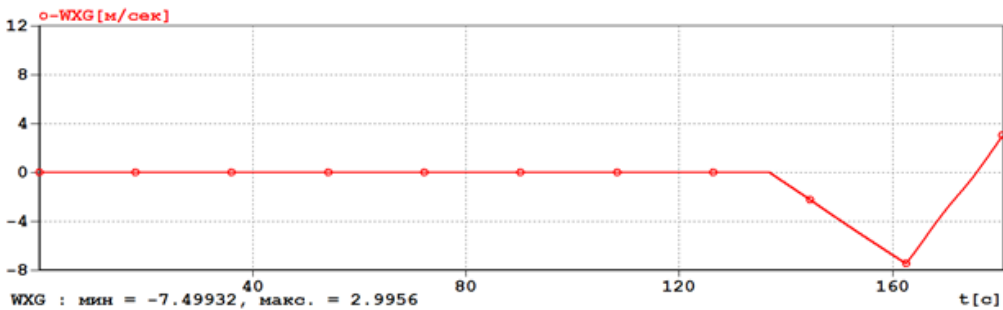
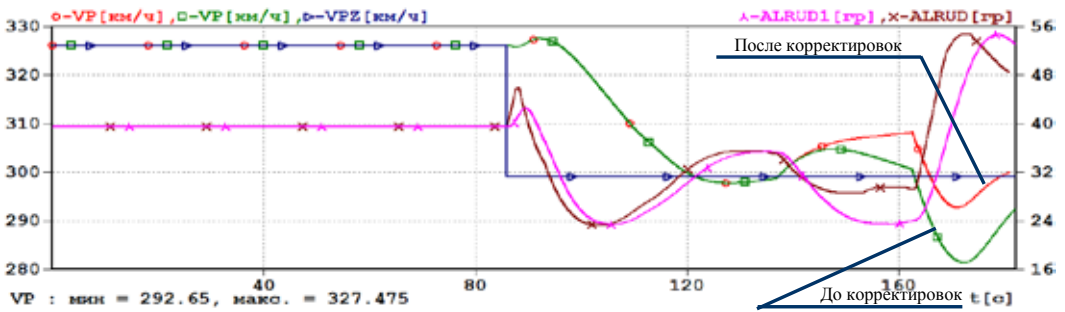
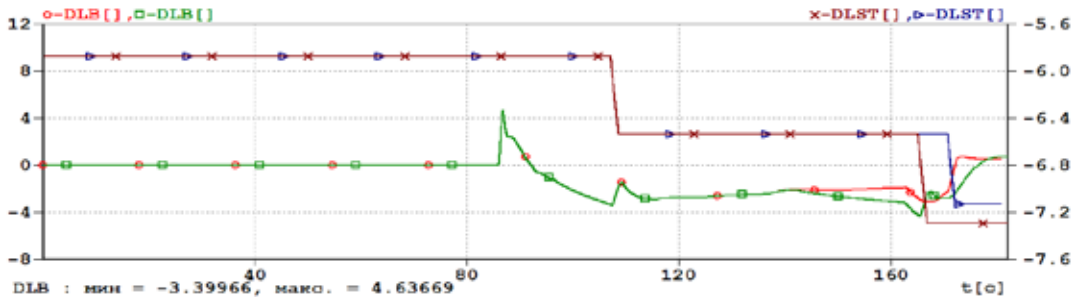
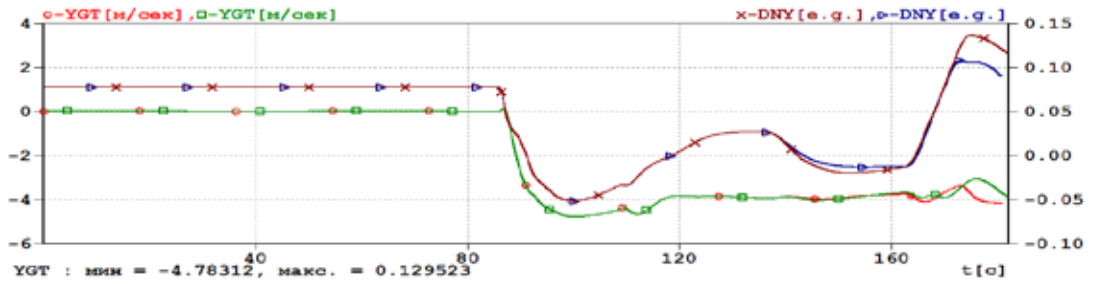
WXG — скорость ветра [м/с].



Вар. 1. Сравнение до и после корректировок в канале тяги.

$G_T = 220$, $X_T = 10\%$, $V_{\text{пр}} = 326 \text{ км/ч} - 299 \text{ км/ч} (V_{\text{зп}} + 10)$,

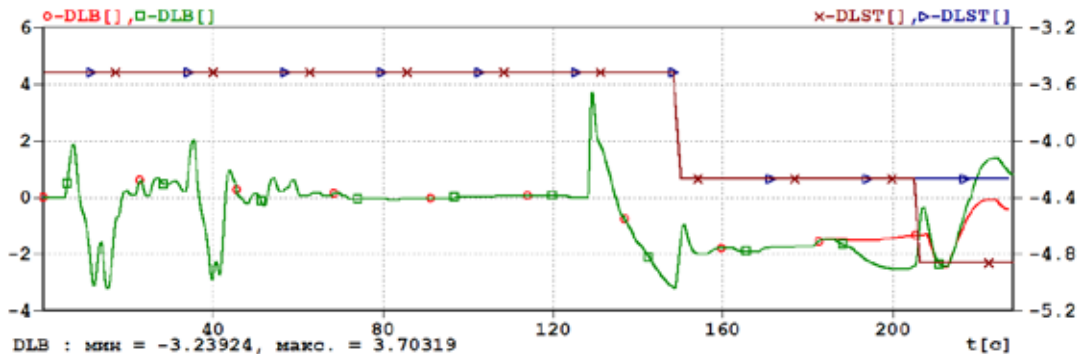
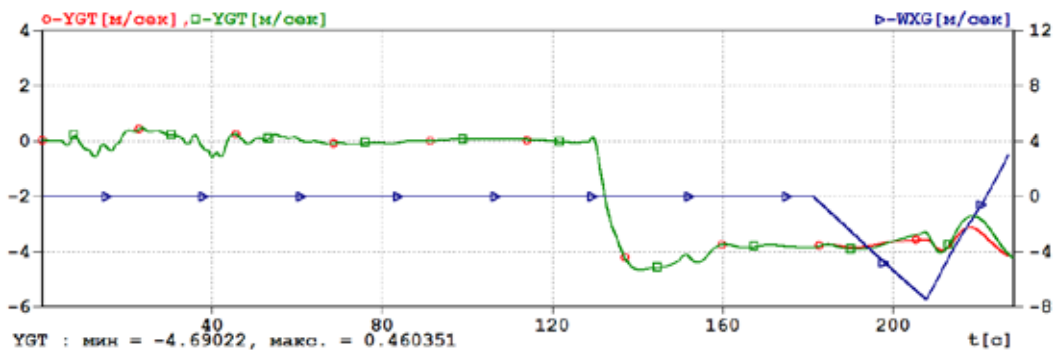
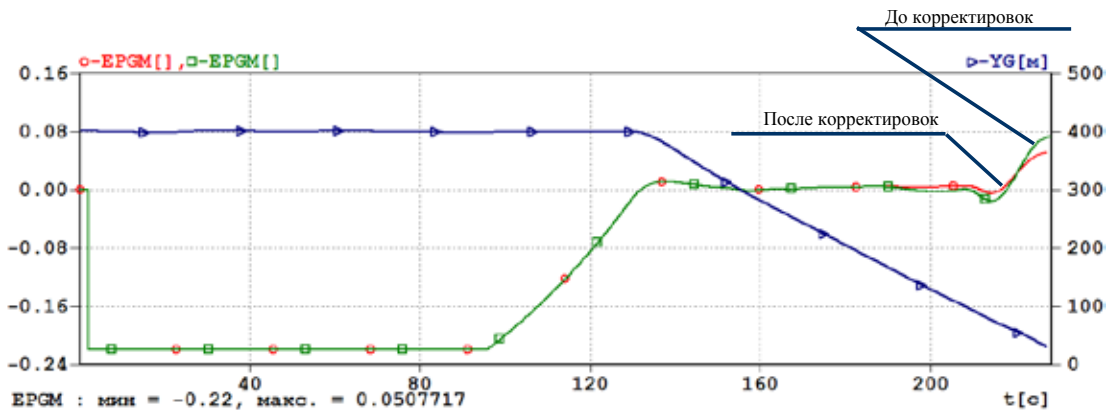
$D = 20 \text{ км}$, $Z = 3 \text{ км}$, $\psi = 90^\circ$, сдвиг ветра W_x (встречно-попутный)



Вар. 1 (продолжение). Сравнение до и после корректировок в канале тяги.

$$G_T = 220, X_T = 10\%, V_{пр} = 326 \text{ км/ч} - 299 \text{ км/ч} (V_{zn} + 10),$$

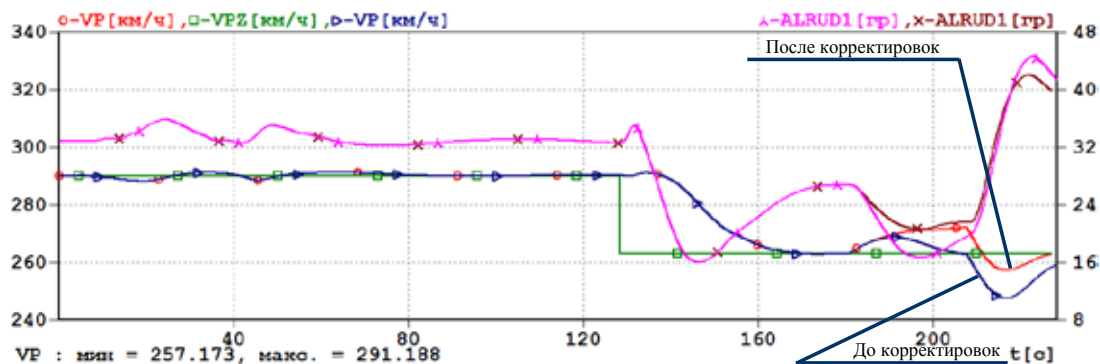
$D = 20 \text{ км}, Z = 3 \text{ км}, \psi = 90^\circ$, сдвиг ветра W_x (встречно-попутный)



Вар. 2. Сравнение до и после корректировок в канале тяги.

$G_T = 170$, $X_T = 22\%$, $V_{np} = 290$ км/ч — 263 км/ч ($V_{3п} + 10$),

$D = 20$ км, $Z = 3$ км, $\psi = 90^\circ$, сдвиг ветра W_x (встречно-попутный)



Вар. 2 (продолжение). Сравнение до и после корректировок в канале тяги.

$$G_T = 170, X_T = 22\%, V_{пр} = 290 \text{ км/ч} - 263 \text{ км/ч} (V_{зп} + 10),$$

$$D = 20 \text{ км}, Z = 3 \text{ км}, \psi = 90^\circ, \text{сдвиг ветра } W_x \text{ (встречно-попутный)}$$

Рассмотрим влияние некоторых эксплуатационных факторов, связанных со встречным ветром после внесения корректировок в алгоритм канала тяги.

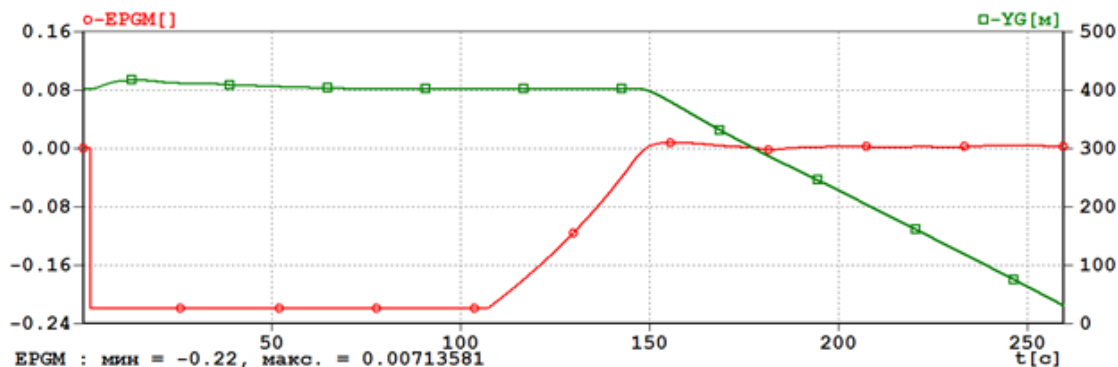
Градиентный встречный ветер

Обычный градиентный встречный ветер изменяется по логарифмическому закону:

$$W_x = W_x(10)(0,43 \cdot \lg(H) + 0,57),$$

где встречная составляющая не превышает $W_{xвс}(10) = -12,8 \text{ м/с}$.

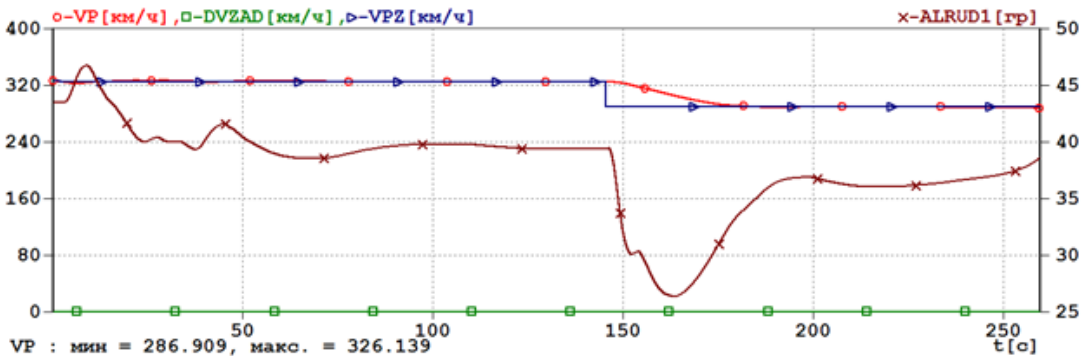
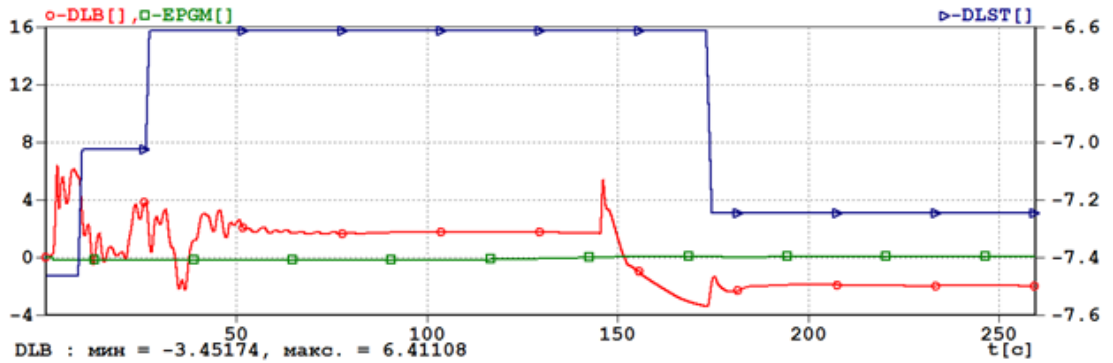
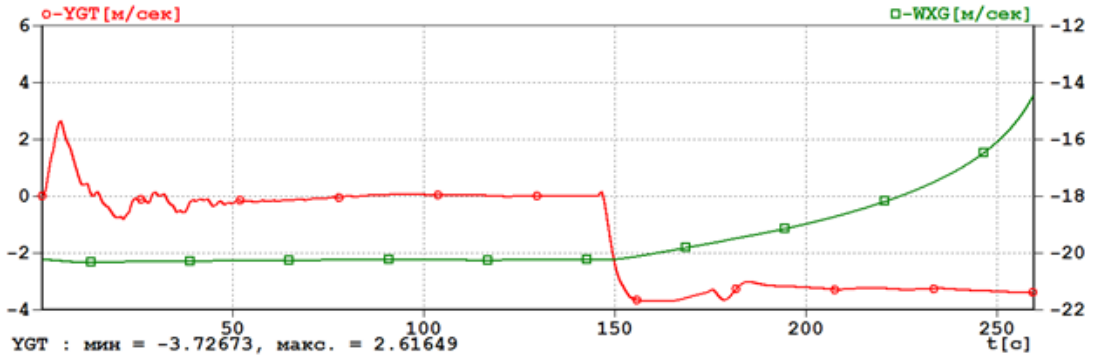
Переходный процесс захода на посадку в условиях градиентного встречного ветра представлен на графиках вар. 3.



Вар. 3. Сравнение до и после корректировок в канале тяги.

$$G_T = 220, X_T = 10\%, V_{пр} = 326 \text{ км/ч} - 289 \text{ км/ч},$$

$$D = 20 \text{ км}, Z = 3 \text{ км}, \psi = 90^\circ, \theta_{гд} = -3^\circ. \text{Встречный ветер } W_x(10) = -12 \text{ м/с}$$



Вар. 3 (продолжение). Сравнение до и после корректировок в канале тяги.

$$G_T = 220, X_T = 10\%, V_{np} = 326 \text{ км/ч} - 289 \text{ км/ч},$$

$$D = 20 \text{ км}, Z = 3 \text{ км}, \psi = 90^\circ, \theta_{gl} = -3^\circ. \text{ Встречный ветер } W_x(10) = -12 \text{ м/с}$$

В этом случае поправка к заданной скорости $\Delta V_{зад}$ (DVZAD) отсутствует (не выполняется условие (3)), также как и добавка к заданному значению $\tilde{\alpha}_{руд}^{доп}$ (не выполняется условие $\dot{W}_{xp} \geq 0,4 \text{ м/с}^2$).

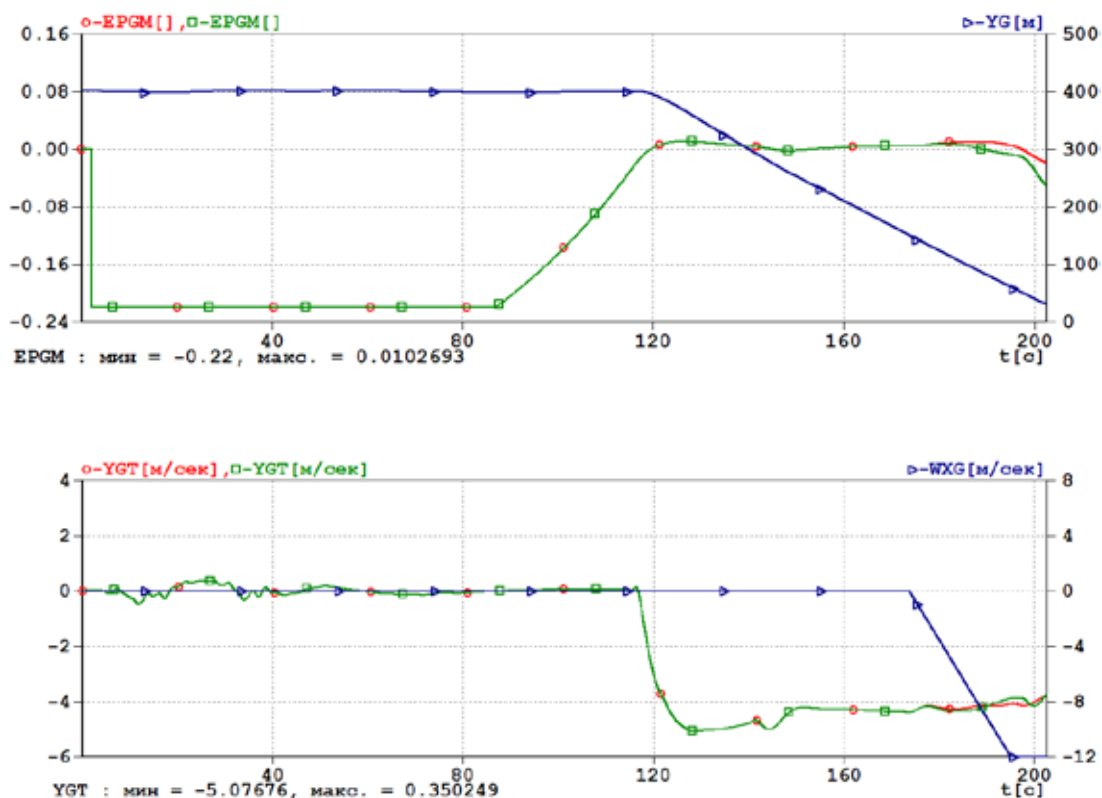
Сильный сдвиг продольного ветра

Оценим также точность стабилизации скорости и точность движения по глиссаде при воздействии сильных сдвигов продольного ветра, заданного следующим соотношением в соответствии с Циркуляром по сдвигу ветра [4].

– сильные сдвиги продольного ветра (4 м/с на 30 м высоты), действующие в диапазоне высот ниже $H \leq 150$ м.

$$W_{xg} = \begin{cases} 4/30 \cdot (150 - H), & H \leq 150 \text{ м,} \\ 0, & H > 150 \text{ м.} \end{cases}$$

На графиках вар. 4 проведено сравнение траекторий посадки до и после корректировок в канале тяги и показано, что при сильных сдвигах встречного ветра падения скорости ниже заданного значения не происходит, но превышение скорости увеличивается ~ на 6 км/ч.

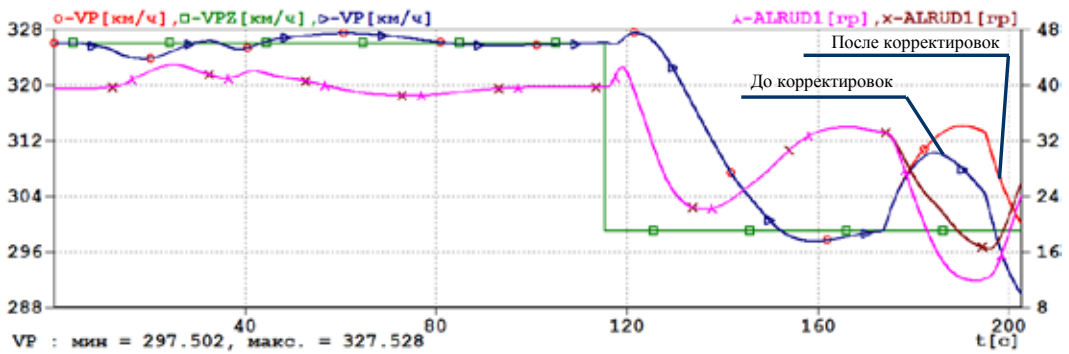
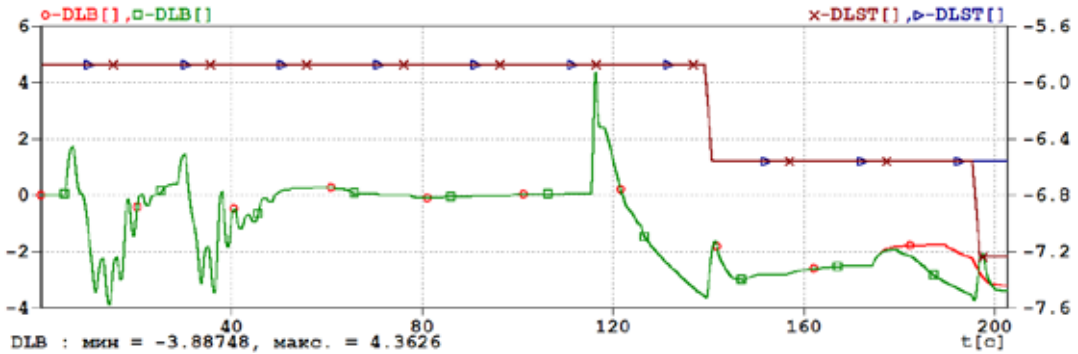


Вар. 4. Ил 96-400М. Сравнение до и после корректировок в канале тяги.

$$G_T = 220, X_T = 10\%, V_{пр} = 326 \text{ км/ч} - 299 \text{ км/ч,}$$

$$D = 20 \text{ км, } Z = 3 \text{ км, } \psi = 90^\circ, \theta_{гп} = -3^\circ.$$

Сильный сдвиг продольного ветра (-4м/с на 30 м высоты)



Вар. 4 (продолжение). Ил 96-400М.

Сравнение до и после корректировок в канале тяги.

$$G_T = 220, X_T = 10\%, V_{пр} = 326 \text{ км/ч} - 299 \text{ км/ч},$$

$$D = 20 \text{ км}, Z = 3 \text{ км}, \psi = 90^\circ, \theta_{гп} = -3^\circ.$$

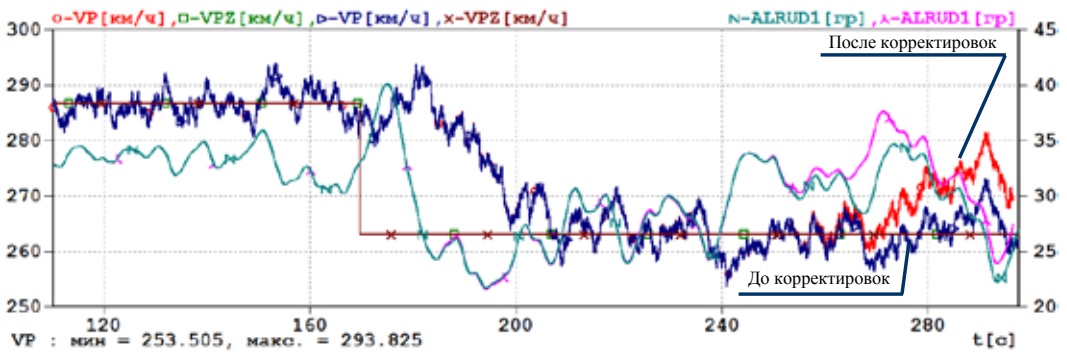
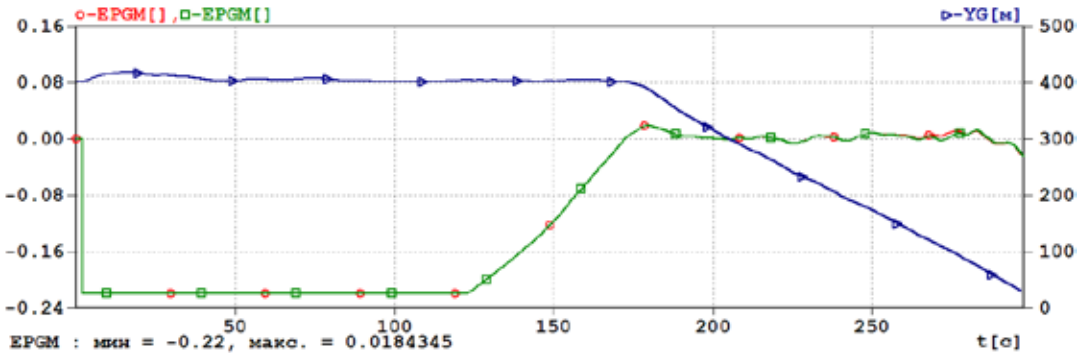
Сильный сдвиг продольного ветра (-4м/с на 30 м высоты)

Турбулентный ветер

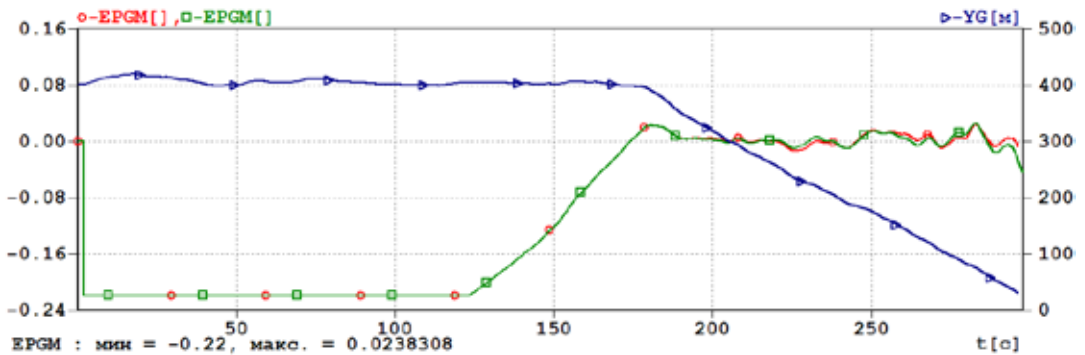
Было проведено моделирование и в условиях турбулентного ветра с учетом проведенных коррекций в канале тяги. Интенсивность турбулентности формировалась при максимальном встречном градиентном ветре $W_x(10) = -12$ м/с. Сравнение траекторий захода на посадку до и после изменений в канале тяги при воздействии турбулентности представлено на графиках вар. 5.

Приведенные графики показывают, что при стабилизации заданной скорости увеличение частоты колебаний по РУДам не наблюдается, лишь несколько увеличивается амплитуда их движения. Скорость стабилизируется с небольшим превышением заданной скорости ($\Delta V_{пр} \sim 2$ км/ч) по сравнению с исходным вариантом без коррекций.

Слабая турбулентность



Сильная турбулентность

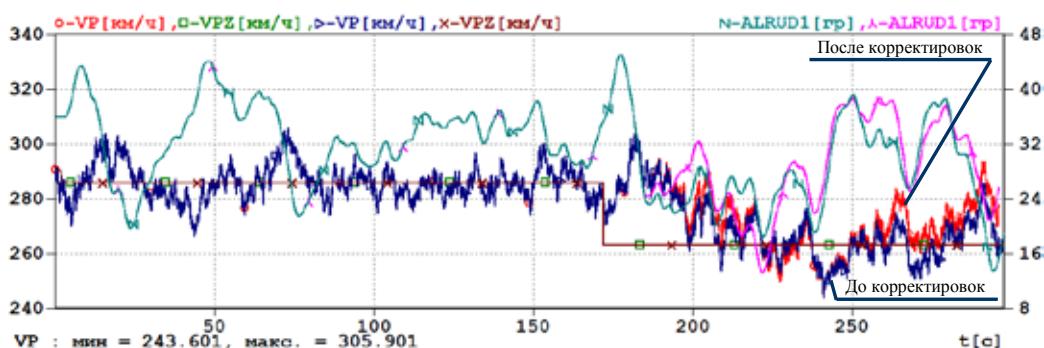


Вар. 5. Ил 96-400М.

Сравнение до и после корректировок в канале тяги.

$G_T = 220$, $X_T = 10\%$, $V_{np} = 263$ км/ч — 299 км/ч,

$D = 20$ км, $Z = 3$ км, $\psi = 90^\circ$

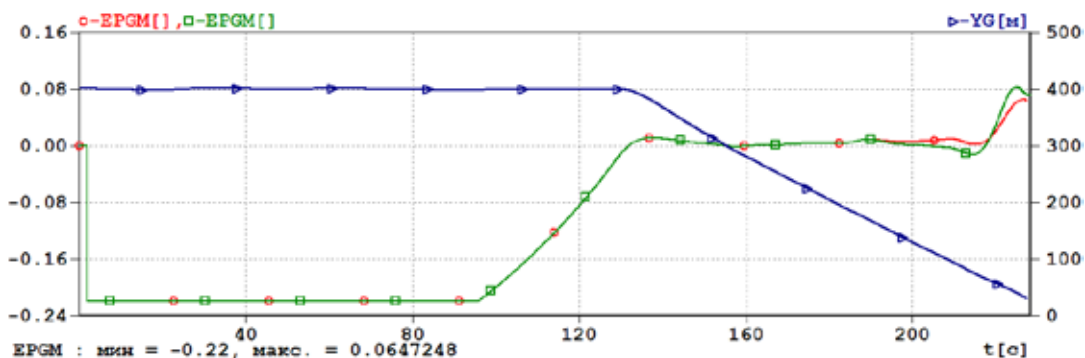


Вар. 5 (продолжение). Ил 96-400М.
Сравнение до и после корректировок в канале тяги.
 $G_T = 220$, $X_T = 10\%$, $V_{пр} = 263$ км/ч — 299 км/ч,
 $D = 20$ км, $Z = 3$ км, $\psi = 90^\circ$

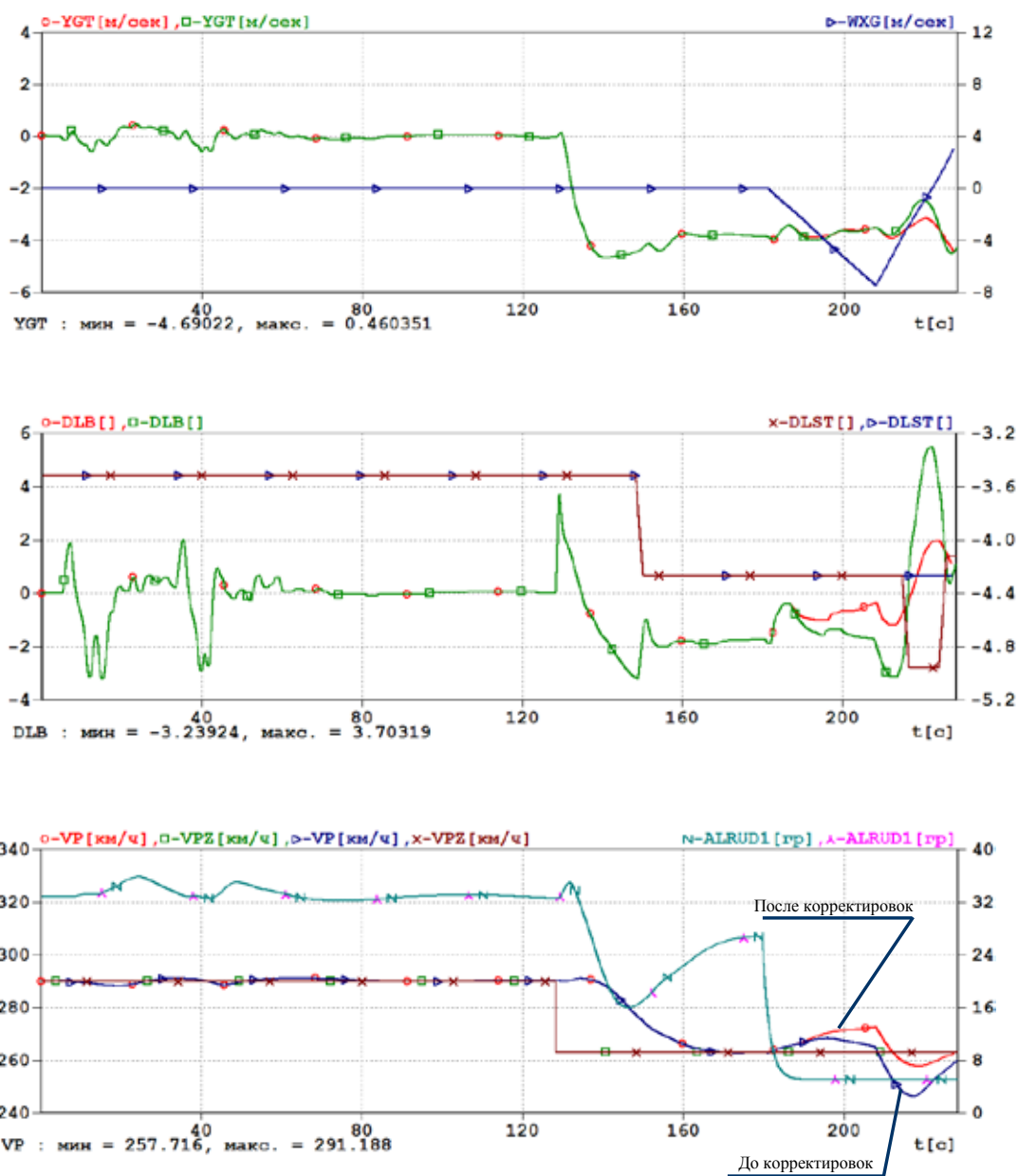
Отказ двигателя

После внесения коррекций в канал тяги рассмотрены заходы на посадку с отказом двигателя при воздействии аномального встречно-попутного сдвига ветра.

На графиках вар. 6 представлены результаты сравнения отклонений от глиссады до и после корректировки алгоритма управления при полете на среднем весе $G_{ном} = 170$ т с отказавшим на высоте $H = 200$ м двигателем в условиях сдвига ветра. Результаты демонстрируют, что отклонение от глиссады уменьшилось от значения 0,078 ргм до значения 0,064 ргм по ϵ_r , падение скорости не превышает 8 км/ч.



Вар. 6. Ил 96-400М. Сравнение до и после корректировок в канале тяги.
 $G_T = 170$, $X_T = 22\%$, $V_{пр} = 290$ км/ч — 263 км/ч,
 $D = 20$ км, $Z = 3$ км, $\psi = 90^\circ$, отказ двигателя $H = 200$ м.
Аномальный встречно-попутный ветер



Вар. 6 (продолжение). Ил 96-400М.
 Сравнение до и после корректировок в канале тяги.
 $G_T = 170$, $X_T = 22\%$, $V_{пр} = 290$ км/ч — 263 км/ч,
 $D = 20$ км, $Z = 3$ км, $\psi = 90^\circ$, отказ двигателя $H = 200$ м.
 Аномальный встречно-попутный ветер

Таким образом, проведенное исследование повышения точности движения по глиссаде при сдвигах ветра в режиме захода на посадку показало, что в условиях действия аномального или сильного сдвига продольного ветра предлагаемые корректировки алгоритмов управления канала тяги ВСУТ-85-4 значительно уменьшают падение приборной скорости:

– не более 8 км/ч, при допустимом значении 10 км/ч, и позволяют улучшить качество стабилизации на глиссаде по точности управления:

– не более 0,049 ргм по ϵ_r при всех работающих двигателях и не более 0,064 ргм при отказе двигателя.

Предложенные корректировки не ухудшают параметры захода на посадку в условиях обычных градиентных ветров, а также при действии турбулентности и приняты к реализации в ПО ВСУТ-85-4.

Литература

1. Техническое задание (ТЗ) на ВСУП-85.
2. Технические требования (ТТ) к режиму «Посадка» для системы ВСУП-85 самолета ИЛ-96-400М.
3. Руководство по летной эксплуатации самолета ИЛ-96-400.
4. Циркуляр по сдвигу ветра.
5. *Кузнецов А. Г., Мазур В. Н., Кербер О. Б., Мельникова Е. А., Хлгатын С. В.* Патент №2581215 от 22.12.2014 г. «Способ автоматического управления самолетом на посадке и система для его реализации»