

D.A. Antonov, K.K. Veremeyenko, M.V. Zharkov, I.M. Kuznetsov

*This paper proposes an approach to the problem of improving the accuracy and premises-hozaschischennosti navigation support vehicle (TC), function-BID under the Intelligent Transportation System (ITS). It shows a generalized structure of the detection algorithm, control and elimination of signals of navigation satellites (NCA), Global Navigation Satellite Systems (GNSS), comprising multipath error. The results of the gap-processing mathematical apparatus, ensuring the implementation of this algo-rhythm.*

*Key words: intelligent transport system, integrated navigation system, GLONASS, multipath, the Kalman filter.*

*Antonov Dmitriy Aleksandrovich, Senior Lecturer, [nio@mail.ru](mailto:nio@mail.ru), Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),*

*Veremeenko Konstantin Konstantinovich, candidate of technical science, docent, [nio@mail.ru](mailto:nio@mail.ru), Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),*

*Jarkov Maksim Vitalyevich, postgraduate student, senior lecturer, [nio@mail.ru](mailto:nio@mail.ru), Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),*

*Kuznetsov Ivan Mikhailovich, senior lecturer, [nio@mail.ru](mailto:nio@mail.ru), Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University)*

УДК 629.735.45:681.5

## **ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ВХОДНОГО ВОЗДУШНОГО ТРАКТА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА С ПРИВОДОМ ОТ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

С.В. Улыбин, В.М. Солдаткин

*Раскрывается методика количественной оценки опасности функционирования входного воздушного тракта газоперекачивающего агрегата с помощью информативных функций и их использования в информационно-управляющей системе предупреждения критических режимов при построении команд управления и информационной поддержке оператора в нештатных ситуациях. Приведены структура и алгоритмы информационно-управляющей системы, дана оценка технической эффективности ее применения.*

*Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, авиационный двигатель, входной воздушный тракт, критические режимы, предупреждение, информационно-управляющая система, структура, алгоритмы управления, техническая эффективность.*

*Эффективность применения сложных автоматизированных технических объектов неразрывно связана с проблемой обеспечения безопасности их функционирования в условиях реальной эксплуатации, успешное*

решение которой является определяющим фактором в различных отраслях промышленности.

В газодобывающей промышленности на магистральных газопроводах широко используются компрессорные станции, газоперекачивающие агрегаты (ГПА) которых построены на базе авиационных двигателей. Безопасность функционирования ГПА в значительной мере определяется состоянием входного воздушного тракта авиационного двигателя, включающего воздухоочистительное устройство (ВОУ) с комбинированной системой фильтрации (КСФ). При этом в условиях реальной эксплуатации ГПА при температуре окружающего воздуха ниже плюс 5°C и в условиях высокой влажности высока вероятность обледенения, засорения и повышения перепада давления воздуха на КСФ, а также обледенения входного направляющего аппарата (ВНА) компрессора авиационного двигателя, что может привести к возникновению опасных и аварийных ситуаций.

Возможные нарушения функционирования входного воздушного тракта и их последствия:

- При предельно низком давлении на входе авиационного двигателя для предотвращения повреждения двигателя необходимо выполнять вынужденный останов ГПА. Вынужденный останов ГПА приводит к простоему оборудования и снижению производительности газопровода.

- В случае попадания неочищенного воздуха на вход газотурбинного двигателя (ГТД) на лопатках компрессора оседают частицы пыли, что может привести к снижению мощности и КПД.

- В случае обледенения ВНА компрессора возможно попадание кусков льда в проточную часть компрессора авиационного двигателя, что может привести к повреждению лопаток компрессора и выходу его из строя.

Поэтому обеспечение безаварийной работы ГПА без вынужденных остановов и простоя оборудования является одной из приоритетных задач эксплуатирующих организаций и производителей ГПА.

Для защиты авиационного двигателя ГПА от повышения перепада давления на комбинированной системе фильтрации до предельных значений используются противообледенительная система (ПОС) и система контроля запыленности. Однако данные системы функционируют независимо друг от друга, при отсутствии информации о причинах повышения перепада давления на КСФ (запыление или обледенение). В результате при любой причине останавливается ГПА и производится замена всей КСФ даже если не все фильтры засорены и могут еще успешно функционировать.

Для повышения эффективности работы ГПА предлагается использовать информационно-управляющую систему предупреждения критических режимов функционирования входного воздушного тракта, которая должна выполнять следующие функции:

сбор и обработку информации о текущих значениях параметров функционирования входного воздушного тракта;

контроль динамики изменения перепада давления воздуха на фильтрах входного воздушного тракта с целью предотвращения вынужденного останова, когда ПОС еще может справиться с обледенением;

определение причины повышения перепада давления при прохождении воздуха через систему фильтрации (забивание пылью или обледенение);

включение противообледенительной системы при высокой вероятности обледенения элементов входного воздушного тракта;

обеспечение вынужденного останова ГПА при возникновении опасной ситуации;

оценка уровня безопасности текущего состояния входного воздушного тракта;

оповещение оператора об обнаружении нештатных режимов функционирования входного воздушного тракта;

выдача рекомендаций и подсказок оператору при обнаружении опасных ситуаций.

Для оценки уровня опасности возникающих нештатных ситуаций  $H_i$  при работе входного воздушного тракта строятся информативные функции опасности  $\Phi_{оп}^{H_i}$  с учетом значимости причин, влияющих на их возникновение [1].

Используя метод обобщенного критерия, все контролируемые параметры  $\xi_j$ , влияющие на уровень опасности функционирования входного воздушного тракта, приводятся к сопоставляемому безразмерному (нормализованному) виду – критерию  $J_i$

$$J_i = \frac{\xi_j}{a_{iB}}; \quad J_i = \begin{cases} J_i = 1, & \text{при } \xi_j \in [a_{iH}; a_{iB}] \\ J_i = 0, & \text{при } \xi_j \notin [a_{iH}; a_{iB}] \end{cases}, \quad (1)$$

где  $a_{iB}$  и  $a_{iH}$  – максимальные (верхние) и минимальные (нижние) значения контролируемого параметра;  $\xi_j$  – текущее значение контролируемого параметра.

В каждой нештатной ситуации  $H_i$  все нормализованные критерии  $J_i$  на основе взвешенной суммы частных критериев «сворачиваются» в одну информативную функцию опасности  $\Phi_{оп}^{H_i} = \sum_{i=1}^m \alpha_i J_i$ , в которой относительная важность нормализованных частных критериев  $J_i$  учитывается при помощи положительных чисел  $\alpha_i$ , называемых коэффициентами важности.

Как показано в работе [2], основными причинами возникновения нештатных ситуаций  $H_i$  при функционировании воздушного тракта авиационного двигателя газоперекачивающего агрегата являются:

1. Низкое давление воздуха на входе авиационного двигателя –  $H_1$ .

2. Попадание на вход авиационного двигателя неочищенного воздуха –  $H_2$ .

3. Обледенение ВНА компрессора авиационного двигателя –  $H_3$ .

В качестве примера приведем формирование информативной функции опасности возникновения нештатной ситуации  $H_2$  – попадание на вход двигателя неочищенного воздуха.

Попадание на вход двигателя неочищенного воздуха при отсутствии конструктивных разрушений входного воздушного тракта, возможно только при открытом байпасном клапане (БК). Работа с открытым БК возможна при засорении фильтров ВОУ (влияющий параметр  $\xi_2$  – перепад давления воздуха на фильтрах  $\Delta P_{\Phi} > 350$  Па), или при неисправности запорного устройства БК (открытый БК при отсутствии засорения – влияющий параметр  $\xi_7$ ). При засорении фильтров по причине обледенения допускается работа авиационного двигателя с открытым БК для возможности использования в работе противообледенительной системы. Как правило, время такой работы ограничивается. Во всех остальных случаях работа с открытым БК не допустима и при этом требуется выполнение вынужденного останова авиационного двигателя для ликвидации причины открытия БК.

Нормализованные критерии  $J_2$  по перепаду давления на фильтрах и нормализованный критерий  $J_7$  по открытию байпасного клапана при отсутствии засорения будут определяться соотношениями

$$J_2 = \frac{\xi_2}{a_{2B}} = \frac{\xi_2}{350}; \quad J_7 = \begin{cases} J_7 = 1, & \text{при открытом БК и } J_2 < 1 \\ J_7 = 0, & \text{при закрытом БК и } J_2 = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Согласно имеющейся статистике [2], при наличии засорения фильтров из 98 случаев БК открылся 93 раза. При этом через 20 минут после открытия 28 раз БК закрывался при ликвидации засорения фильтров ВОУ связанного с обледенением. Вынужденный останов по причине появления ситуации  $H_2$  при засорении фильтров ВОУ был выполнен 65 раз (из 98 случаев). Открытие БК при отсутствии засорения произошло 3 раза, и все 3 раза был выполнен вынужденный останов. Тогда коэффициенты влияния параметров  $\xi_2$  и  $\xi_7$  на появление ситуации  $H_2$  примем равными  $\alpha_2 = 65/98 = 0,66$ ,  $\alpha_7 = 3/3 = 1$ .

Получим информативную функцию опасности  $\Phi_{\text{оп}}^{H_2}$  по попаданию на вход двигателя неочищенного воздуха вида

$$\Phi_{\text{оп}}^{H_2} = \alpha_2 J_2 + \alpha_7 J_7 = 0,66 J_2 + J_7. \quad (4)$$

Причинами засорения фильтров ВОУ могут являться забивание их пылью, обледенение или их совместное действие. Для определения фактора, повлиявшего на засорение фильтров ВОУ, предлагается ввести 3 способа оценки:

а) «Быстрое» обледенение фильтров ВОУ – параметр  $\xi_4$ , характеризующийся тем, что рост перепада давления на фильтрах за текущий час более чем в  $K=5$  раз превышает средний рост перепада давления на фильтрах за 6 предыдущих часов при температуре окружающего воздуха  $T_{\text{окр}} < 2^\circ\text{C}$ . Оценка основана на том, что при  $T_{\text{окр}} < 2^\circ\text{C}$  скорость засорения фильтров при отсутствии обледенения зависит только от запыленности воздуха, а в случае начинающегося обледенения скорость засорения может резко возрасти. Выбор коэффициента  $K=5$  обусловлен тем, что при меньшем его значении может иметь место ошибочный сигнал, например при выполнении на компрессорной станции каких-либо работ, сопровождающихся высокой запыленностью, может кратковременно повыситься уровень запыленности. Нормализованный критерий  $\bar{J}_4$  будет иметь вид:

$$J_4 = \begin{cases} J_4 = 1, & \text{при } (\Delta P_{\text{ф}} - \Delta P_{\text{ф}1}) > 5 \frac{(\Delta P_{\text{ф}1} - \Delta P_{\text{ф}7})}{6} \text{ и } T_{\text{окр}} < 2^\circ\text{C}; \\ J_4 = 0, & \text{при } (\Delta P_{\text{ф}} - \Delta P_{\text{ф}1}) \leq 5 \frac{(\Delta P_{\text{ф}1} - \Delta P_{\text{ф}7})}{6} \text{ или } T_{\text{окр}} \geq 2^\circ\text{C}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\Delta P_{\text{ф}}$  – текущий перепад,  $\Delta P_{\text{ф}1}$  – перепад давления один час назад,  $\Delta P_{\text{ф}7}$  – перепад давления 7 часов назад;

б) «Медленное» обледенение фильтров ВОУ – параметр  $\xi_5$ , когда рост перепада давления на фильтрах за последние 12 часов превышает 80 Па при температуре окружающего воздуха  $T_{\text{окр}} < 2^\circ\text{C}$ .

Данная оценка необходима для фиксации факта обледенения фильтров ВОУ, пропущенного при контроле «быстрого» обледенения. Контроль «медленного» обледенения растянут на 12 часов с целью недопущения срабатывания противообледенительной системы при временном повышении запыленности на компрессорной станции. Поэтому для критерия  $\bar{J}_5$  можно записать:

$$J_5 = \begin{cases} J_5 = 1, & \text{при } (\Delta P_{\text{ф}} - \Delta P_{\text{ф}12}) > 80 \text{ Па и } T_{\text{окр}} < 2^\circ\text{C}; \\ J_5 = 0, & \text{при } (\Delta P_{\text{ф}} - \Delta P_{\text{ф}12}) \leq 80 \text{ Па или } T_{\text{окр}} \geq 2^\circ\text{C}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\Delta P_{\text{ф}}$  – текущий перепад давления на фильтрах ВОУ;  $\Delta P_{\text{ф}12}$  – значение перепада давления на фильтрах ВОУ 12 часов назад.

в) Засорение фильтров ВОУ при  $\Delta P_{\text{ф}} > 350 \text{ Па}$  по причине забивания пылью, при отсутствии обледенения – параметр  $J_6$ .

Нормализованный критерий  $J_6$  будет определяться следующими соотношениями:

$$J_6 = \begin{cases} J_6 = 1, & \text{при } \Delta P_{\phi} > 350 \text{ Па и } J_5 = 0 \text{ и } J_6 = 0 \\ J_6 = 0, & \text{при } \Delta P_{\phi} < 320 \text{ Па или } J_5 = 1 \text{ или } J_6 = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Предлагается присвоить критериям  $J_4$ ,  $J_5$ ,  $J_6$  равные коэффициенты влияния  $\alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 1$ , так как засорение фильтров ВОУ может возникнуть при наличии любого из данных критериев независимо от других.

Частная информативная функция опасности по критерию  $J_2$  будет равна

$$\Phi_{J_2}^{H1} = \alpha_4 J_4 + \alpha_5 J_5 + \alpha_6 J_6 = J_4 + J_5 + J_6. \quad (8)$$

Для того чтобы не допустить появления ситуации  $H_2$  и обеспечить безопасность и эффективность эксплуатации ГПА, необходимо средствами управления парировать факторы, которые могут привести к возникновению ситуации  $H_2$ . Поэтому необходимо сформировать интегральную информативную функцию опасности возникновения нештатной ситуации  $\Phi_{\text{оп}}^{H2}$  с учетом всех влияющих факторов, т.е.

$$\Phi_{\text{оп}}^{H2} = \alpha_2 \bar{J}_2 + \alpha_7 \bar{J}_7 = 0,66(\bar{J}_4 + \bar{J}_5 + \bar{J}_6) + \bar{J}_7. \quad (9)$$

Аналогичным образом получены информативные функции опасности возникновения нештатных ситуаций  $\Phi_{\text{оп}}^{H1}$  и  $\Phi_{\text{оп}}^{H3}$  [2]:

$$\Phi_{\text{оп}}^{H1} = 0,06(\bar{J}_4 + \bar{J}_5 + \bar{J}_6) + 0,83\bar{J}_3 \quad (10)$$

$$\Phi_{\text{оп}}^{H3} = \alpha_9 \bar{J}_8 + \alpha_9 \bar{J}_9 = J_8 + 6,4 \cdot 10^{-3} J_9 \quad (11)$$

В качестве примера приведем формирование алгоритмов управления на парирование нештатной ситуации по снижению давления на входе авиационного двигателя. Для предотвращения аварийного останова двигателя необходимо выполнять действия предупреждающие развитие нештатной ситуации  $H_1$ , так чтобы  $\Phi_{\text{оп}}^{H1} \rightarrow 0$ . Опасная ситуация вследствие изменения параметров  $\xi_j$  возникнет при достижении соответствующими данным параметрам безразмерными критериями значения  $J_i \geq 1$ . Коэффициенты важности указывают на приоритет парирования того или иного критерия. Так, например, критерий  $J_3$  имеет больший приоритет перед  $J_5$ , поэтому в моменты времени, когда  $J_3 \geq 1$  и  $J_5 \geq 1$  следует в первую очередь парировать критерий  $J_3$ .

Согласно присвоенному коэффициенту влияния  $\alpha_3 = 0,83$  критерий  $J_3$  (не открытие БК при засорении фильтров ВОУ или при обледенении циклонов, и снижении давления в камере всасывания) имеет более сильное влияние на развитие нештатной ситуации  $H_1$ . Поэтому при построении алгоритма следует присвоить больший приоритет командам на парирование

критерия  $J_3$  (без попыток ликвидации засорения фильтров ВОУ и обледенения циклонов). Причина засорения при этом не должна учитываться. В случае не открытия БК при засорении фильтров или обледенении циклонов необходим вынужденный останов, чтобы не допустить развитие аварийной ситуации.

Алгоритм управления информационно-управляющей системы строится на основании полученных функций опасности возникновения нештатных ситуаций  $\Phi_{оп}^{H_i}$ . Ввиду большого количества контролируемых параметров и возможности одновременного выхода двух или нескольких параметров за пределы допусков, информационно-управляющая система должна формировать управляющие воздействия с учетом коэффициентов важности  $\alpha_i$ . В первую очередь парируются факторы, которые с большей вероятностью могут привести к аварийной ситуации и вынужденному останову ГПА.

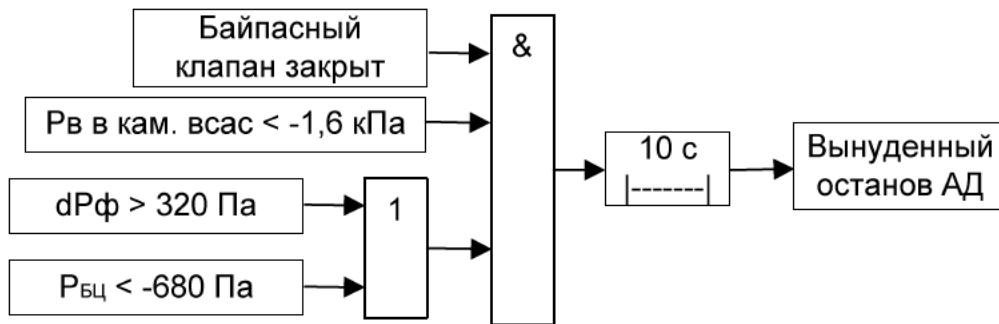
Алгоритм управления информационно-управляющей системы предотвращения критических режимов входного воздушного тракта ГПА в общем виде может быть представлен следующей последовательностью:

1. Измерение значений контролируемых параметров  $\xi_j$ , определяющих текущее состояние объекта контроля.
2. Приведение измеренных контролируемых параметров к безразмерному виду – частным критериям  $J_i$ .
3. Обработка полученных значений и определение факторов при их наличии, которые в данный момент времени в большей степени влияют на возникновение нештатной ситуации в соответствии с информативными функциями  $\Phi_{оп}^{H_i}$  и коэффициентами важности  $\alpha_i$ .
4. Формирование управляющих воздействий на парирование фактора, влияющего на возникновение нештатной ситуации и информационных сообщений оператору.

Описание алгоритма информационно-управляющей системы контроля состояния входного воздушного тракта ГПА предлагается вести в виде блок-схем. Блок схемы позволяют представить алгоритмы в обзорном виде, что дает возможность анализировать их работу, искать логические ошибки в процедуре их реализации.

Сформируем команду управления на парирование нештатной ситуации, когда  $J_3=1$  (при засорении фильтров ВОУ не открылся БК) в виде, приведенном на рис. 1.

В том случае, если байпасный клапан открылся при засорении фильтров ( $J_3=0$ ), то необходимо учитывать причину засорения фильтров  $J_5$  – «быстрое» обледенение,  $J_6$  – «медленное» обледенение или  $J_7$  – забивание пылью.



**Рис. 1. Команда управления на включение вынужденного останова в случае не открытия байпасного клапана при засорении фильтров ВОУ**

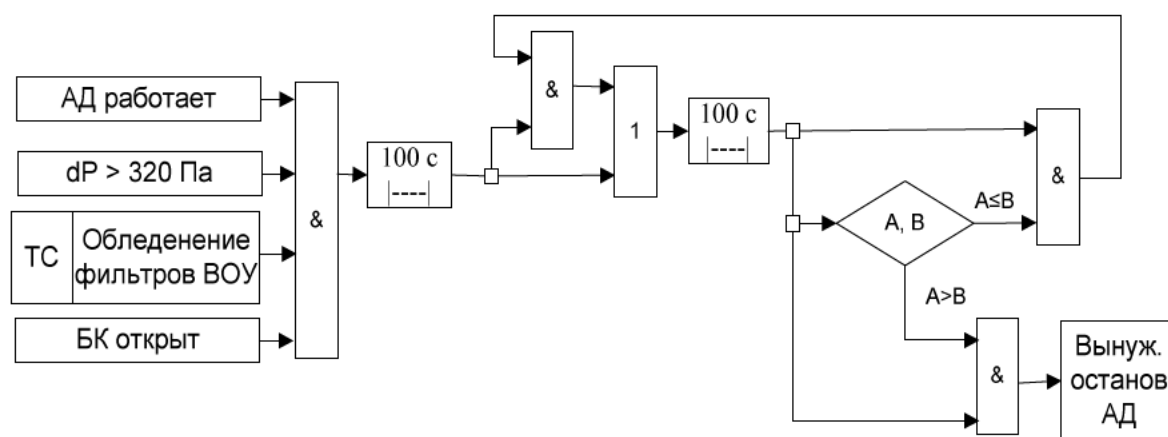
Параметры  $J_5$ ,  $J_6$ ,  $J_7$  зависят друг от друга и в равной степени влияют на развитие нештатной ситуации  $H_1$ . Забивание фильтров пылью при отсутствии обледенения характеризуется следующим значением критериев  $J_3=0$ ,  $J_5=0$ ,  $J_6=0$ ,  $J_7=1$ . При этом в случае засорения фильтров вследствие забивания их пылью при отсутствии обледенения и наличия сигнала в течение 5 минут необходимо сделать вынужденный останов для замены фильтрующих элементов, чтобы не допустить загрязнения осевого компрессора ГТД неочищенным воздухом, проходящим через байпасный клапан ВОУ.

Для того чтобы не допустить вынужденного останова агрегата и заранее заменить фильтры ВОУ при регламентном останове предусмотрена предупредительная сигнализация  $dP_{БФ} > 280$  Па. Ввиду идентичности метода парирования «быстрого» и «медленного» обледенения с использованием горячего воздуха, отбираемого от компрессора авиационного двигателя, сформируем внутренний сигнал, определяющий наличие обледенения фильтров. «Быстрое» обледенение характеризуется ростом перепада давления на фильтрах за текущий час более чем в 5 раз по отношению к среднему росту перепада давления на фильтрах за 6 предыдущих часов и следующим значением критериев  $J_3=0$ ,  $J_5=1$ ,  $J_6=0$ ,  $J_7=0$ . «Медленное» обледенение фильтров ВОУ характеризуется ростом перепада давления на фильтрах за последние 12 часов на 80 Па при температуре окружающего воздуха  $T_{окр} < 5^\circ\text{C}$ . Для медленного обледенения значение критериев  $J_3=0$ ,  $J_5=0$ ,  $J_6=1$ ,  $J_7=0$ . При наличии «быстрого» или «медленного» обледенения формируется внутренний сигнал «Обледенение фильтров ВОУ». Команда управления на включение вынужденного останова при засорении фильтров и наличии сигнала «Обледенение фильтров ВОУ» представлена на рис. 2.

Если перепад давления на фильтрах  $dP_{ф} > 320$  Па, открыт байпасный клапан и имеется сигнал «Обледенение фильтров» в течении 200 секунд  $J_3=0$ ,  $J_7=0$ ,  $J_5=1$  или  $J_6=1$ , то сигнал поступает на элемент

сравнения, где текущее значение перепада давления «А» сравнивается со значением «В» перепада давления 100 секунд назад. Если  $A > B$  (ПОС не справляется с обледенением), то необходимо выполнить вынужденный останов АД. Если  $A < B$ , то сравнение величин А и В выполняется каждые 100 секунд, пока не пропадет одно из условий «АД работает», « $dP_{\phi} > 320$  Па», «Обледенение фильтров ВОУ», «байпасный клапан открыт». В команду управления введен контроль динамики изменения перепада давления на фильтрах ВОУ, чтобы дать возможность ликвидировать обледенение силами противооблединительной системы ВОУ.

Аналогичным образом формируются алгоритмы управления на парирование нештатных ситуаций  $H_2$  и  $H_3$ .



**Рис. 2. Команда управления на включение вынужденного останова при обледенении фильтров ВОУ: А – текущее значение перепада давления на фильтрах ВОУ; В – значения перепада давления на фильтрах ВОУ, зафиксированное за 100 секунд до текущего**

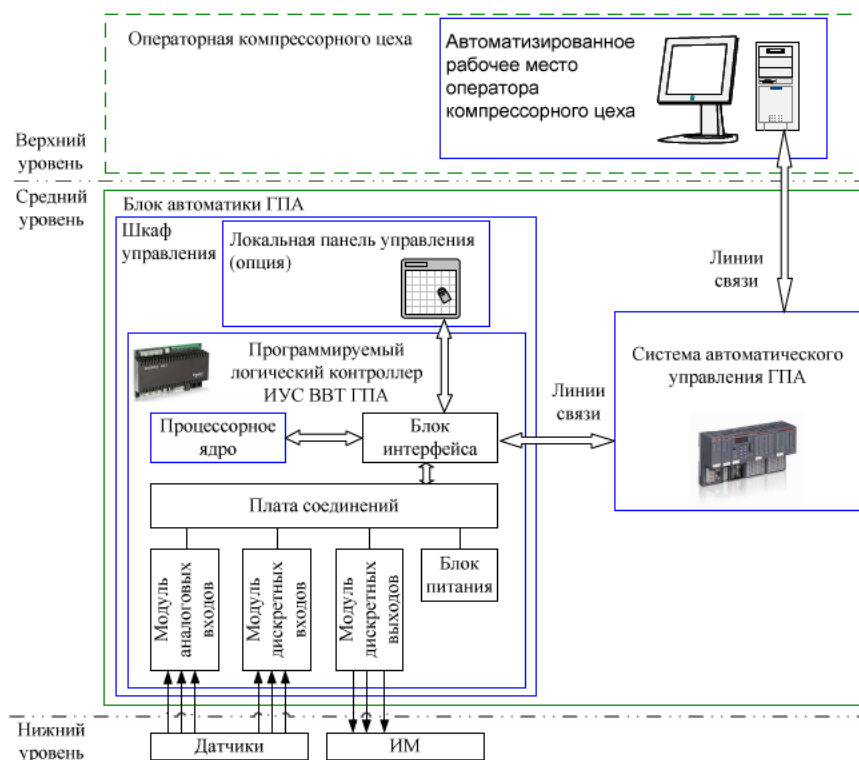
Рассмотрим структурное построение информационно-управляющей системы предупреждения критических режимов входного воздушного тракта (ИУСПКР ВВТ) ГПА, которая обеспечивает:

- прием и обработку информации о состоянии входного воздушного тракта;
- сохранение принятой информации в архиве за установленный период времени;
- оценку уровня опасности текущего состояния и при необходимости выдачу управляющих воздействий на исполнительные механизмы для предотвращения выхода параметров, характеризующих работу ВВТ ГПА за границу предупредительных значений;
- оповещение эксплуатационного персонала об обнаружении аварийных событий, выдачу рекомендаций и подсказок оператору компрессорной станции;

- графическое представление хода технологического процесса, а также принятой и архивной информации в удобной для восприятия форме;
- возможность интегрирования в систему управления газоперекачивающим агрегатом;
- необходимую «гибкость» и позволять корректировку алгоритмов работы в случае уточнения информативных функций опасности по результатам эксплуатации.

Для реализации указанных требований предлагается структурная схема ИУС ВВТ ГПА в виде локальной системы управления по отношению к системе автоматического управления газоперекачивающего агрегата (САУ ГПА), приведенная на рис. 3.

Для приема и преобразования сигналов с аналоговых и дискретных датчиков в ИУСПКР ВВТ ГПА предусмотрены модули аналоговых и дискретных входов. Данные модули преобразуют входные сигналы для дальнейшей обработки процессором. Для выдачи команд на исполнительные механизмы предусмотрен блок дискретных выходов. Для выполнения логических операций, математических вычислений и формирования внутренних сигналов предусмотрено процессорное ядро и энергонезависимая память. В совокупности входные и выходные модули, плата соединений, блок интерфейса, процессорное ядро и энергонезависимая память составляют шкаф управления. В качестве опции предлагается установка на панели шкафа управления дисплея и клавиатуры для местного контроля и управления ВВТ.



**Рис. 3. Структурная схема реализации ИУСПКР ВВТ ГПА в виде локальной системы управления по отношению к САУ ГПА**

В качестве опции предлагается установка на панели шкафа управления дисплея и клавиатуры для местного контроля и управления ВВТ. Для возможности взаимодействия с САУ ГПА и организации человеко-машинного интерфейса посредством автоматизированного рабочего места, расположенного в операторной компрессорной станции, в структуре ИУСПКР ВВТ ГПА предусмотрены цифровые каналы связи.

Проведем оценку технической эффективности ИУСПКР ВВТ ГПА. Исходя из требований, предъявляемых к функциям ИУСПКР ВВТ, выделим следующие частные критерии  $u_i$  технической эффективности [3]:

- $u_1$  – прием и обработка информации о технологических параметрах входного воздушного тракта;
- $u_2$  – выдача управляющих воздействий на исполнительные механизмы;
- $u_3$  – включение ПОС при высокой вероятности обледенения элементов входного воздушного тракта;
- $u_4$  – парирование «быстрого» или «медленного» обледенения;
- $u_5$  – выполнение вынужденного останова при возникновении нештатной ситуации;
- $u_6$  – контроль динамики изменения перепада давления воздуха на фильтрах ВОУ и давления за блоком циклонов (с целью предотвращения вынужденного останова, когда ПОС может справиться с обледенением);
- $u_7$  – определение причины повышения перепада давления при прохождении воздуха через систему фильтрации (забивание пылью или обледенение);
- $u_8$  – взаимодействие с САУ ГПА (системой верхнего уровня);
- $u_9$  – оповещение оператора об обнаружении аварийных событий;
- $u_{10}$  – выдача рекомендаций и подсказок оператору при обнаружении аварийных событий;
- $u_{11}$  – выполнение оценки безопасности текущего состояния.

Для возможности относительно простого определения численного значения критериев, будем характеризовать данные критерии как качественные, то есть критерий, принимающий только два значения: 1 – если цель достигнута, 0 – если цель не достигнута.

Для сравнения технической эффективности двух различных систем, к которым предъявляются идентичные требования и их критерии являются качественными, можно использовать коэффициент технической эффективности (соответствия ИУС предъявляемым требованиям) –  $K_{ТЭ}$ , который можно представить в виде:

$$\hat{E}_{\text{ОУ}} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{N}, \quad (12)$$

где  $u_i$  – частные критерии технической эффективности,  $N$  – количество частных критериев.

Проведем сравнение информационно-управляющей системы предупреждения критических режимов входного воздушного тракта газоперекачивающего агрегата и совокупности двух имеющихся систем контроля забивания фильтров (СКЗФ) и противообледенительной системы ВОУ и ВНА по степени соответствия требованиям, предъявляемым к функциям ИУСПКР ВВТ ГПА в виде таблицы.

### **Частные критерии технической эффективности ИУСПКР ВВТ ГПА**

| №<br>п/п | Наименование частного критерия                                                                                                             | Значение критерия<br>эффективности, (1/0) |               |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|
|          |                                                                                                                                            | СКЗФ и<br>ПОС                             | ИУСПКР<br>ВВТ |
| 1        | $u_1$ – прием и обработка информации о технологических параметрах входного воздушного тракта                                               | 1                                         | 1             |
| 2        | $u_2$ – выдача управляющих воздействий на исполнительные механизмы                                                                         | 1                                         | 1             |
| 3        | $u_3$ – включение ПОС при высокой вероятности обледенения элементов входного воздушного тракта                                             | 1                                         | 1             |
| 4        | $u_4$ – парирование «быстрого» или «медленного» обледенения                                                                                | 0                                         | 1             |
| 5        | $u_5$ – выполнение вынужденного останова при возникновении нештатной ситуации                                                              | 1                                         | 1             |
| 6        | $u_6$ – контроль динамики изменения перепада давления воздуха на фильтрах ВОУ и давления за блоком циклонов                                | 0                                         | 1             |
| 7        | $u_7$ – определение причины повышения перепада давления при прохождении воздуха через систему фильтрации (забивание пылью или обледенение) | 0                                         | 1             |
| 8        | $u_8$ – взаимодействие с САУ ГПА                                                                                                           | 1                                         | 1             |
| 9        | $u_9$ – оповещение оператора об обнаружении аварийных событий                                                                              | 1                                         | 1             |
| 10       | $u_{10}$ – выдача рекомендаций и подсказок оператору при обнаружении аварийных событий                                                     | 0                                         | 1             |
| 11       | $u_{11}$ – выполнение оценки безопасности текущего состояния                                                                               | 0                                         | 1             |

Как показали расчеты, коэффициенты технической эффективности для совокупности двух имеющихся систем контроля забивания фильтров и противообледенительной системы ВОУ и ВНА:

$$K_{ТЭ} = \frac{\sum_{i=n} u_i}{N} = \frac{6}{11} = 0,54.$$

Коэффициент технической эффективности информационно-управляющей системы предупреждения критических режимов входного воздушного тракта газоперекачивающего агрегата

$$K_{ТЭ} = \frac{\sum_{i=n} u_i}{N} = \frac{11}{11} = 1.$$

Исходя из полученных значений коэффициентов технической эффективности, можно отметить, что внедрение информационно-управляющей системы позволит значительно улучшить уровень безопасности функционирования входного воздушного тракта газоперекачивающего агрегата с приводом от авиационного двигателя.

Таким образом, рассмотренная методика построения и оценки эффективности информационно-управляющей системы позволяет проводить количественную оценку текущего уровня опасности функционирования входного воздушного тракта, принимать своевременные решения о необходимости замены фильтров или остановки авиационного двигателя, строить команды управления системами воздушного тракта газоперекачивающего агрегата на основе информативных функций опасности. Полученные команды управления позволяют в автоматическом режиме выполнить своевременные действия для предотвращения аварийной ситуации. Оценка технической эффективности свидетельствует о целесообразности внедрения разработанной информационно-управляющей системы предотвращения критических режимов входного воздушного тракта газоперекачивающих агрегатов с приводом от авиационного газотурбинного двигателя.

### Список литературы

1. Солдаткин В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448с.
2. Улыбин С.В. Методика количественной оценки уровня опасности функционирования воздушного тракта авиационного двигателя газоперекачивающего агрегата // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. №2. Вып. 2.
3. Руководство по решениям в автоматизации. Практические аспекты систем управления технологическими процессами. Техническая лекция Schneider Electric, 2011. 323 с.

Улыбин Сергей Владимирович, асп., [usv88@yandex.ru](mailto:usv88@yandex.ru), Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,

*Солдаткин Владимир Михайлович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, [w-soldatkin@mail.ru](mailto:w-soldatkin@mail.ru), Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-KAI*

**INFORMATION-CONTROLLING SYSTEM TO PREVENT OF CRITICAL MODES  
OF THE INLET AIR TRACT OF GAS PUMPING UNIT WITH DRIVE FROM  
AVIATION ENGINE**

*S.V. Ulybin, V.M. Soldatkin*

*The method of the quantitative assessment of danger of the functioning of the inlet air tract of gas pumping unit with the help of informative function and their use in information-controlling system to prevent critical modes when modelling of controlling commands and information support of the operator in emergency situations are considered. The structure and algorithms of the information-controlling system are produced, estimating the technical efficiency of its application is produced.*

*Key words: gas pumping unit, aircraft engine, inlet air tract, critical regimes, warning, information-controlling system, the structure, control algorithms, technical efficiency.*

*Ulybin Sergey Vladimirovich, postgraduate, [usv88@yandex.ru](mailto:usv88@yandex.ru), Russia, Kazan, Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev-KAI,*

*Soldatkin Vladimir Michailovich, doctor of technical science, professor, head of department, [w-soldatkin@mail.ru](mailto:w-soldatkin@mail.ru), Russia, Kazan, Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev-KAI*