

ОГРАНИЧЕНИЕ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ОПАСНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В. И. Петунин¹, Л. М. Неугодникова²

¹petunin_vi@mail.ru, ²Grifon_love@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 8 апреля 2014 г.

Аннотация. Рассматривается задача ограничения и предупреждения опасных режимов при автоматическом управлении полетом ЛА. Показано, что введение автоматов ограничений в контур управления объектом позволяет повысить безопасность функционирования. Предложены принципы организации системы предупреждения опасных ситуаций, предназначенной для повышения эффективности автоматического и дистанционного управления летательными аппаратами.

Ключевые слова: автоматическое управление полетом; системы предупреждения критических режимов; ограничение предельных значений.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие и эффективность применения авиационной техники неразрывно связаны с проблемой безопасности полетов. Важность проблемы непрерывно возрастает в связи с усложнением авиационной техники, расширением круга выполняемых задач и использованием новых, полностью автоматизированных систем управления полетом.

При резком изменении внешних условий (порывы ветра, турбулентности) или изменении задачи вылета, при наличии других участников воздушного движения выполнение полета может проходить вблизи границ опасных режимов.

Такие явления являются общими для самых разнообразных летательных аппаратов (ЛА), но проявляются они чаще всего при полетах в автоматических режимах, и, соответственно, наиболее актуальны для автоматически и дистанционно управляемых беспилотных ЛА (БЛА). В целях обеспечения безопасности потенциально опасные режимы необходимо выявлять и устранять при полетах на пилотируемых ЛА всех видов.

Ограничения на параметры полета ЛА определяются в основном аэродинамическими и прочностными характеристиками, устойчивостью и управляемостью объекта. К числу основных пилотажных параметров, на которые

накладываются ограничения в полете, относятся:

- угол атаки α ;
- нормальная перегрузка n_y ;
- истинная воздушная скорость V_v и число Маха M ;
- высота H и вертикальная скорость V_y и некоторые другие.

Для ограничения этих параметров используются так называемые автоматы ограничений, обеспечивающие не превышение некоторых заданных величин.

В то же время даже не превышающие предельных значений параметры могут в совокупности характеризовать потенциально опасную ситуацию в полете. Для обеспечения безопасности полета в условиях возможных внештатных ситуаций на ЛА используются специальные инструментальные средства предупреждения критических режимов полета (СПКР) [1].

Общий принцип их действия основан на слежении за определенными пилотажными параметрами и скоростями их изменения. При превышении определенных заданных значений СПКР сигнализирует об этом и формирует рекомендации для экипажа по устранению опасной ситуации, а в случае бездействия летчика – вычисляет необходимые корректирующие и управляющие сигналы в САУ, то есть стабилизирует ЛА в автоматическом режиме [2].

Для предотвращения опасных сближений между пассажирскими ЛА используется система TCAS. Таким образом, существует множество разнообразных бортовых систем, предназначенных для предотвращения опасных ситуаций, при этом все они предназначены прежде всего для сигнализации, а в контур управления объектом включаются только в крайнем случае. В то же время для полной автоматизации управления движением ЛА необходимо, чтобы включения СПКР в процесс управления проходили более гладко, с учетом соблюдения выполнения текущей задачи. Для этого необходимо в первую очередь выявить структуру бортового управляющего оборудования ЛА и взаимосвязь различных систем в его составе.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛА

Рассмотрим процесс автоматического управления ЛА, используя подход, указанный в [3].

Пусть полетное задание, описываемое целевой функцией Y , задается непосредственно летчиком или оператором:

$$Y = F(S, A, E),$$

где Y – функционал, задающий цель вылета; S – пространство состояний, в которых может находиться ЛА; A – действия, которые может выполнять ЛА; E – состояние внешней среды.

Определение необходимых действий $A_3(t) = \langle a_1, a_2, \dots, a_h \rangle$ (h – множество всех возможных действий ЛА) можно сформулировать как решение задачи оптимизации целевой функции Y , которое выполняется в блоке «Траекторное управление» на рис. 1.

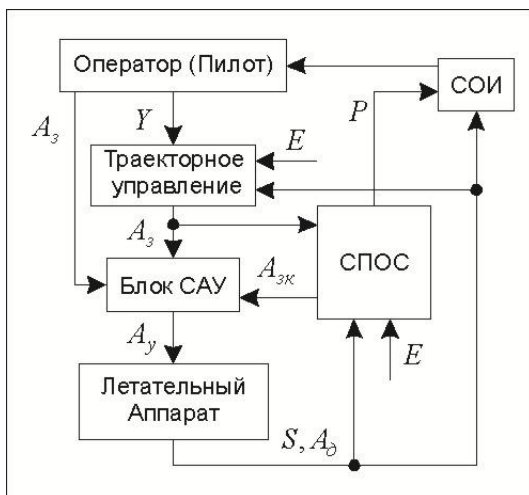


Рис. 1. Основные взаимосвязи между бортовым информационно-управляющим оборудованием ЛА

На рисунке также обозначены: СОИ – средства отображения информации; СПОС – система предупреждения опасных состояний.

В некоторых случаях даже при допустимых значениях отдельных параметров полета их определенная комбинация может характеризовать потенциально опасную ситуацию. Как правило, система СПОС содержит алгоритмы для ее распознавания и сигнализации о распознанной угрозе (P) в СОИ.

Действия A_3 формируются в условиях ограничений, которые можно записать как неравенства вида:

$$\begin{aligned} \alpha(S, E) &\leq 0; \\ \beta(S, A, E) &\leq 0. \end{aligned} \quad (*)$$

Первое неравенство представляет собой ограничение пространства состояний, в которых может находиться ЛА; второе – ограничение пространства действий, которые он может совершать.

Сформированные заданные действия A_3 (которые могут быть заданы непосредственно летчиком или оператором, если ЛА управляется дистанционно) передаются в блок систем автоматического управления (САУ), где в программном устройстве формируются управляющие сигналы A_y , причем при необходимости включаются встроенные автоматы ограничений, контролирующие выполнение неравенства (*). Получившиеся значения A_y поступают на вход соответствующих исполнительных устройств, обеспечивающих пространственное управление движением ЛА. При этом вследствие инерционности движения объекта управления заданные значения A_3 будут обрабатываться с некоторой задержкой.

САУ УГЛОМ КУРСА И ОГРАНИЧЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ ПЕРЕГРУЗКИ ЛА

В качестве примера рассмотрим синтезированную в [4] САУ углом курса и ограничения нормальной перегрузки ЛА.

Структурная схема САУ приведена на рис. 2, где ЛА – летательный аппарат; ДНП – датчик нормальной перегрузки; ДУ – датчик угла; ВЗУК – вычислитель заданного угла крена; ВАОП – вычислитель автомата ограничения перегрузки; АС – алгебраический селектор; ВАУК – вычислитель автопилота угла крена; СПЭ – сервопривод элеронов; ψ_3, γ_3, n_{y3} – заданные значения углов курса, крена и перегрузки ЛА.

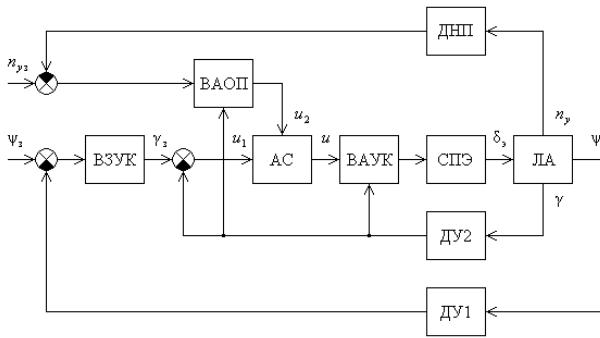


Рис. 2. Структурная схема САУ углом курса и ограничения нормальной перегрузки ЛА

Система работает следующим образом. Сигнал заданного угла курса ψ_3 с выхода датчика угла курса поступает на вход первого элемента сравнения, на другой вход которого поступает сигнал текущего значения угла курса ψ с выхода датчика угла курса ДУ1. В соответствии с отклонением $\Delta\psi = \psi_3 - \psi$ текущего значения угла курса ψ от заданного ψ_3 в вычислителе заданного угла крена ВЗУК формируется заданное значение угла крена γ_3 , которое сравнивается во втором элементе сравнения с текущим значением угла крена γ с выхода датчика угла крена ДУ2. На выходе второго элемента сравнения формируется сигнал $u_1 = \Delta\gamma = \gamma_3 - \gamma$.

Сигнал максимального значения нормальной перегрузки n_{y3} с выхода датчика максимальной перегрузки поступает на вход третьего элемента сравнения, на другой вход которого поступает сигнал текущего значения нормальной перегрузки n_y с выхода датчика нормальной перегрузки ДНП. На выходе третьего элемента сравнения формируется сигнал $\Delta n_y = n_{y3} - n_y$, который поступает на вход вычислителя автомата ограничения перегрузки ВАОП. На выходе вычислителя автомата ограничения перегрузки ВАОП формируется сигнал $u_2 = k_{\text{ваоп}} \Delta n_y$, где $k_{\text{ваоп}}$ – коэффициент передачи.

В [5] показано, что такое включение позволяет обеспечить необходимую точность ограничения нормальной перегрузки и плавные переходные процессы при переключении каналов. На рис. 3 показаны результаты моделирования описанной САУ.

Задающее воздействие ψ_3 имеет вид единичного ступенчатого воздействия, действительное значение ψ_0 запаздывает по отношению к нему на время регулирования t_d . Пере-

ходные процессы получены для относительного времени \bar{t} , реальное время $t_d = \tau_a \bar{t}$, где τ_a – аэродинамическая постоянная времени ЛА.

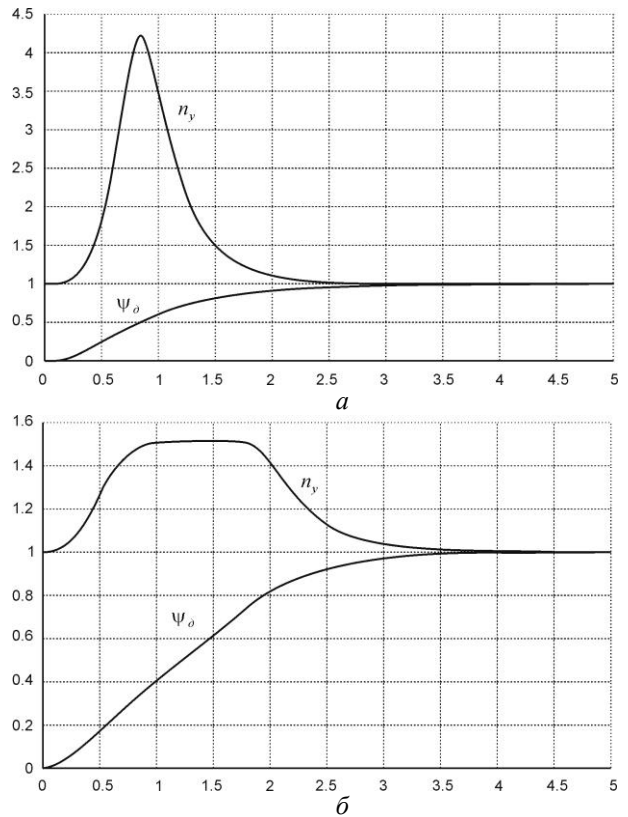


Рис. 3. Результаты моделирования САУ углом курса и ограничения нормальной перегрузки ЛА:

a – без автомата ограничения перегрузки;
б – с автоматом ограничения перегрузки

Таким образом, при управлении движением ЛА имеют место запаздывания по времени в изменении управляемых величин; более того, при срабатывании автоматов ограничений время регулирования системы возрастает.

СИСТЕМА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ

Если в некотором пространстве полет выполняет не один, а два и более ЛА, то при построении траектории нужно учесть их местонахождение и действия. У пилотируемых ЛА хорошо развиты системы связи, помогающие определять взаимное положение и движение объектов. Для нескольких БЛА, выполняющих групповой полет, эта задача также решается. Как правило, беспилотный авиационный комплекс (БАК), имеющий в составе несколько БЛА, обладает также некоторой центральной управляющей системой, позволяющей координировать действия БЛА, либо все участники группы

непрерывно передают друг другу информацию о своих действиях. [6]

Для координирования действий ЛА и расчета траекторий маневров при устранении конфликтов предлагается система предупреждения опасных ситуаций (СПОС). СПОС должна будет взять на себя 3 основные функции:

- обеспечивать сигнализацию и устранение опасных режимов;
- предупреждать опасные сближения БЛА внутри группы – в горизонтальной плоскости, не прерывая выполнения основной задачи и в вертикальной – если это невозможно;
- рассчитывать траектории маневров при приближении БЛА к запрещенной для полетов зоне.

Первая функция может быть реализована в виде упрощенного аналога современных СПКР. Для повышения эффективности распознавания возможных опасных режимов следует работать не только с действительными значениями параметров состояния ЛА, но и прогнозировать изменения состояния на основе передаваемых в САУ задающих воздействий, то есть блок прогноза должен вычислить предполагаемое значение действия ЛА A_d и оценить его последствия до того, как оно фактически будет выполнено. При необходимости СПОС на основе целевой функции корректировки Y_k вычислит корректирующее действие $A_{зк}$ и передаст его в САУ. Выполнение этих требований возможно при высоком быстродействии вычислителя СПОС.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ОПАСНЫХ СБЛИЖЕНИЙ

В случае полетов двух и более ЛА в некоторой единице пространства возникает задача предотвращения их опасных сближений. Используемая на пассажирских ЛА система TCAS решает эту задачу путем изменения высот конфликтующих самолетов.

Специфика разрешения конфликтов в группах гражданских БЛА в том, что они, как правило, выполняют информационные функции, для чего необходимо поддерживать определенную высоту и иногда – скорость полета. Поэтому стратегия TCAS для информационных БЛА нежелательна.

Отклонение информационного БЛА от своей текущей заданной траектории для разрешения конфликтов с другим БЛА может оказаться необходимым, но желательно при этом не потерять объект наблюдения из поля зрения.

Для реализации второй функции нужно построить оценочную функцию S_Δ , учитывающую возможное горизонтальное отклонение БЛА

от заданной линии пути при выполнении его задачи. В наиболее общем виде ее можно представить следующим образом:

$$\Delta S = \begin{cases} \Delta h \leq \Delta h_{\text{доп}}(\text{Cam}); \\ \Delta x \leq \Delta x_{\text{доп}}(V); \\ \Delta z \leq \Delta x_{\text{доп}}(\text{Img}, \text{Cam}); \\ \Delta l \leq \Delta l_{\text{доп}} = \Delta t * V_{\text{rad}}, \end{cases}$$

где Δh – вертикальное отклонение от заданной траектории, его допустимое значение зависит от разрешающей способности камеры; Δx – продольное отклонение, допустимое значение зависит от скорости полета; Δz – боковое отклонение, допустимое значение зависит не только от характеристик камеры, но и от требований к величине перекрытия получаемых изображений; Δl – минимальное допустимое расстояние между двумя ЛА, зависит от скорости их сближения и времени.

Сопоставив такие функции для двух БЛА, их текущие состояния и их текущие и заданные действия, можно сформировать некоторые отклонения от заданной траектории для обоих БЛА, которые позволят предупредить возникновение конфликта и не прервут выполнение задания.

Реализация этой функции актуальна, так как в настоящее время подходы к управлению группами БЛА сводятся либо к разграничению областей их перемещений, либо к согласованному движению с соблюдением некоторых минимально разрешенных дистанций между ними при выполнении одной или однотипной задачи (задачу преследования как противоположную не рассматриваем). Также возможно, что выполнение одним БЛА его задачи более важно, чем другим. В этом случае, если приоритеты определены, то один БЛА должен будет «уступить дорогу» другому. Есть подходы, предполагающие изменение «роли», выполняемой управляемым БЛА в рамках группы [7].

ФОРМИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ МАНЕВРА

Пусть опорная траектория полета ЛА задана некоторым множеством $\{P\}$ поворотных пунктов маршрута (ППМов). На рис. 4, а показан участок этой траектории, содержащий ППМы P_i, P_{i+1}, P_{i+2} и P_{i+3} ; ЛА выполняет полет по заданному маршруту и находится на участке (P_i, P_{i+1}) в точке p_k .

Траектория такого вида используется главным образом для съемки местности. Сформиро-

вать ее достаточно легко, но при этом следует учесть шаг траектории в связи с разрешающей способностью камеры и высоты полета, а также скорость – для расчета виража при изменении направления. Область, над которой разрешены полеты БЛА, как правило, задается заранее, но указание о соблюдении некоторой границы может быть получено уже в процессе полета.

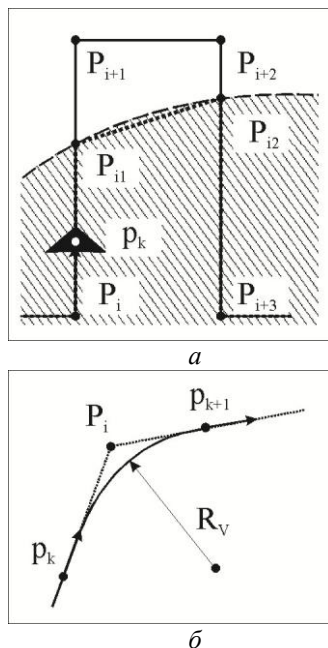


Рис. 4. Движение ЛА по опорной траектории: *а* – граница разрешенной области; *б* – изменение направления в точке

Когда ЛА приближается к границе зоны, полеты в которой для него разрешены (показана штриховкой на рис. 4, *а*, может оказаться, что ППМы P_{i+1} и P_{i+2} оказываются в «запрещенной» зоне и должны быть исключены из плана полета (зона, над которой полеты опасны или запрещены, также в качестве запретной можно представить некоторую область, принадлежащую окрестности другого движущегося ЛА). В то же время полет по участкам опорной траектории, находящимся в заштрихованной области, должен быть выполнен, для этого необходимо произвести следующие действия.

Уточнить исходные ППМы, попадающие в разрешенную область и определить крайние точки опорной траектории, находящиеся на ее границе (обозначены P_{i1} и P_{i2} на рис. 4, *а*). Эти точки можно затем принять в качестве новых ППМов. Для изменения направления в точке P_{i1} (рис. 4, *б*) можно будет использовать вираж с радиусом большим, чем запланированный заранее. А для поворота в точке P_{i2} нужно развернуться, наоборот, с меньшим радиусом.

Если расстояние между P_{i1} и P_{i2} невелико и сопоставимо с удвоенным радиусом разворота при постоянной или близкой к ней скорости, то в точке P_{i1} можно запланировать маневр изменения направления, аналогичный исходному. В том же случае, если расстояние (P_{i1}, P_{i2}) достаточно велико, то нужно планировать вывод ЛА на линию пути выбранного вида.

Таким образом, если границы разрешенной зоны были изменены в полете, но основная часть траектории осталась неизменной, СПОС сформирует управляющие сигналы для реализации отдельных маневров, связывающих между собой части исходной траектории. В остальное время полет будет выполняться в штатном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка бортовых систем предупреждения опасных режимов полета является актуальной задачей. СПОС, в основу реализации которой поставлены принципы реализации трех перечисленных функций, сможет обеспечить безопасное автоматическое управление одним или несколькими ЛА. Возникновение критических режимов будет возможно либо при резком и значительном изменении внешних условий, либо при непосредственном воздействии оператора на органы управления ЛА; в этом случае сработают встроенные в АП автоматы ограничений и СППР.

Применение предлагаемой системы поможет повысить эффективность дистанционного и автоматического управления ЛА и прежде всего БЛА. Для пилотируемых ЛА такие программные устройства позволят более точно изменять координаты самолета, чем это достигается при ручном пилотировании или при ручном задании в автопилот управляющих сигналов, соблюдая при этом необходимые меры предосторожности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдаткин В. М. Методы и средства построения бортовых информационно-управляющих систем обеспечения безопасности полета. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. 350 с. ISBN 5-7579-0558-1. [V. M. Soldatkin, *Methods and tools for building onboard information control systems ensure flight safety*. Kazan': KGTU, 2004.]
2. Берестов Л. М. и др. Система поддержки экипажа в опасных ситуациях: патент на изобр. № 2128854. Заявка: 96117636/28, 30.08.1996; опубликовано: 10.04.1999. [L. M. Berestov, et al., Patent No 2128854 *The crew Support System in dangerous situations*. Request: 96117636/28, 30.08.1996; published on: 10.04.1999.]
3. Неугодникова Л. М. Распределенная система управления гражданским беспилотным авиационным комплек-

сом // *Авиакосмическое приборостроение*. 2013. № 11. С. 50–58. [L. M. Neugodnikova, "Distributed control system the civil unmanned aircraft complex," (in Russian), *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, no. 11, pp. 50-58, 2013.]

4. **Петунин В. И., Неугодникова Л. М.** Синтез системы автоматического управления углом курса и ограничения нормальной перегрузки летательного аппарата // *Авиакосмическое приборостроение*. 2012. № 11. С. 10–18. [V. I. Petunin, L. M. Neugodnikova, "Synthesis of automatic control course angle and normal overload restriction system of aircraft," (in Russian), *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, no. 11, pp. 10-18, 2012.]

5. **Петунин В. И., Неугодникова Л. М.** Система автоматического управления углом курса и ограничения нормальной перегрузки летательного аппарата: патент на изобр. № 2503585. Заявка № 2012120843/11 от 21 мая 2012; опублик. 10.01.2014. [V. I. Petunin, L. M. Neugodnikova, *Automatic control course angle and normal overload restriction system of aircraft*, Request number 2012120843/11 of 21 May 2012; published on 10.01.2014.]

6. **Бабиченко А. В. и др.** Распределенный информационно-управляющий комплекс группы многофункциональных летательных аппаратов: патент на изобр. № 2232102. Заявка: 2003130782/11, 21.10.2003; опублик.: 10.07.2004. [A. V. Babichenko, et al., *Distributed information control complex of group multifunctional aircraft*. Request: 2003130782/11, 21.10.2003; published on: 10.07.2004.]

7. **Parunak N. V., Brueckner S. A., Odell J. J.** Swarming coordination of multiple UAV'S for collaborative sensing [Электронный ресурс]. URL: <http://www.jacobstechnology.com/acs/pdf/AIAA03.pdf> (дата обращения 21.01.2014). [N. V. Parunak, S. A. Brueckner, J. J. Odell, *Swarming coordination of multiple UAV'S for collaborative sensing* [Online]. Available: <http://www.jacobstechnology.com/acs/pdf/AIAA03.pdf>]

ОБ АВТОРАХ

ПЕТУНИН Валерий Иванович, проф. каф. инф.-измер. техники. Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информации (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. систем авт. управления, логико-динамических систем, адапт. и интеллект. систем.

НЕУГОДНИКОВА Любовь Михайловна, асп. каф. инф.-измер. техники. М-р техн. и технол. (УГАТУ, 2006). Готовит дис. об авт. управлении беспилотными ЛА.

METADATA

Title: Restriction and the prevention of dangerous regimes at automatic control of movement of aircraft.

Authors: V. I. Petunin, L. M. Neugodnikova.

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: Grifon_love@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 99-104, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The problem of restriction and the prevention of dangerous regimes at FA automatic flight control is considered. It is shown that introduction of automaton of restrictions in a contour of control of object allows to increase functioning safety. The principles of the dangerous situations prevention system organization are offered, to the efficiency of automatic and remote aircraft control increase intended.

Key words: automatic flight control; prevention of critical regimes systems ; limit values restriction.

About authors:

PETUNIN, Valery Ivanovich, Prof., Dept. of information and measuring equipment. Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2011).

NEUGODNIKOVA, Lyubov Michailovna, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of information and measuring equipment. Magister (UGATU, 2006).