

4. *Чень Бошун, Сунь Юки, Фан Джианьхуа, Ван Джун, Ву Джиан.* Низкотемпературные свойства и кристаллическая структура смесей биодизелей // Химия и технология топлив и масел. – 2010. – № 1. – С. 41–44.
5. *Чень Хань, Кун Зен, Хуалинь Линь, Пен Ван.* Выбор депрессорных присадок для дизельных топлив // Химия и технология топлив и масел. – 2010. – № 5. – С. 18–24.
6. *Пепеляев С.Н., Тархов Л.Г., Пепеляев А.С., Рябов В.Г.* Определение оптимальной концентрации депрессорных и диспергирующих присадок в дизельных топливах // Химия и технология топлив и масел. – 2011. – № 5. – С. 54–56.
7. *Кондрашова Н.К.* Влияние синтетических и природных депрессорных присадок на низкотемпературные свойства дизельных топлив разного состава // Химия и технология топлив и масел. – 2012. – № 6. – С. 39–40.
8. *Агаев С.Г., Глазунов А.М., Гуляев С.В., Яковлев Н.С.* Улучшение низкотемпературных свойств дизельных топлив: Монография – Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. – 145 с.
9. *Соломин Б.А., Черторийский А.А., Низаметдинов А.М., Конторович М.Л.* Расширение функциональных возможностей аппаратно-программного комплекса для исследования свойств нефтепродуктов // Межвуз. сборник науч. трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск: УлГТУ, 2010.
10. *Соломин Б.А., Конторович М.Л., Подгорнов А.А.* Вибровискозиметрический датчик повышенной точности // Межвуз. сборник науч. трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск: УлГТУ, 2008.
11. *Энглин Б.А.* Применение жидких топлив при низких температурах. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Химия, 1980. – 208 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Смирнов.

Низаметдинов Азат Маратович – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновский государственный технический университет"; e-mail: anizametdinov@yandex.ru; 432054, г. Ульяновск, ул. Генерала Мельникова, 8, корп. 1, к. 82; тел.: +79176375411; аспирант.

Соломин Борис Александрович – Ульяновский филиал Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук; e-mail: solomin.boris@yandex.ru; 432030, г. Ульяновск, ул. Репина, 37, к. 130; тел.: 8422467009; ведущий научный сотрудник.

Nizametdinov Azat Maratovich – Federal state educational institution of higher senior education "Ulyanovsk state technical University"; e-mail: anizametdinov@yandex.ru; 8, street of General Melnikova, corp.1, k. 82, Ulyanovsk, 432054, Russia; phone: +79176375411; postgraduate student.

Solomin Boris Aleksandrovich – Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radiotechnics and Electronics; e-mail: solomin.boris@yandex.ru; 37, 130, Repin street, Ulyanovsk, Russia; phone: +7422467009; leading researcher.

УДК 681.5

Ю.А. Заргарян, Е.В. Заргарян, А.Д. Коринец, Э.С. Артюхов КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ РЕГУЛЯТОРА*

Описываются показатели работы регулятора, которые представляют собой комплексную оценку, содержащую в себе условия точности и надежности, являющимися одними из основных требований, предъявляемых к работе регулятора. Невыполнение одного из этих требований или неправильная оценка его может привести к полному или частичному отказу автоматической системы, потере времени на восстановление и материальному ущербу. Такое положение выдвинуло на первое место требование обеспечения повы-

* Материалы статьи подготовлены в рамках выполнения работ по гранту Российского научного фонда № 14-19-01533

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты: 12-08-00798-а, 126

и высокой надежности технических устройств (в частности, регуляторов) и в корне изменило понятие об их качестве. Надежность выступает как гарантия заданной точности регулятора, которая должна обеспечиваться нахождением параметров в определенной области в течение заданного времени эксплуатации. Величина этой оценки зависит не только от структуры регулятора и качества его элементов, но и от выбранных критериев и величины их численных значений. В процессе эксплуатации приходится встречаться с целым рядом не учитываемых и неконтролируемых факторов, связанных с условиями работы регулятора, с разными формами его обслуживания и т.д. Поэтому процесс, протекающий в регуляторе в этот период, по своему характеру является случайным. Задача обеспечения заданной точности работы регулятора на требуемый промежуток времени, при нестабильности параметров его элементов, является весьма актуальной.

Регулятор; системы автоматического регулирования; критерии; надежность; точность работы.

Yu.A. Zargaryan, E.V. Zargaryan, A.D. Korinets, E.S. Artiuhov

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE REGULATOR

This article describes the performance of the controller, which represent a comprehensive assessment, containing in itself the conditions of accuracy and reliability are among the key requirements for operating the controller. If one of these, or proper assessment of it can lead to a complete or partial failure of an automatic system recovery time loss and damage. This situation brought to the first requirement to ensure high reliability of technical devices (eg, regulators) and radically changed the concept of their quality. Reliability acts as a guarantee given accuracy regulator, which should be provided by finding the parameters in a certain area within a specified time of operation. The value of this estimate depends not only on the structure of the controller and the quality of its elements, but also on the selected criteria and the value of their numerical values. During the operation is necessary to meet with a number of unaccounted for and uncontrolled factors related to the working conditions of the controller, with different forms of its maintenance and so on. Therefore, the process occurring in the controller during this period, by its nature is random. Given the task of ensuring the accuracy of the controller to the required time, instability in the parameters of its elements is very important.

Regulator; automatic control systems; criteria; reliability; accuracy.

Введение. На практике требования, предъявляемые к регулятору, формулируются в техническом задании на проектирование регулятора. Этап обработки технического задания и получения исходной информации для проведения синтеза регулятора является весьма ответственным, так как именно он определяет направление дальнейшей работы. На этом этапе систематизируются все требования, предъявляемые к регулятору, с целью получения численных значений оценок, по которым будет проводиться расчет. Требования, которым должен отвечать регулятор, можно свести к следующим шести группам. А именно: технические требования, экономические требования, эксплуатационные требования, конструктивные требования, технологические требования, требования безопасности.

Многие из перечисленных групп требований взаимосвязаны и поэтому представляются в неразделенном или в неявном виде. Однако, каждое требование в итоге ограничивает либо выходные координаты регулятора и их производные, либо значения параметров элементов, либо критерии качества, либо то и другое одновременно.

Невыполнение одного из этих требований или неправильная оценка его может привести к полному или частичному отказу автоматической системы, потере времени на восстановление и материальному ущербу. Такое положение выдвинуло на первое место требование обеспечения повышенной надежности технических устройств (в частности, регуляторов) и в корне изменило понятие об их качестве.

Проблема обеспечения и оценки надежности технических устройств, входящих в состав аппаратуры автоматики, является одной из главных задач современной техники. Важность этой проблемы привела к развитию такой важной науки как теории надежности, проблемами и развитием которой в современном мире занимаются такие учёные как: Каштанов В.А., Медведев А.И., Кокушин Н.Н., Тихонов А.А., Петров С.Г., Токарев А.Н., Ушаков И.А., Федотов А.В., Скабкин Н.Г., Шишмарев В.Ю., Яхьяев Н.Я. и многие другие [1–7]. В рамках данной статьи рассматриваются показатели работы регулятора, которые представляют собой комплексную оценку, содержащую в себе условия точности и надежности, являющиеся одними из основных требований, предъявляемых к работе регулятора.

В связи с вышесказанным можно сделать вывод об **актуальности данной статьи**.

Расчет оценки работы регулятора. Выбор структуры и параметров элементов регулятора, при его проектировании, целесообразно проводить с учетом величины оценки параметрической надежности и точности [8].

В качестве оценки параметрической надежности и точности системы примем вероятность удовлетворения регулятором заданных техническими условиями критериев качества при данных условиях эксплуатации в течение требуемого (заданного) периода времени, т.е.

$$P(\eta \leq \varepsilon; t \leq T) = \beta. \quad (1)$$

Как нетрудно заметить, оценка (1) связывает точность и надежность, т.е. одни из основных требований, которые предъявляются к регулятору.

Величина этой оценки зависит не только от структуры регулятора и качества его элементов, но и от выбранных критериев η и величины их численных значений ε .

Выходная координата регулятора $x_i(t)$ под действием случайных входных возмущений и изменений параметров элементов случайным образом изменяет свою величину. Поэтому, если состояние регулятора в каждый момент времени представить n -мерным случайным вектором \bar{a} , составляющие которого являются параметрами элементов регулятора:

$$\bar{a}(a_1, \dots, a_j, \dots, a_n, t), \quad (2)$$

то для удовлетворения заданного качества необходимо, чтобы случайный вектор \bar{a} находился в некоторой области B (рис. 1). Данный подход базируется на методе оптимума номиналов, что отражает новизну исследования.

В общем случае область B представляет собой сложную поверхность в многомерном пространстве. При перемещении вектора \bar{a} в пределах области B оценка регулятора не превосходит допустимого значения, т.е. регулятор выполняет требования технических условий.

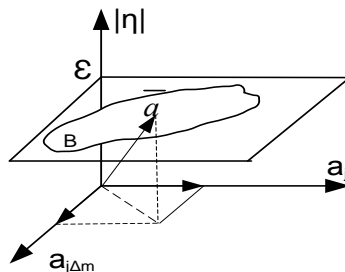


Рис. 1. Вектор \bar{a} характеризует состояние регулятора в каждый момент времени

В этом случае оценка (1) будет эквивалентна требованию:

$$P(\bar{a} \in B; t \leq T) = \beta. \quad (3)$$

Область B представляет собой область допустимых отклонений параметров, в пределах которых не нарушается условие

$$\left. \begin{aligned} \sup \eta_i &\leq \varepsilon_i, \\ \theta &\in \Theta, \\ \xi(t) &\in \Xi(t), \\ a_j(t) &\in A(t), i = 1, \dots, m \end{aligned} \right\},$$

где η_i – критерий оценки работы регулятора; ε_i – численное значение критерия, обусловленное техническими условиями; m – количество критериев; $\xi(t)$ – значения, принимаемые воздействиями; $\Xi(t)$ – множество возможных значений воздействий, ограниченное эксплуатационными требованиями; θ – оператор регулятора; Θ – множество возможных операторов; $a_j(t)$ – значение i -го параметра элемента регулятора; $A(t)$ – множество возможных значений параметров элементов, ограниченное технологическими требованиями.

Таким образом, надежность выступает как гарантия заданной точности регулятора, которая должна обеспечиваться нахождением параметров в определенной области в течение заданного времени эксплуатации.

В силу случайного изменения параметров в процессе работы регулятор практически никогда не работает при своих номинальных параметрах. Кроме того, сама технология изготовления и сборки регулятора и его элементов не может обеспечить точное выполнение результатов расчета. К тому же сам расчет имеет определенные погрешности, в частности, и потому, что он проводится по упрощенной модели системы.

В процессе эксплуатации приходится встречаться с целым рядом не учитываемых и неконтролируемых факторов, связанных с условиями работы регулятора, с разными организационными формами обслуживания и т.д. Поэтому процесс, протекающий в регуляторе в этот период, по своему характеру является случайным.

Часто бывает, что регулятор, удовлетворяющий предъявленным требованиям в начале эксплуатации, в дальнейшем становится непригодным вследствие изменения значений его параметров под действием времени и внешней среды.

Задача обеспечения на требуемый (иногда максимальный) промежуток времени заданной точности работы регулятора при нестабильности параметров его элементов является весьма актуальной.

Изучая процесс в регуляторе, можно уменьшить влияние различных случайных и детерминированных факторов на появление отказов регулятора. Это достигается за счет улучшения контроля состояния системы, осуществлением прогнозирования неблагоприятных событий, совершенствованием организаций профилактических мероприятий, методов обслуживания и проектирования и т.д. Однако, все эти мероприятия могут быть более эффективны, если проведен расчет оптимума номиналов параметров элементов и определены их допустимые отклонения от номиналов [9].

В результате действия на регулятор дестабилизирующих факторов вектор a перемещается в области B . Задача синтеза регулятора и состоит в том, чтобы выбрать такую структуру и такие номинальные значения параметров, при которых вектор a в течение заданного времени эксплуатации с большей вероятностью не вышел бы за пределы области B .

Выбор структуры регулятора влияет на конфигурацию и размеры области B . Выбор номинальных значений параметров заключается в определении таких начальных координат случайного вектора a в области B , время движения из которых до границы области B будет максимальным.

Исследование возможных реализаций случайного процесса перемещения вектора a дает возможность определить вероятность нахождения этого вектора в области B и оценить степень влияния того или иного фактора на работу регулятора. При заданной структуре регулятора значение критерия качества зависит от значений параметров элементов регулятора и внешних воздействий, т.е.

$$\eta = f(a_1, \dots, a_n, \xi), \quad (4)$$

где a_i – значение параметра элемента регулятора; ξ – воздействие на регулятор.

Учитывая, что синтез регулятора обычно проводится при ограниченной априорной информации, как о возможных воздействиях, так и о вариациях параметров элементов в процессе изготовления и эксплуатации, воспользуемся методами теории игр [10, 11] для определения верхней оценки критерия.

Выбираем такое воздействие $\xi_p \in \Xi$, которое дает наихудшее качество, т.е. максимум ошибки при любом из возможных операторов регулятора данного назначения:

$$\eta_0(\xi_p \in \Xi) = \max_{\theta \in \Theta} F[\delta(t)], \quad (5)$$

где $\delta(t)$ – ошибка регулятора; Θ – множество операторов θ для регуляторов одного назначения.

В этих условиях под оптимальным решением следует понимать выбор системы автоматического регулирования с таким оператором, который минимизировал бы критерий η при любых возможных воздействиях:

$$\eta(\theta_0 \in \Theta) = \min F[\delta(t)]. \quad (6)$$

В ряде случаев выбор решений при заданной структуре регулятора сводится к выбору оптимальных численных значений параметров элементов, что является своего рода настройкой системы автоматического регулирования на оптимальный вариант работы [12].

Естественно, что настраивать целесообразно только такую структуру регулятора, в которой можно обеспечить требуемое качество при любых возможных по техническим условиям воздействиях, т.е. при условии

$$\min_{\xi_r \in \Xi} \max_{\theta \in \Theta} \eta \leq \varepsilon \quad (7)$$

Значение критерия η_0 при таком экстремальном воздействии (5) назовем оценкой сверху этого критерия.

Рассматривая экстремальные воздействия ξ , выбранные по мини-максному принципу, мы получаем верхнюю грань оценки действия регулятора при вариации параметров его элементов. При такой постановке критерий качества можно рассматривать как функцию параметров

$$\max \eta = f(a_1, \dots, a_n, \xi_p) = \eta_\delta = f(a_1, \dots, a_n). \quad (8)$$

В этом случае область допустимой вариации параметров B можно представить как пересечение гиперповерхности настройки:

$$|\eta_\delta| = f(a_1, \dots, a_n) \quad (9)$$

с гиперплоскостью заданного качества

$$|\eta(a_1, \dots, a_n)| = \varepsilon. \quad (10)$$

Так как ξ_p представляет собой экстремальное значение воздействия, то область B соответствует верхней грани ошибки.

С учетом вариаций параметров и координат области B выражение (3) может быть вычислено как

$$\beta = \int_T \dots \int_B p(a_1, \dots, a_n, t) da_1, \dots, da_n dt, \quad (11)$$

где $p(a_1, \dots, a_n, t)$ – плотность распределения вероятности n -мерного случайного вектора состояния параметров элементов регулятора.

Следует заметить, что область B должна отвечать и условиям устойчивости, т.е. при вариациях параметров в пределах B регулятор или вся управляемая им система должны работать устойчиво.

Ряд критериев (например, средний квадрат ошибки) существует только для устойчивых систем. Очевидно, область допустимой вариации параметров, удовлетворяющая этим критериям, будет одновременно удовлетворять и условиям устойчивости.

В случае применения для расчетов критериев, не содержащих в себе условия устойчивости, следует провести построение области допустимой вариации параметров B_y , исходя из условия устойчивости.

Следовательно, с учетом B и B_y определим B' как $B' = B \cap B_y$, если не выполняется условие $B \subseteq B_y$.

В процессе синтеза может возникнуть необходимость, чтобы регулятор одновременно удовлетворял нескольким различным критериям качества, которые должны быть в определенных пределах.

Если критерии равноценны и требуется их обязательное совместное выполнение, т.е., например, система должна быть равно надежна по всем критериям качества, то необходимо найти область допустимой вариации параметров, одновременно удовлетворяющую всем критериям [13].

В этом случае рассматриваемые критерии качества представим в виде m гиперповерхностей в $(n+1)$ -мерном пространстве параметров регулятора. По оси критериев η целесообразно выбрать масштаб из условия

$$\varepsilon_i k_i = const = \varepsilon^*; i = 1, \dots, m, \quad (12)$$

где k_i – масштаб оценки η_i .

Тогда гиперплоскость заданного качества (6-10) запишется как

$$|\eta_i(a_1, \dots, a_n)| k_i = \varepsilon^* \quad (13)$$

и для всех оценок будет одна и та же. Пересечение всех гиперповерхностей настройки

$$|\eta_{i0}| = f_i(a_1, \dots, a_n) \quad (14)$$

с гиперплоскостью (13) образует область допустимых значений параметров регулятора, в пределах которой равнонадежно удовлетворяются все оценки, заданные техническими условиями, т.е.

$$B_{COBM} = \bigcap_{i=1}^m B_i, \quad (15)$$

где B_i – область допустимой вариации параметров регуляторов при выполнении η -оценки. С учетом (15) выражение (3) запишется:

$$P(\bar{a} \in B_{COBM}; t \leq T) = \beta. \quad (16)$$

На рис. 2 показана B_{COBM} , образуемая пересечением трех областей B_i , B_{i+1} , B_{i+2} , построенных для двух варьируемых параметров a_j и a_{j+1} и удовлетворяющая трем оценкам η_i , η_{i+1} и η_{i+2} . При этом $\kappa_i \varepsilon_i = \kappa_{i+1} \varepsilon_{i+1} = \kappa_{i+2} \varepsilon_{i+2} = \varepsilon^*$.

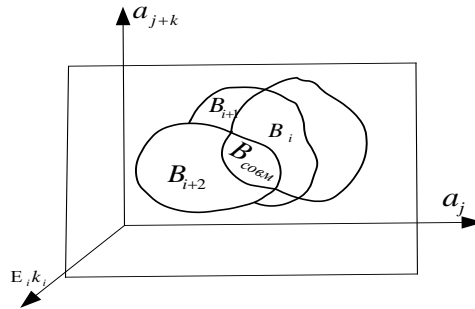


Рис. 2. Совмещённая область B_{COBM} образуется пересечением трёх областей B_i , B_{i+1} , B_{i+2} , построенных для двух варьируемых параметров

Таким образом, рассмотренная оценка работы регулятора (1) является комплексной оценкой, которая содержит в себе необходимые нам условия точности и надежности.

Выводы. Анализ оценки параметрической надежности и точности работы регулятора, записанной в виде (11), позволяет сделать следующие выводы:

1. Выбор области интегрирования T определяется требуемым временем функционирования регулятора. В пределах этого промежутка времени с определенной вероятностью гарантируется нахождение параметров в области B , т.е. в допустимых пределах.

2. Величина области B зависит от структуры регулятора и численного значения ε . При этом, если синтез проводится при соблюдении условия (7), то область B соответствует верхней границе выбранной оценки. В пределах области B можно выбрать такие номинальные значения параметров элементов регуляторов, отклонения от которых в течение времени эксплуатации T под действием дестабилизирующих факторов не превысят допустимые пределы.

3. Подынтегральное выражение в виде плотности распределения вероятности $p(a_1, \dots, a_n, t)$ отражает свойства и взаимосвязь реальных элементов, из которых строится регулятор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Капитанов В.А., Медведев А.И. Теория надежности сложных систем. – 2-е изд., перераб. – М.: Физматлит, 2010. – 608 с.
2. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 559 с.
3. Токарев А.Н. Основы теории надежности и диагностика. – Барнаул: Изд-во Алт., 2008. – 168 с.

4. Ушаков И.А. Теории надежности систем. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.
5. Федотов А.В., Скабкин Н.Г. Основы теории надежности и технической диагностики. – Омск: Изд-во Кн. изд-во, 2010. – 364 с.
6. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.
7. Яхьяев Н.Я., Кораблин А.В. Основы теории надежности и диагностика. – М.: Издательский центр «Академии», 2009. – 256 с.
8. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 559 с.
9. Заргарян Ю.А. Применение метода оптимума номинала в условиях неполноты данных. Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия «Общие вопросы радиоэлектроники» // Научно-технический сборник. Вып. 1. – Москва-Таганрог: МАИ-ТНИИС, 2011. – С. 108-116
10. Раскин М. А. Введение в теорию игр // Летняя школа «Современная математика». – Дубна, 2008.
11. Колесник Г.В. Теория игр. Учебное пособие. – 4-е изд. – М.: Либроком, 2014. – 187 с.
12. Финаев В.И., Заргарян Ю.А. Метод оптимизации параметров динамического процесса в условиях неполноты данных // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 3. – С. 140-145.
13. Заргарян Е.В., Игнатьев В.В. Нечетко оптимальные многокритериальные оценки энергетических объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 1 (102). – С. 136-140.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Заргарян Юрий Артурович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: jury.zargaryan@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89604606046; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; ассистент.

Заргарян Елена Валерьевна – e-mail: e.zargaryan@gmail.com; тел.: 89064179006; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Коринец Анастасия Дмитриевна – e-mail: an.korinets@gmail.com; тел.: 89034700054; кафедра систем автоматического управления; студентка.

Артюхов Эрнест Сергеевич – e-mail: art-eric@mail.ru; тел.: 89281798141; кафедра систем автоматического управления; студент.

Zargaryan Yury Artyrovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: jury.zargaryan@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79604606046; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zargaryan Elena Valerevna – e-mail: e.zargaryan@gmail.com; phone: +79064179006; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; assistant.

Korinets Anastasia Dmitrievna – e-mail: an.korinets@gmail.com; phone: +79034700054; the department of automatic control systems; student.

Artiuhov Ernest Sergeevich – e-mail: art-eric@mail.ru; phone: +79281798141; the department of automatic control systems; student.