

УДК 681.5.07

МЕРЫ ОЦЕНОК ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ

©А.А. Коробов, Л.Г. Гамова, Е.И. Глинкин

Ключевые слова: меры оценки; эффективность регулирования; автоматизация микропроцессорных средств; симметричный и прецизионный критерии.

Проведен анализ мер оценок эффективности мультипликативно-симметричного, интегрального и прецизионных критериев оптимального регулирования динамических характеристик для автоматического контроля микропроцессорными измерительными средствами в адаптивном диапазоне.

Автоматизация микропроцессорных средств технологической безопасности и компьютерных биомедицинских анализаторов требует максимальную оперативность с минимальной погрешностью в адаптивном диапазоне аналитического контроля, что ограничено стандартными законами ПИД-регулирования, требующими трудоемкое аппаратное управление оператором коэффициентов оптимизации законов в адаптивном диапазоне аналитического контроля [1–3]. Позиционный (П), интегральный (И) и дифференциальный (Д) законы регламентируют ширину диапазона, уровень точности и предельное быстродействие из-за аппаратно управляемых коэффициентов ПИД-регулирования, настраиваемых на середину диапазона с требуемыми оперативностью или точностью за счет структурной и параметрической оптимизации градуировочной характеристики. Структурную оптимизацию определяют алгоритмы законов регулирования посредством параметрической оптимизации коэффициентов динамических характеристик, которыми служат аппаратно управляемые коэффициенты ПИД-регулирования. Взаимоисключающие требования к точности, оперативности и диапазону приводят к среднестатистической градуировочной характеристике с итерационным алгоритмом последовательного приближения, предполагающим высокочастотных специалистов автоматизированного управления и метрологических измерений, аналитического контроля и биомедицинской техники.

Это нивелирует гибкость архитектуры, универсальность математического обеспечения и эффективность метрологических средств интеллектуальных систем безопасности, ограничивая их до уровня жесткой структуры с фиксированной градуировкой примитивных тестеров [2–3] с регламентированной точностью стандартных измерений в узком диапазоне регулирования. Ручная настройка коэффициентов ПИД-регулирования требует множество итераций последовательным приближением к произвольным параметрам с ненормированными случайными мерами и в итоге характеризуется грубой воспроизводимостью и низкой достоверностью, исключающими автоматическое регулирование [2].

Цель: изучить эффективность прецизионного и МС-критериев П-регулирования со стандартным критерием интегрального регулирования.

Задачи:

- 1) проанализировать законы регулирования для структурной и параметрической оптимизации динамических характеристик;
- 2) выяснить влияние стандартного критерия на гибкость архитектуры микропроцессорных средств;
- 3) провести качественный и количественный анализ критериев;
- 4) провести анализ степенных критериев для выбора наиболее эффективного;
- 5) оценить метрологические характеристики стандартного критерия;
- 6) проанализировать эффективность симметричного критерия.

1. ПОЗИЦИОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Относительная погрешность при стандартном критерии [1–3] находится по формуле:

$$\varepsilon_1 = \frac{E - U}{E}. \quad (1)$$

Отношение случайных измерений X_{CG} к нормированному по симметрии эквиваленту X_{CA} :

$$\varepsilon_2 = \frac{X_{CA} - X_{CG}}{X_{CA}},$$

что соответствует для двух измерений сигналов E и U выражению

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{\sqrt{EU}}{\frac{1}{2}(E + U)}. \quad (2)$$

Алгоритм вычисления погрешности прецизионного критерия вычисляется как квадрат отношения [2–3] случайных измерений X_{CG} к нормированному по симметрии эквиваленту X_{CA} :

$$\varepsilon_3 = 1 - \left(\frac{X_{CG}}{X_{CA}} \right)^2 = \frac{X_{CA}^2 - X_{CG}^2}{X_{CA}^2},$$

и для двух измерений сигналов E и U это соответствует выражению

$$\varepsilon_3 = 1 - \frac{EU}{\left[\frac{1}{2}(E+U) \right]^2}. \quad (3)$$

Средние геометрическая и арифметическая оценки находят по формулам:

$$X_{CG} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n U_j} = \sqrt{EU} \quad (3a)$$

т. к. для двух переменных $n = 2$;

$$X_{CA} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_j = \frac{1}{2}(E+U). \quad (3b)$$

Раскрывая скобки в выражении

$$\varepsilon_3 = \frac{\frac{1}{2}(E^2 - 2EU + U^2)}{\frac{1}{2}(E+U)^2},$$

после преобразований получаем:

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 &= \left(\frac{1}{2}(E^2 + U^2) + \frac{EU}{2} - EU \right) / \frac{(E+U)^2}{2} = \\ &= \frac{(E^2 - 2EU + U^2)}{(E+U)^2}, \end{aligned}$$

алгоритмом оценки прецизионной погрешности служит квадрат отношения [2]:

$$\varepsilon_3 = \left(\frac{E-U}{E+U} \right)^2. \quad (4)$$

Следовательно, алгоритм вычисления погрешности прецизионного критерия представляет квадрат отношения разности измерений к нормированному по симметрии эквиваленту их суммы.

2. СРАВНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Интегральный критерий регулирования [2–3] находится как сумма разностей текущего и начального показателей величины регулирования Δ и рассчитывается по формуле:

$$I_H = k_H \sum_{i=1}^n \Delta_i. \quad (5)$$

Разница $\Delta = E - U$ может быть как положительной, так и отрицательной согласно алгоритму И-регулирования

$$\text{если } I_n \begin{cases} > \\ \leq \end{cases} 0 \text{ то } \tau_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \Rightarrow I_n = \begin{cases} +I_i \\ -I_i \end{cases},$$

тогда закон И-регулирования представляют выражением

$$I_{ni} = k_n \sum_{j=1}^i \varepsilon_j, \text{ где } \varepsilon_j = 1 - Q_j. \quad (6)$$

Для двух значений среднее геометрическое и среднее арифметическое рассчитывают по формулам (3a) и (3b) соответственно, причем относительная погрешность ε_j тождественна прецизионному критерию (3).

Найдем наиболее подходящий коэффициент, при котором будет наблюдаться оптимальный процесс регулирования.

Исследование графиков приведено в табл. 1.

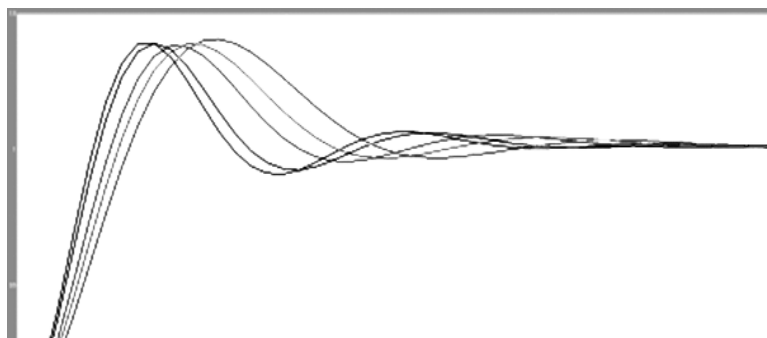


Рис. 1. И-регулирование при k в промежутке от 0,8 до 2

Таблица 1

Оптимизация k

k	Погрешность при $t = 0,5$	Время при погрешности: 0,5 СМК	
1	0,25	0,123	0,03075
1,2	0,11	0,120	0,01320
1,4	0,03	0,114	0,00342
1,6	0,09	0,121	0,01089
1,8	0,10	0,124	0,01240

Из рис. 1 и табл. 1 следует, что наиболее оптимально И-регулятор работает при $k = 1,4$, т. к. его критерий оценки по СМК = 0,003 – минимальный.

Используем МСК и прецизионный критерий [3] для оценки эффективности оптимально отрегулированного критерия интегрального регулирования с подобранным вручную коэффициентом. На рис. 2 показаны графики амплитудно-временных характеристик (АВХ): 1 – прецизионный критерий; 2 – МСК; 3 – стандартный интегральный критерий.

Качественный анализ амплитудно-временных характеристик (рис. 2) показывает, что наиболее оптимальным регулированием является прецизионный критерий. Для количественной оценки точности и оперативности построим графики (рис. 3) погрешностей.

Для проведения анализа по точности зафиксируем значение $t = 0,2$ и оценим значение погрешности при фиксированном времени (табл. 2).

Эффективность по точности рассчитаем из отношения относительных погрешностей прецизионного, МСК и интегрального критериев [1–3], что позволяет узнать, во сколько один критерий эффективнее другого:

Таблица 2

Значения погрешности при фиксированном времени

Регулирование (время = 0,2)	Погрешность
Интегральное	0,8
МСК	0,6
Прецизионное	0,2

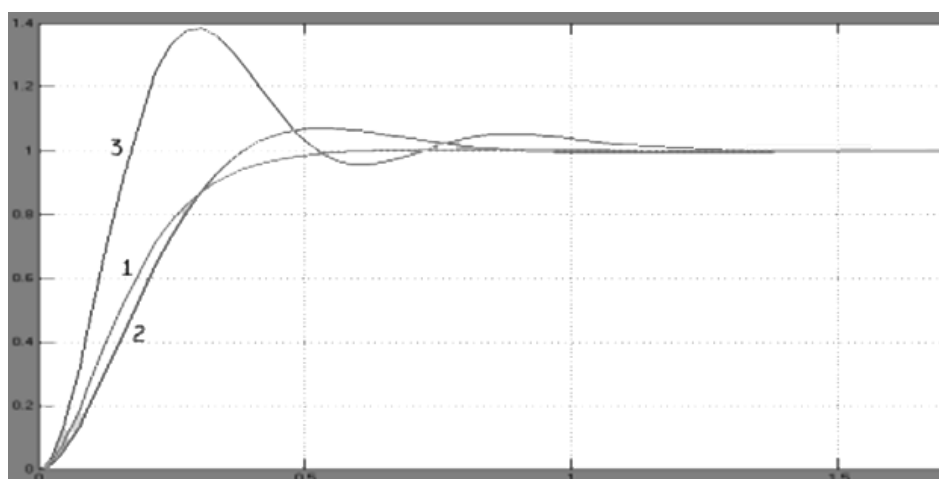


Рис. 2. Амплитудно-временные характеристики

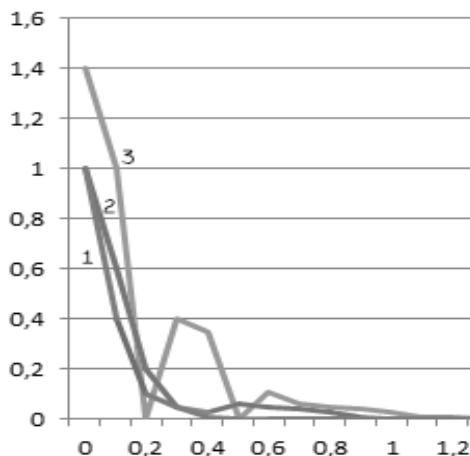


Рис. 3. Погрешность критериев: 1 – прецизионный; 2 – МСК; 3 – интегральный

Таблица 3

Анализ оперативности

Регулирование (погрешность = 0,1)	Значение t , с
Интегральное	1,25
МСК	0,4
Прецизионное	0,2

$$E_1 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{0,8}{0,6} = 1,3,$$

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} = \frac{0,8}{0,2} = 4.$$

Количественный анализ табл. 2 показывает, что прецизионный критерий лучше интегрального по точности в 4 раза, а МСК лучше в 1,3 раза.

Для анализа оперативности зафиксируем уровень 0,1 погрешности и оценим текущее значение времени (табл. 3).

Количественный анализ табл. 3 погрешности показывает, что прецизионный критерий лучше интегрального по оперативности в 6,25 раза, а МСК лучше в 3,13 раза.

3. СТЕПЕННЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ

Построим амплитудно-временные характеристики для выбора оптимального критерия ε_i с i -ми значениями ($i = 1, 10$) степени [3]:

$$\varepsilon_i = \left(\frac{E-U}{E+U} \right)^i.$$

На рис. 4 показаны графики амплитудно-временных характеристик регулирования, где желтым показан

Таблица 4

Погрешность

Регулирование (время = 0,2)	Погрешность E_i
Степенное ($i = 1$)	0,32
Степенное ($i = 2$)	0,19
Степенное ($i = 3$)	0,18
Степенное ($i = 4$)	0,175
Степенное ($i = 5$)	0,171
Степенное ($i = 6$)	0,168
Степенное ($i = 7$)	0,164
Степенное ($i = 8$)	0,161
Степенное ($i = 9$)	0,157
Степенное ($i = 10$)	0,15

график квадратичного критерия при $i = 2$, а зеленым – для степенных критериев при i от 1 до 10.

Качественный анализ рис. 4 показывает повышение эффективности регулирования справа налево по увеличению степени АВХ. Как видно из графиков, чем выше значение степени, тем меньше время выхода на режим.

Построим график погрешности для количественной оценки критериев (рис. 5).

Для количественного анализа зафиксируем значение $t = 0,2$ и оценим значение погрешности E_i при фиксированном времени (табл. 4).

Эффективность по точности рассчитаем из отношения относительных погрешностей прецизионного, МСК и интегрального [1–3] критериев (рис. 3, табл. 2), что позволяет узнать, во сколько один критерий эффективнее другого. Исходя из табл. 4, делаем вывод, что по погрешности степенное регулирование эффективнее в 2,1 раза при $i = 10$, и в 1,7 раза при $i = 3$.

Для анализа оперативности зафиксируем уровень 0,2 погрешности и оценим текущее значение времени (табл. 5).

Анализ оперативности показывает, что прецизионный критерий при $i = 10$ эффективнее критерия при $i = 1$ в 1,45 раза и эффективнее критерия при $i = 3$ в 1,36 раза.

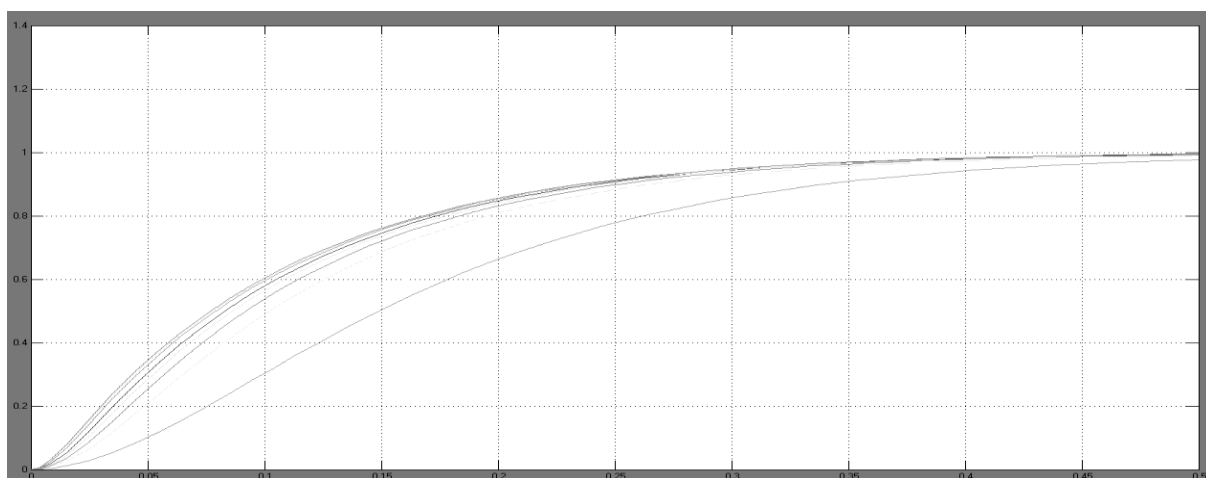


Рис. 4. Сравнение прецизионных критериев с разными степенями

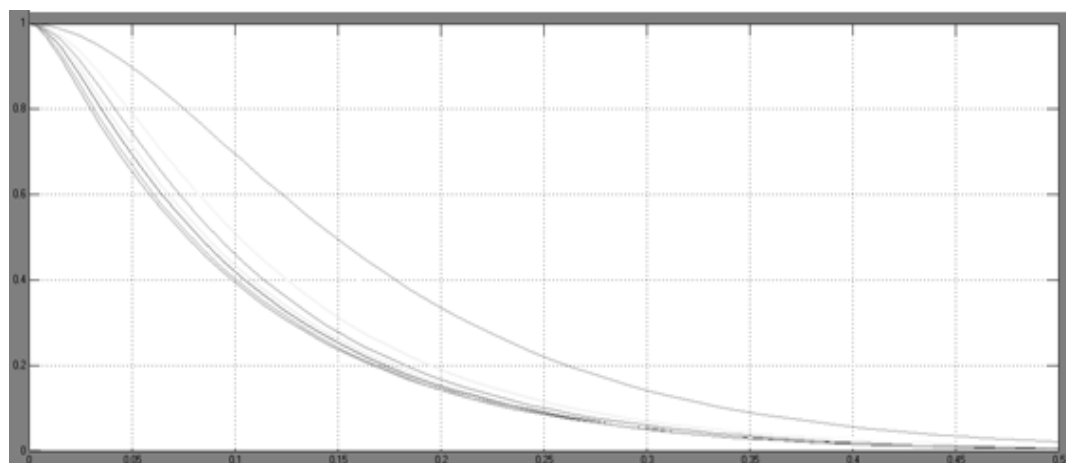


Рис. 5. Погрешности степенных и прецизионного критериев

Таблица 5

Оперативность

Регулирование (погрешность = 0,1)	Значение t , с
Степенное ($i = 1$)	0,33
Степенное ($i = 2$)	0,245
Степенное ($i = 3$)	0,241
Степенное ($i = 4$)	0,239
Степенное ($i = 5$)	0,237
Степенное ($i = 6$)	0,235
Степенное ($i = 7$)	0,233
Степенное ($i = 8$)	0,231
Степенное ($i = 9$)	0,229
Степенное ($i = 10$)	0,227

4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПО ТОЧНОСТИ И НЕЛИНЕЙНОСТИ

Эффективность по точности η_ϵ несложно определить из сопоставления предельной погрешности $\mathcal{E}_1^*$ П-закона с оптимальной погрешностью $\mathcal{E}_2^*$ симметричного регулирования, представленных системой уравнений [2]:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_1^* = k, \\ \mathcal{E}_2^* = \frac{m-1}{m+1}. \end{cases} \quad (7)$$

Поделим первое уравнение системы на второе и выразим эффективность по точности

$$\eta_\epsilon = \frac{\mathcal{E}_1^*}{\mathcal{E}_2^*} = \frac{k(m+1)}{m-1}, \quad (7a)$$

откуда находим зависимость погрешности

$$\mathcal{E}_1^* = \frac{k(m+1)}{m-1} \mathcal{E}_2^*. \quad (76)$$

Зависимость (76) показывает, что погрешность стандартного регулирования $\mathcal{E}_1^*$ в k – раз выше погрешности $\mathcal{E}_2^*$ симметричного критерия, соответствующего нулевой мере при оптимальном регулировании, когда переменная в пределе стремится к единичной норме.

Эффективность по нелинейности η_η найдем из сопоставления выражения η_1^* к эквиваленту η_2^* [1] согласно системе уравнений

$$\begin{cases} \eta_1^* = \frac{m-1}{m}, \\ \eta_2^* = \frac{2}{m+1}. \end{cases} \quad (8)$$

Из отношения уравнений системы вычислим эффективность η_η по нелинейности регулирования

$$\eta_\eta = \frac{\eta_1^*}{\eta_2^*} = \frac{(m-1)(m+1)}{2m}, \quad (8a)$$

откуда находим зависимость нелинейностей

$$\eta_1^* = \frac{m^2-1}{2m} \eta_2^*. \quad (86)$$

Из анализа зависимости (86) следует для предельного значения переменной $m \rightarrow 1$ и оптимального эквивалента $\eta_2^* = 1$ приближение стандартной нелинейности $\eta_1^* = 0$ к нулю, что противоречит автоматическому регулированию в адаптивном диапазоне аналитического контроля.

Количественная оценка для предельной закономерности $m^* \rightarrow 1$ сведена в табл. 6 и 7, отражающие погрешности $\mathcal{E}_1^*$ и $\mathcal{E}_2^*$, нелинейности η_1^* и η_2^* и эффективности по точности η_ϵ и нелинейности η_η .

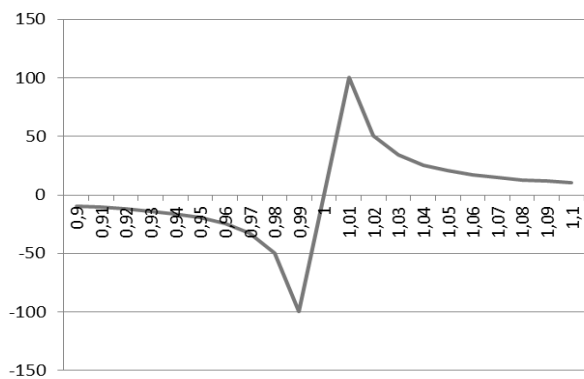


Рис. 6. Эффективность по точности

На рис. 6 показан график эффективности по точности. Из анализа рис. 6 следует, что наибольшей эффективности регулирование достигает при значениях m , близких к 0,9 и 1,1. При значениях m ,

приближающихся к 1, эффективность по точности резко уменьшается.

На рис. 7 показан график эффективности по нелинейности.

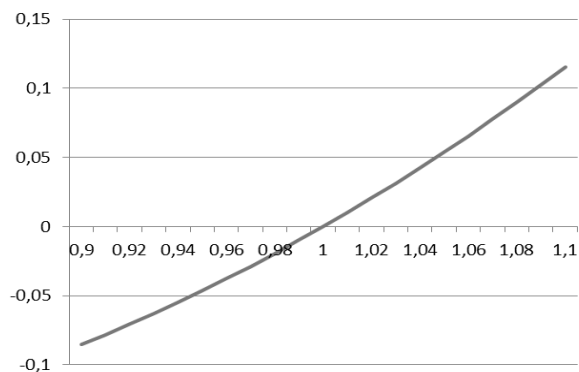


Рис. 7. Эффективность по нелинейности

Таблица 6

Стандартный критерий

m	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
$\varepsilon_1, \%$	0,89	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
m	1,1	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1
$\varepsilon_1, \%$	1,099	1,089	1,079	1,069	1,059	1,049	1,039	1,029	1,019	1,009	0,99

Таблица 6.1

Эффективность по точности

m	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
η_ε	-9,5	-10,6	-12	-13,8	-16,1	-19,5	-24,5	-32,83	-49,5	-99,5	0
m	1	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,1
η_ε	0	100,5	50,5	33,83	25,5	20,5	17,16	14,79	13	11,61	10

Таблица 7

Симметричный критерий

m	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
$\varepsilon_2, \%$	0,84	0,22	0,17	0,13	$9,57^{-2}$	$6,28^{-2}$	$4,17^{-2}$	$2,32^{-2}$	$1,02^{-2}$	$2,53^{-3}$	0
m	1,1	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1
$\varepsilon_2, \%$	0,23	0,19	0,15	0,11	$8,48^{-2}$	$5,95^{-2}$	$3,85^{-2}$	$2,18^{-2}$	$9,8^{-3}$	$2,48^{-3}$	0

Таблица 7.1

Эффективность по нелинейности

m	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
η_η	-0,08	-0,078	-0,07	-0,06	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,019	-0,01	0
m	1	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,1
η_η	0	0,01	0,02	0,03	0,042	0,053	0,07	0,08	0,09	0,1	0,12

Анализ табл. 6 и 7 численно доказывает низкую точность стандартного критерия из-за неопределенности нелинейности (табл. 6), требующего подстройки фиксированного коэффициента П-регулирования в диалоговом режиме оператора, исключающей автоматизацию адаптивного контроля, в отличие от симметричного критерия с гибким регулированием в адаптивном диапазоне автоматического контроля за счет оптимизации (табл. 7) относительной погрешности и нелинейности к нормируемым эквивалентам, соответствующим нулевой и единичной мере, согласно аналитическим закономерностям оптимизации.

ВЫВОДЫ

1. Структурную оптимизацию микропроцессорных средств и компьютерных анализаторов определяют законы регулирования посредством параметрической оптимизации коэффициентов динамических характеристик, которыми служат аппаратно управляемые коэффициенты ПИД-регулирования. Это нивелирует гибкость архитектуры, универсальность математического обеспечения и эффективность метрологических средств интеллектуальных систем безопасности, ограничивая их до уровня жесткой структуры с фиксированной градуировкой примитивных тестеров с регламентированной точностью стандартных измерений в узком диапазоне регулирования.

2. Алгоритм вычисления погрешности прецизионного критерия представляет квадрат отношения разности измерений к нормированному по симметрии эквиваленту их суммы.

3. Проведен сопоставительный анализ мер оценок эффективности по мультипликативно-симметричному, интегральному и прецизионным критериям для анализа эффективности каждой меры, из чего ясно, что прецизионный критерий лучше по погрешности интегрального в 4 раза, а МСК – в 1,3 раза, по оперативности лучше интегрального в 6,25 раза, МСК – в 3,13 раза.

4. Анализ степенных критериев показывает наибольшую эффективность по погрешности (в 2,3 раза) и времени выхода на режим (в 3 раза) соответственно с увеличением степени.

5. Показана низкая точность стандартного критерия из-за неопределенности нелинейности, требующего подстройки фиксированного коэффициента П-регулирования в диалоговом режиме оператора, что исключает автоматизацию адаптивного контроля.

6. Доказана высокая эффективность симметричного критерия с гибким регулированием в адаптивном диапазоне автоматического контроля за счет оптимизации относительной погрешности и нелинейности к нормируемым эквивалентам, соответствующим нулевой и единичной мере, согласно аналитическим закономерностям оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глинкин Е.И. Техника творчества: монография. Тамбов: ТГТУ, 2010. 168 с.
2. Коробов А.А., Глинкин Е.И. Меры оценки регулирования температуры // Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: ВГТУ, 2014. Ч. 1. 254 с.
3. Глинкин Е.И. Оптимальные меры оценки эффективности // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2014. Т. 19. Вып. 6. С. 1863-1869.

Поступила в редакцию 3 апреля 2015 г.

Korobov A.A., Gamova L.G., Glinkin E.I. MEASURE EVALUATION OF EFFECTIVE REGULATION

The analysis of the measures of effectiveness of assessments multiplicative and symmetric, integral and precise criteria for the optimal control of dynamic characteristics for the automatic control of microprocessor of measuring means in the adaptive range.

Key words: measures of evaluation; the effectiveness of control; automation of microprocessor means; symmetrical and precise criteria.

Коробов Артем Андреевич, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, аспирант, кафедра биомедицинской техники, e-mail: korobov91@gmail.com

Korobov Artem Andreevich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Post-graduate Student, Bio-medical Technics Department, e-mail: korobov91@gmail.com

Гамова Людмила Геннадиевна, Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, г. Елец, Российская Федерация, кандидат биологических наук, доцент кафедры биомедицинской жизнедеятельности и основы медицинских знаний, e-mail: bmt@nnn.tstu.ru

Gamova Lyudmila Gennadiyevna, Yelets State University named after Ivan Bunin, Yelets, Russian Federation, Candidate of Biology, Associate Professor of Biomedical Life and Basis of Medical Knowledge Department, e-mail: bmt@nnn.tstu.ru

Глинкин Евгений Иванович, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор кафедры биомедицинской техники, e-mail: bmt@nnn.tstu.ru

Glinkin Evgeniy Ivanovich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Doctor of Technics, Professor of Bio-medical Technics Department, e-mail: bmt@nnn.tstu.ru