

КОМПЛЕКСНЫЙ КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

С.П. ГЛУШКО, Н.А. ЧИЧУА, К.С. БЕДА

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
электронная почта: sputnik_s7@mail.ru*

В статье описан вариант способа оптимизации системы управления автоматизированным электроприводом металлообрабатывающих станков и технологических комплексов, получение комплексного критерия качества цифровых регуляторов методом экспертных оценок на основе анкетирования специалистов в области систем управления автоматизированным электроприводом.

Ключевые слова: электромеханические системы, автоматизированный электропривод, технологический комплекс, многокритериальная оптимизация, экспертная оценка, показатель качества, ранжирование, коэффициент конкордации, комплексный критерий качества.

К приводам подач металлообрабатывающих станков и различных технологических комплексов предъявляются высокие требования по диапазону регулирования, а также по статическим и динамическим характеристикам [1]. Это обуславливает актуальность создания автоматизированных приводов подач с учетом следующий требований: реализация на единой аппаратной базе сложных нелинейных алгоритмов регулирования для получения оптимальных характеристик; автоматическая настройка привода; автоматическая диагностика состояния привода и его элементов; коррекция погрешностей ходового винта, измерительного преобразователя, зазоров в передаче и т.д.

Важнейшим, но недостаточным условием практической пригодности системы автоматического регулирования является ее устойчивость, понятие устойчивости показывает наличие или отсутствие затухания переходного процесса в системе.

Однако характер затухания переходного процесса может быть самым разнообразным. Кроме того, регулируемый параметр может иметь различные отклонения от заданного значения в установившемся режиме. Следовательно,

необходимо оценить качество процессов, протекающих в системе автоматического регулирования электромеханических систем.

Под качеством регулирования понимают свойство системы автоматического регулирования поддерживать с достаточными точностью и быстродействием заданный закон изменения регулируемого параметра.

Из возможных показателей качества можно выделить несколько наиболее существенных, которые в достаточной мере характеризуют работу систем автоматического регулирования электромеханических систем.

1. Длительность переходного процесса t_p – интервал времени с момента подачи ступенчатого входного сигнала до момента окончания переходного процесса. Обычно считают переходный процесс законченным, если регулируемый параметр отличается от заданного не более чем на 5%. Время переходного процесса характеризует быстродействие системы и зависит от ее динамических свойств и числа входящих в ее состав звеньев. С увеличением числа звеньев быстродействие обычно уменьшается. В дальнейшем исследовании этот показатель обозначен U_1 .

2. Перерегулирование σ (%) представляет собой отношение разности максимального отношения регулируемого параметра и установившегося значения к установившемуся значению $\gamma_{уст}$.

$$\sigma = \sigma \cdot \frac{\gamma_{max} - \gamma_{уст}}{\gamma_{уст}} \cdot 100$$

Большое перерегулирование (выброс) вызывает чрезмерные силы в механических и перенапряжения в электрических узлах систем автоматического регулирования.

Для большинства систем перерегулирование ограничено: $\sigma \leq 10-30\%$. В дальнейшем этот показатель обозначен U_2 .

3. Статическая ошибка (%) представляет собой отношение разности между заданным U_3 и установившимся (фактическим) значениями регулируемого параметра к установившемуся значению $\gamma_{уст}$.

$$\sigma = \frac{(\gamma_3 - \gamma_{уст}) \cdot 100}{\gamma_{уст}} \cdot \quad (1)$$

Статическая ошибка характеризует точность регулирования в установившемся режиме.

В астатических системах $\sigma = 0$, в статических $\sigma \leq 3 + 5\%$. В дальнейшем исследовании этот показатель обозначаем Y_3 .

4. Частота колебаний в переходном процессе определяется числом колебаний ν регулируемого параметра за время переходного процесса. Обычно число колебаний $\nu = 1,5 \div 2$. В дальнейшем исследовании этот показатель обозначаем Y_4 .

Совместный учет каждого из перечисленных показателей качества предполагает многокритериальную оптимизацию. При этом на разных этапах технологического процесса в конкретных установках ранжирование по приоритетности различных критериев оптимальности может изменяться [2]. Кроме того, создание автоматизированных приводов с цифровыми регуляторами и многокритериальной оптимизацией процессов затрудняется недопустимостью осуществления пробных движений в большинстве, например, металлообрабатывающих станков и технологических комплексов сложностями определения аналитических связей параметров системы с оптимизируемыми показателями качества управления процессами [2].

Известные варианты решения оптимизации систем управления не универсальны, ориентированы на конкретные типовые структуры и не учитывают особенности характеристик конкретных объектов управления.

Поэтому в качестве комплексного критерия качества цифровых регуляторов предложено использовать выражение вида [3, 4, 5].

$$Q = \sum_{j=1}^n a_j \cdot Y_j \quad (2)$$

где Q – комплексный критерий качества;

Y_j - j-й показатель качества;

a_j - весовой коэффициент j-го показателя качества.

Для определения численных значений весовых коэффициентов использован метод экспертных оценок. Выполнено анкетирование специалистов в области систем управления автоматизированного электропривода и получено 19 анкет с ранжированными показателями качества. Результаты опроса представлены в таблице 1.

Таблица 1- Результаты анкетирования

Специалист i	Экспертные оценки показателей качества управления электромеханическими системами $Y_{i,j}$ i-го специалиста				Среднее значение показателей качества i-го специалиста
	$Y_{i,1}$	$Y_{i,2}$	$Y_{i,3}$	$Y_{i,4}$	
1	1	3	2	4	2,5
2	1	2	4	3	2,5
3	2	3	1	4	2,5
4	2	1	3	4	2,5
5	4	2	1	3	2,5
6	3	1	2	4	2,5
7	1	2	4	3	2,5
8	3	2	1	4	2,5
9	4	2	1	3	2,5
10	1	2	3	4	2,5
11	1	2	3	4	2,5
12	2	1	3	4	2,5
13	2	3	1	4	2,5
14	2	4	1	3	2,5
15	2	3	1	4	2,5
16	2	3	1	4	2,5
17	4	3	1	2	2,5
18	1	2	3	4	2,5
19	1	2	3	4	2,5
$\sum_{i=1}^m Y_{i,j}$	39	43	39	69	
Среднее значение j-го показателя качества \bar{Y}_j	2,05	2,26	2,05	3,63	

В таблице 1 приведены средние арифметические значения оценки показателей качества i -м специалистом - \bar{Y}_i и среднее значение j -го показателя качества - \bar{Y}_j для 19 анкет.

Для полного извлечения информации из экспертных оценок была использована процедура, предложенная в работе [6]: последовательно ставился и проверялся ряд статистических гипотез, мощность которых убывает от первой к последней. Гипотезы построены таким образом, что отклонение гипотезы означает продолжение исследований, а принятие – их окончание.

Отметим, что у каждого из экспертов не было совпавших рангов, т.е., по их мнению, показатели качества различаются по степени влияния. Поэтому не было необходимости в преобразовании рангов таблицы 1 по методике [6]. Соответственно, отпала гипотеза 1 [6], необходимая для оценки адекватности преобразованных и экспертных рангов.

Гипотеза 2 – нет согласованности во мнениях экспертов. Гипотеза проверяется по коэффициенту конкордации W , характеризующему степень согласованности мнений всех экспертов

$$W = \frac{\sum_{j=1}^n \left\{ \sum_{i=1}^m \left[(Y_{ij}) - \frac{1}{2} \cdot m \cdot (n + 1) \right]^2 \right\}}{\frac{1}{12} \cdot m^2 \cdot (n^3 - n) - m \cdot \sum_{i=1}^m r_i^2} \quad (3)$$

где $r_i = \frac{1}{12} \cdot \sum (t_i^3 - t)$;

t_i - число повторений (совпадений) каждого ранга в ранжировке i -го исследователя;

n - число показателей качества;

m - число обрабатываемых анкет;

Y_{ij} - ранг j -го фактора в i -й строке.

При значении $W=0$ мнения экспертов полностью расходятся, при $W=1$

совпадают. Так как совпадения рангов нет, то $\sum_{i=1}^m T_i = 0$ и значение коэффициента конкордации $W=0,347$.

Оценим достоверность коэффициента конкордации по критерию Пирсона [5]. Для 0,1% уровня значимости при числе степеней свободы $f_1 - n - 1 = 3$ табличное значения критерия Пирсона равно .

Расчетное значение

$$X^2 = m \cdot (n - 1) \cdot w = 19,8.$$

Таким образом, с вероятностью 99,9% можно утверждать, что мнения специалистов хорошо согласовываются при оценке показателей качества управления электромеханических систем.

Гипотеза 3 – влияние различия в оценках весомости показателей существенно.

Гипотеза 4 – влияние различия весомости показателей качества несущественно.

Для проведения дисперсионного анализа по данным таблицы 1 найдено среднее значение рангов по строкам (для i -го специалиста)

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n Y_{i,j}}{n} \tag{4}$$

где $Y_{i,j}$ – ранг, присвоенный i -м экспертом показателю качества.

Среднее значение рангов по столбцам

$$\bar{Y}_j = \frac{\sum_{i=1}^m Y_{i,j}}{m}. \tag{5}$$

При этом среднее значение рангов равно

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{Y}_i}{m}. \tag{6}$$

Используя среднее значение рангов, заполним таблицу двухфакторного дисперсионного анализа (табл. 2).

Таблица 2 – Дисперсионный анализ весомости показателей качества

Компоненты дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия
Между средними по экспертам	$Q_1 = m \sum_{j=1}^n (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2 = 33,03$	$f_1 = n - 1 = 3$	$S_A^2 = \frac{Q_1}{n - 1} = 11,01$
Между средними по показателям качества	$Q_2 = n \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2 = 0$	$f_2 = m \cdot 1 = 18$	$S_B^2 = \frac{Q_2}{m - 1} = 0$
При взаимодействии между факторами	$Q_{13} = \sum_{l=1}^r m \sum_{j=1}^n (Y_{1(l,j)} - (Y_{1(l)} - (Y_{1(j)} - \bar{Y}))^2 = 126$	$f_{10} = (n - 1) \cdot (m - 1) = 54$	

На основе данных таблицы 2 определим отношение спектральных плотностей:

$$F_1 = \frac{S_A^2}{S_{AB}^2} = 4,73,$$

$$F_2 = \frac{S_B^2}{S_{AB}^2} = 0.$$

Результаты сопоставляем с табличными значениями $F_{1-\alpha}$ [7].

Факторы оказывают значимое влияние, если

$$F_1 > F_{1-\alpha},$$

$$F_2 > F_{1-\alpha}. \tag{7}$$

Для $\alpha=0,05$ и числа степеней свободы $f_1=3$ и $f_0 = 54 \rightarrow F_{1-\alpha} = 2,85$.

Для $\alpha=0,05$ и числа степеней свободы $f_2=18$ и $f_0 = 54 \rightarrow F_{1-\alpha} = 1,8$.

Таким образом,

$$F_1 > F_{1-\alpha}$$

$$F_2 < F_{1-\alpha}$$

Что означает возможную зависимость показателей качества при незначительном влиянии рассогласования в показаниях экспертов.

Используем результаты экспертного опроса для расчета коэффициентов весомости показателей качества. Для этого используем метод фиксированной суммы [3].

Коэффициенты весомости определяются по формуле

$$a_j = \frac{\sum_i^m \overline{Y_{ij}}}{\sum_j^m \sum_i^m \overline{Y_{ij}}}, \tag{8}$$

где $\overline{Y_{ij}}$ – преобразованный ранг, присвоенный i -м экспертом j -му параметру. Преобразование ведется так, что минимальный ранг $\overline{Y_{ij}} = 1$ присваивается менее важному, а самому важному показателю, при отсутствии связных рангов – значение 4 [3].

Исследуемые показатели качества имеют следующие коэффициенты весомости:

- длительность переходного процесса $(y_1) - a_1 = 0,286;$
- перерегулирование $(y_2) - a_2 = 0,296;$
- статическая ошибка $(y_3) - a_3 = 0,286;$
- частота колебаний в переходном процессе $(y_4) - a_4 = 0,132;$

При этом полученные коэффициенты удовлетворяют условию

$$\sum_{j=1}^n a_j = 1.$$

Уравнение (2), описывающее комплексный критерий качества, с учетом найденных численных значений весовых коэффициентов принимает окончательный вид.

$$Q = 0,286 \cdot y_1 + 0,296 \cdot y_2 + 0,286 \cdot y_3 + 0,132 \cdot y_4. \tag{9}$$

Таким образом, получен комплексный критерий качества, устанавливающий связь с показателями качества управления электромеханическими системами. Данное уравнение может быть принято за основу при оптимизации систем управления электроприводами металлообрабатывающих станков и технологических комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушко С.П. Обоснование выбора регулируемых приводов приточно-вытяжной вентиляции/ С.П. Глушко, Е.Ю. Стрижков, Н.Ю. Стрижков//Научные труды КубГТУ , КубГТУ.- Краснодар, 2016.- №5. – Режим доступа: <http://ntk.kubstu.ru/file/963>

2. Бейнарович В.А., Уташев К.Т, Ховьков А.К. //Изв. Вуз. Черная металлургия, 1989. №10. С.117-122.

3. Райхман Э.Н., Азгальдов Г.Г. Экспертные Методы в оценке качества товаров.- М.: Экономика, 1974. – 85с.

4. Руководящие технические материалы. Экспериментально-статические методы получения математического описания и оптимизации сложных технологических процессов (ранговая корреляция).- М.: ОКБА, 1966.-27с.

5. Глушко С.П., Денисенко С.Г. Синтез критерия качества биметаллических подшипников скольжения // Конструкционная прочность, долговечность, упрочнение материалов и деталей машин: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. – Волгоград, 1990. – с. 202-204.

6. Розанов Г.В., Френкель А.А. Об одной многоэтажной процедуре формализации априорной информации //Зав. лаб. 1970 №3. – С.319-323.

7. Зажигаев Л.С., Кимьян А.А., Романников Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М.: Атомиздат., 1978.-232с.

REFERENCES

1. Glushko S.P. Obosnovanie vybora reguliruemyykh privodov pritochno-vytyazhnoy ventilyatsii/ S.P. Glushko, E.Yu. Strizhkov, N.Yu. Strizhkov//Nauchnye <http://ntk.kubstu.ru/file/1401>

trudy KubGTU , KubGTU.- Krasnodar, 2016.- №5. – Rezhim dostupa: <http://ntk.kubstu.ru/file/963>

2. Beynarovich V.A., Utashev K.T, Khovkov A.K. //Izv. Vuz. Chernaya metallurgiya, 1989. №10. S.117-122.

3. Raykhman E.N., Azgaldov G.G. Ekspertnye Metody v otsenke kachestva tovarov.- M.: Ekonomika, 1974. – 85s.

4. Rukovodyashchie tekhnicheskie materialy. Eksperimentalno-statische metody polucheniya matematicheskogo opisaniya i optimizatsii slozhnykh tekhnologicheskikh protsessov (rangovaya korrelyatsiya).- M.: OKBA, 1966.-27s.

5. Glushko S.P., Denisenko S.G. Sintez kriteriya kachestva bimetallicheskih podshipnikov skolzheniya // Konstruktsionnaya prochnost, dolgovechnost, uprochnenie materialov i detaley mashin: Tez. dokl. Vsesoyuz. nauch. konf. – Volgograd, 1990. – s. 202-204.

6. Rozanov G.V., Frenkel A.A. Ob odnoy mnogoetazhnoy protsedure formalizatsii apriornoy informatsii //Zav. lab. 1970 №3. – S.319-323.

7. Zazhigaev L.S., Kimyan A.A., Romanninkov Yu.I. Metody planirovaniya i obrabotki rezultatov fizicheskogo eksperimenta. – M.: Atomizdat., 1978.-232s.

COMPLEX CRITERION OF QUALITY OF MANAGEMENT ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

S.P. GLUSHKO, N. A. CHICHUA, K.S. BEDA

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,
e-mail: sputnik_s7@mail.ru*

In article the option of a way of optimization of a control system of the automated electric drive of metalworking machines and technological complexes, obtaining complex criterion of quality of digital regulators by method of expert evaluations on the basis of questioning of experts in the field of control systems of the automated electric drive is described.

Key words: electromechanical systems, the automated electric drive, a technological complex, multicriterian optimization, expert assessment, a quality indicator, ranging, concordance coefficient, complex criterion of quality.