

---

**ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ НА МАКСИМУМ ДОБРОТНОСТИ ПРИ ЗАДАНЫХ ЗАПАСАХ УСТОЙЧИВОСТИ В ГЛАВНОМ И ПОДЧИНЕННОМ КОНТУРАХ**

---

**Введение.** На протяжении многих лет на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» велась работа по развитию теории оптимального баланса добротности и запаса устойчивости многократно интегрирующих систем (МИС) [1]. В рамках этой работы был предложен и обоснован к применению, для условно устойчивых электромеханических систем, комплексный критерий качества максимальной добротности и запаса устойчивости (МДУ), предельно улучшающий баланс конфликтующих показателей [2,3]. Впоследствии также был разработан метод практической настройки на линию МДУ многократно интегрирующих электромеханических систем и метод параметрической оптимизации их электронных моделей во временной и частотной области [4].

Следует отметить, что все вышеперечисленные разработки и исследования проводились в основном на базе систем подчиненного регулирования (СПР) с типовой настройкой подчиненного контура, где в качестве регулируемых параметров выбирались два параметра регулятора внешнего контура управления, а конфликтующими показателями являлись добротность и запас устойчивости всей системы [5]. Однако параметры регулятора внутреннего контура, даже при вариации их по линии равного уровня перерегулирования, также существенно влияют на качество управления главной регулируемой координаты [6]. Таким образом, увеличение числа регулируемых параметров, т.е. учет влияния параметров регуляторов внутренних и внешних контуров, является следующим шагом на пути поиска оптимального баланса добротности и запаса устойчивости МИС.

**Постановка задач исследования.** В данной работе представляется необходимым проверить эффективность комплексного критерия МДУ при оптимизации СПР скорости вариацией параметров всех ее астатических регуляторов. Доказать существование при совместном изменении параметров ПИ регуляторов тока и скорости, характерной для критерия МДУ, точки максимума добротности при заданном запасе устойчивости, где в качестве запаса устойчивости приняты соответствующие перерегулирования в контурах тока и скорости, а под добротностью понимается добротность по ускорению СПР скорости.

Целью данной работы является повышение качества управления СПР скорости современными компьютерными методами оптимизации параметров ее астатических регуляторов тока и скорости по комплексному критерию МДУ [1,2,3].

**Материалы исследования.** В качестве примера рассмотрим СПР скорости из [6] с типовой настройкой контура тока на МО и настройкой контура скорости на симметричный оптимум (СО). Т.к. постановка задачи предполагает параметрическую оптимизацию СПР по критерию МДУ вариацией параметров ПИ регуляторов всех входящих в ее состав контуров, то для двухконтурной СПР скорости речь идет о вариации 2-х параметров регулятора тока и 2-х параметров регулятора скорости. В связи с этим, в коэффициенты усиления ПИ регуляторов тока и скорости введем переменные  $k$  и  $X$ , а в постоянные времени – переменные  $b$  и  $Y$ . Далее  $k, b$  и  $X, Y$  будем называть параметрами регулятора тока и скорости соответственно.

Найдем такую комбинацию  $k, b$  и  $X, Y$ , которая обеспечит максимум добротности контура скорости при желаемых запасах устойчивости в главном и подчиненном контурах. За желаемые запасы устойчивости примем такие значения перерегулирования, которые соответствуют типовым настройкам: в контуре скорости -  $\sigma_{\text{кс}}=53\%$ , а в контуре тока -  $\sigma_{\text{кт}}=4,3\%$ .

Для решения поставленной задачи необходимо:

- 1) произвести настройку параметров  $k$  и  $b$  ПИ регулятора тока по линии равного перерегулирования  $\sigma_{\text{кт}}=4,3\%$ , а настройку параметров  $X$  и  $Y$  ПИ регулятора скорости - по линии МДУ в точку максимума добротности при заданном запасе устойчивости  $\sigma_{\text{кс}}=53\%$ ;
- 2) выписать соответствующие значения параметров  $k, b$  и  $X, Y$ ;
- 3) вывести выражение для расчета добротности по ускорению контура скорости, включающее параметры ПИ регуляторов тока и скорости;
- 4) построить зависимость добротности контура скорости от одного из варьируемых параметров  $k, b, X, Y$  и визуально оценить наличие максимума.

Выбор параметров корректирующего устройства на совместное повышение контурного коэффициента передачи и запаса устойчивости системы удобно производить по так называемым диаграммам качества управления (ДКУ), с линиями равного уровня перерегулирования на плоскости параметров корректирующего устройства [4]. Воспользуемся методом ДКУ для выбора параметров  $k$  и  $b$  ПИ регулятора тока.

Построим ДКУ контура тока в координатах параметров ПИ регулятора тока  $k$  и  $b$  (рис.1), где точка А соответствует настройке на МО с параметрами  $k=1$  и  $b=1$ , а точка minКЮ - соответствует настройке по критерию минимума квадратично-интегральной оценки с параметрами  $k=0,6$  и  $b=2,86$ .

Изолиния перерегулирования 4,3%, значения параметров  $k$  и  $b$  для которой приведены в табл. 1, обозначена жирным пунктиром. Именно по ней будем производить перенастройку ПИ регулятора тока в сторону увеличения параметра  $b$  [6]. Для каждой пары значений  $k$  и  $b$  изолинии перерегулирования 4,3% построим ДКУ контура скорости в координатах параметров ПИ регулятора скорости  $X$  и  $Y$ . Одна из таких диаграмм для  $k=1$  и  $b=1$  приведена на рис. 2.

Здесь жирной линией обозначена линия МДУ. Точка 1 с параметрами  $X=1$  и  $Y=1$  соответствует настройке СПР скорости на СО, а точка 2 с параметрами  $X=1,034$  и  $Y=1,16$  – настройке СПР в точку максимума добротности при заданном запасе устойчивости  $\sigma_{\text{кв}}=53\%$ . Поместим в табл. 1 значения параметров  $k=1$ ;  $b=1$  и  $X=1,034$ ;  $Y=1,16$ . Аналогичным образом найдем соответствующие значения  $X$  и  $Y$  для всех пар значений  $k$  и  $b$  изолинии перерегулирования 4,3% вплоть до  $b=30$ .

Таблица 1 Параметры  $k$ ,  $b$ ,  $X$  и  $Y$  для  $\sigma_{\text{кв}}=53\%$  и  $\sigma_{\text{кв}}=4,3\%$ .

$k$	1	0,98	0,9	0,6	0,4	0,197	0,1015	0,068
$b$	1	1,23	1,55	2,86	4,62	10	20	30
$X$	1,034	1,367	1,68	2,241	2,504	2,7385	2,853	2,88
$Y$	1,16	0,974	0,83	0,74	0,657	0,589	0,5684	0,568

Выведем выражения для расчета добротности по ускорению контура скорости, включающее параметры ПИ регуляторов тока и скорости.

Для этого воспользуемся выражением для расчета коэффициента ошибки по ускорению СПР скорости из [6]

$$\frac{C_2}{2!} = \frac{1+K}{Q} \quad (1)$$

где:  $K = \frac{k \cdot T_m}{2 \cdot T_\mu}$  – коэффициент усиления разомкнутого контура тока;

$$Q = \frac{K \cdot X}{32 \cdot T_\mu} = \frac{X \cdot k \cdot T_m}{64 \cdot T_\mu^2} \quad \text{– коэффициент усиления разомкнутого контура скорости;}$$

$T_m$  – электромеханическая постоянная времени;  $T_\mu$  – малая постоянная времени контура тока.

Выполнив преобразования, запишем выражение для расчета добротности по ускорению СПР скорости

$$D_\varepsilon = \frac{2!}{C_2} = \left( \frac{32 \cdot T_\mu}{X} + \frac{64 \cdot T_\mu^2}{X \cdot k \cdot T_m} \right)^{-1} \quad (2)$$

Как видно из (2), добротность по ускорению СПР скорости является величиной обратной коэффициенту ошибки по ускорению, который пропорционален сумме двух слагаемых. Одно слагаемое зависит только от малой постоянной времени и параметра  $X$  регулятора скорости, а второе – еще и от параметра  $k$  регулятора тока и электромеханической постоянной времени. В целом, величина коэффициента ошибки по ускорению СПР скорости в разной мере зависит как от первого, так и второго слагаемого, в зависимости от соотношения  $T_m / T_\mu$ . Чем больше это соотношение, тем меньший вклад оказывает второе слагаемое на общее значение коэффициента ошибки. Например, при соотношении  $T_m / T_\mu = 10$  второе слагаемое будет меньше первого в 5 раз, а при соотношении  $T_m / T_\mu = 100$  – в 50 раз. Таким образом, появляется возможность уменьшать параметр  $k$  (коэффициент усиления контура тока) с незначительным, практически незаметным, увеличением коэффициента ошибки по ускорению, а, следовательно, и незначительным уменьшением добротности СПР. Возможность уменьшения параметра  $k$  требуется при перенастройке контура тока по линии равного перерегулирования в сторону увеличения параметра  $b$ , что приводит к понижению перерегулирования в контуре скорости. Повышенный запас устойчивости контура скорости позволит увеличить параметр  $X$ , который в большей мере, чем параметр  $k$  оказывает влияние на добротность СПР. Именно такая взаимосвязь коэффициента ошибки по ускорению от пропорциональных составляющих ПИ регуляторов главного и подчиненных контуров, является предпосылкой к возможности достижения максимального значения добротности СПР скорости, за счет перераспределения коэффициентов усиления входящих в СПР скорости контуров при неизменных запасах устойчивости.

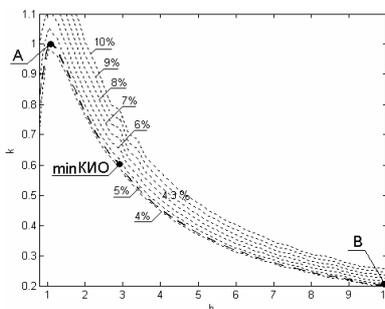


Рис. 1. Диаграмма качества управления контура тока

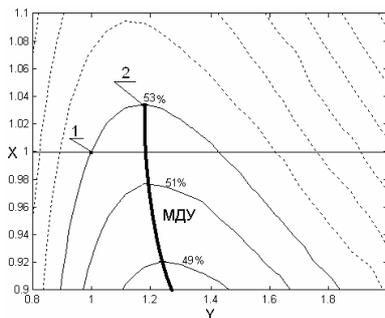


Рис. 2. Диаграмма качества управления контура скорости

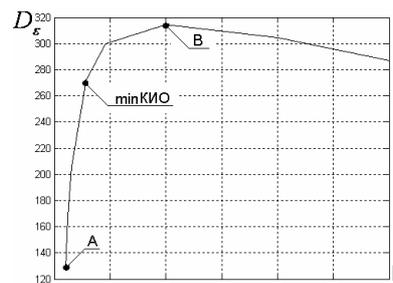


Рис. 3. Зависимость добротности СПР скорости от параметра  $b$

Используя значения параметров  $k$  и  $X$  из табл. 1 и выражение (2), построим зависимость добротности СПР скорости от параметра  $b$  ПИ регулятора тока (рис.3).

На рисунке 3 точка А соответствует типовой настройке контура тока на МО. Отчетливо видно, что при такой настройке контура тока, даже применение критерия МДУ для настройки регулятора скорости в точку максимума добротности при заданном запасе устойчивости не обеспечивают максимального значения добротности СПР скорости, а составляет всего порядка  $127 \text{ с}^{-2}$ . Значительно большее значение добротности можно получить, около  $270 \text{ с}^{-2}$ , применяя для настройки контура тока критерий минимума квадратично-интегральной оценки. А максимальной добротности СПР скорости при заданных запасах устойчивости в главном и подчиненном контурах ( $\sigma_{\text{кв}}=53\%$ ,  $\sigma_{\text{кп}}=4,3\%$ ) соответствует точка В с параметрами  $k=0,197$ ;  $b=10$  и  $X=2,7385$ ;  $Y=0,589$ . Добротность СПР скорости здесь составляет  $314 \text{ с}^{-2}$ .

На рисунках 4 и 5 приведены соответствующие переходные процессы в контуре тока и скорости. Настройке А соответствуют самые медленные из приведенных переходные процессы в контуре тока и скорости, если мерой быстродействия считать время нарастания. Настройке minКИО соответствует в 1,4 меньшее время нарастания в контуре тока и контуре скорости, чем при настройке А. Переходной процесс в контуре скорости имеет помимо основного перерегулирования 53% небольшие колебания, которые существенно увеличивают время регулирования. Настройка В на максимум добротности СПР имеет небольшое преимущество по быстродействию перед настройкой minКИО и отсутствие даже небольших колебаний.

**Выводы.** 1. В статье доказано существование характерного для критерия МДУ максимума добротности СПР скорости, при заданных запасах устойчивости в контурах тока и скорости и совместной вариации параметров их ПИ регуляторов. 2. Значение максимальной добротности в 2,5 раза больше чем при типовой настройке СПР скорости. 3. Выведено выражение для расчета добротности по ускорению контура скорости с учетом отрицательной обратной связи по ЭДС, включающее параметры ПИ регуляторов тока и скорости. 4. Выявлена одна из главных предпосылок к возможности балансировки запасов устойчивости главного и подчиненных контуров и достижения максимального значения добротности СПР скорости. 5. Установлено, что величина возможного повышения добротности существенно зависит от соотношения  $T_m / T_\mu$ : чем оно больше, тем больше величина возможного повышения добротности.

Полученные результаты открывают возможности для значительного повышения качества управления следящих систем, построенных по принципу подчиненного регулирования. Такие системы отрабатывают малые задания управления и зачастую функционируют в линейной области работы ее элементов. По этим же причинам возможно применение полученных результатов для настройки точного канала итерационной многоканальной системы. Также новая настройка эффективна для работы СПР в режиме стабилизации. Очередным шагом в исследовании переходных процессов в СПР скорости является определение факторов влияющих на эффективность предлагаемой настройки, а также поиск минимума перерегулирования контура скорости при заданной добротности контура скорости и заданном перерегулировании в контуре тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Клепиков В.Б., Гуль А.И. К теоретическому обоснованию минимаксного критерия для многократно интегрирующих электромеханических систем // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». - 2004. –Вип. 43. - С. 37-39.
2. В.Б.Клепиков, А.І. Гуль, Т.Ю. Кунченко. Комплексний критерій якості керування умовно стійких електромеханічних систем // Технічна Електродинаміка. –Київ, 2005. – Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – Ч.3. – С. 66-68.
3. Клепиков В.Б., Гуль А.И. О возможности применения и особенности минимаксного критерия качества управления для условно устойчивых электромеханических систем // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». - 2005. –Вип. 45. - С. 60 -62.
4. Гуль А.И., Кунченко Т.Ю., Литвиненко Д.Г. «О диаграммах качества управления» Н 34 Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 7 (128). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2007. – с.285.
5. Гуль А.И. Балансировка добротности и запаса устойчивости электромеханических систем // Электротехника. 2003. № 4. С. 55-62.
6. Литвиненко Д.Г. «О настройке подчиненного контура тока на повышение качества управления контура скорости в системах подчиненного регулирования» Електроінформ. – Львів: ЄКОінформ. – 2009.- Тематичний вип. – с.82-85

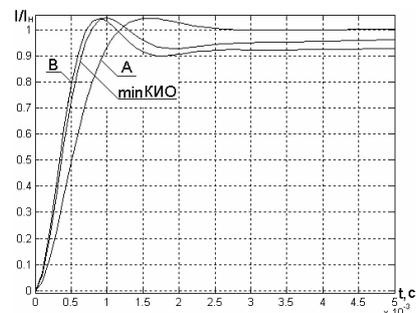


Рис.4. Переходные процессы в контуре тока

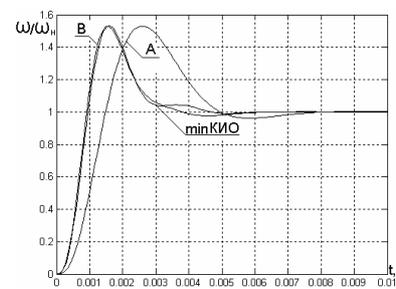


Рис.5. Переходные процессы в контуре скорости