

Д.Г. ЛИТВИНЕНКО, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ ПИ РЕГУЛЯТОРА ТОКА С ПОМОЩЬЮ ДИАГРАММ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ.

У статті описується методика налаштування параметрів ПІ регулятора струму на підвищену якість керування контура швидкості при заданому запасі стійкості $\sigma = 4,3\%$ у контурі струму. Представлений розрахунок і кількісна оцінка зміни параметричної чутливості нестандартно налагодженого контуру струму.

В статье описывается методика настройки параметров ПИ регулятора тока на повышенное качество управления контура скорости при заданном запасе устойчивости $\sigma = 4,3\%$ в контуре тока. Представлен расчет и количественная оценка изменения параметрической чувствительности нестандартно настроенного контура тока.

Введение. Для дальнейшего повышения качества управления системы подчиненного регулирования (СПР) скорости в [1] было предложено с помощью метода диаграмм качества управления (ДКУ) производить настройку не только главного, но и подчиненного контура. При этом параметры ПИ регулятора скорости необходимо выбирать на линии максимальной добротности и запаса устойчивости (МДУ), а параметры ПИ регулятора тока k и b – на изолинии перерегулирования в направлении увеличения пропорциональной составляющей b ПИ регулятора тока. Возможность применения минимаксного критерия качества управления МДУ для условно устойчивого контура скорости уже была обоснована и описана. [2] В данной же статье представляется необходимым осветить характерные особенности и порядок проведения предлагаемой перенастройки контура тока.

Постановка задач исследования. Целью данной работы является разработка методики для настройки параметров ПИ регулятора тока на повышенное качество управления контура скорости при заданном запасе устойчивости $\sigma = 4,3\%$ в контуре тока. Задачей статьи является:

1. расчет и количественная оценка изменения параметрической чувствительности контуров тока и скорости, а также исследование динамических характеристик контура тока при изменении параметров его ПИ регулятора по линии равного перерегулирования;

2. теоретическая проверка предлагаемой настройки на реализуемость и не противоречие возможностям тиристорного преобразователя (ТП).

Результаты исследования. Рассмотрим в качестве примера подчиненный контур тока из [1] без учета отрицательной обратной связи по ЭДС с ПИ регулятором тока

$$Wrt(s) = \frac{k \cdot k_{rt} \cdot (b \cdot T_e s + 1)}{T_e s}, \quad (1)$$

где: k_{rt} – коэффициент усиления регулятора тока, T_e – электромагнитная постоянная времени.

Приступим к решению первой задачи, для этого построим ДКУ контура тока (рис. 1), где точка *A* соответствует настройке на модульный оптимум (МО) с параметрами настройки ПИ регулятора тока $k = 1$ и $b = 1$, а точка *B* – соответствует предлагаемой в [1] настройке с параметрами $k = 0,197$ и $b = 10$. [3]

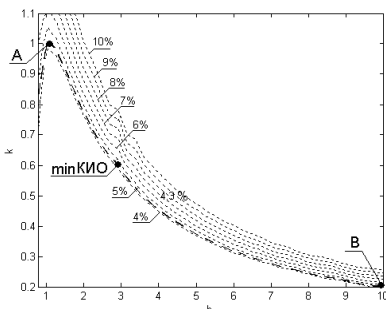


Рис.1.

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, во время проведения исследования.

На диаграмме видны две существенные особенности: 1) для поддержания постоянного перерегулирования в контуре тока с ростом параметра b необходимо уменьшать параметр k . А т.к. добротность по скорости контура тока пропорциональна параметру k , то, фактически, речь идет о необходимости уменьшать добротность контура тока; 2) изолинии перерегулирования с ростом b располагаются все плотнее, что свидетельствует о сопутствующей возрастающей параметрической чувствительности контура тока. [4] Оценка этого изменения особенно важна при поиске и окончательном выборе параметров новой настройки, т.к. чувствительность характеризует свойство системы изменять режим работы при отклонениях того или иного ее параметра от номинального или расчетного значения.

В качестве оценки чувствительности используем функции чувствительности, представляющие собой частные производные принятого показателя качества системы по каждому i -ому параметру системы

$$S_{A_i}^{Q_j} = \left(\frac{\partial Q_j}{\partial A_i} \right)_{A_i=A_{i0}}, \quad (2)$$

где Q_j - j -тый показатель качества регулирования системы; A_i - i -й параметр системы; A_{i0} -установленное значение i -того параметра.

Проведем расчет и дадим количественную оценку изменению параметрической чувствительности контура тока. Показателем качества регулирования при этом примем перерегулирование в контуре тока. Расчет значений функций чувствительности произведем заменой значения частной производной в (2) на отношение приращений значений величин. Результаты расчета функций чувствительности по параметрам k и b ПИ регулятора тока для точек изолинии перерегулирования 4,3%, сведены в табл.1. Также в табл.1. расположены соответствующие значения перерегулирования в контуре скорости, настроенном на симметричный оптимум (СО). Увеличение параметра b от 1 до 10 понижает перерегулирование в контуре скорости от 53% до 28,9%, а – от 10 до 100 уже приводит к незначительному изменению перерегулирования от 28,9% до 28,24%. Таким образом, эти данные не только подтверждают, что увеличение параметра b ведет к уменьшению перерегулирования в контуре скорости, а, главное, дают представление о характере этого уменьшения.

Таблица 1.

k	1,0	0,9	0,6	0,4	0,1	0,05	0,03	0,02
b	1,0	1,6	2,9	4,6	20,0	40,0	70,0	100,0
S_k^σ	13,4	22,0	40,0	61,6	251,0	500,0	894,0	1322,0
S_b^σ	3,1	6,6	6,0	5,5	0,9	0,6	0,3	0,2
$\sigma_{\text{КС}}, \%$	53,0	37,4	31,0	29,7	28,5	28,5	28,4	28,2
$4,7 T_{\mu} / t_n$	1,0	1,3	1,5	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7

Анализ данных в табл.1 показал, что значения функций чувствительности по параметру k возрастают практически пропорционально увеличению параметра b . Значения же функций чувствительности по параметру b возрастает лишь до $b=1,55$, а затем постепенно снижаются. При этом настройка ПИ регулятора тока в точку B сулит десятикратное увеличение функции чувствительности по параметру k и ее уменьшение по параметру b в 1,37 раза.

Для полноты анализа, произведем еще расчет функций параметрической чувствительности контура тока по параметрам $K_{ТП}$, T_μ , R_γ , L_γ и аналогичные функции параметрической чувствительности контура скорости по тем же параметрам плюс еще $k\Phi$ и J , при условии, что контур скорости настроен на СО (табл.2).

Таблица 2.
Для контура тока

k	b	$S_{K_{ТП}}^\sigma$	$S_{T_\mu}^\sigma$	$S_{R_\gamma}^\sigma$	$S_{L_\gamma}^\sigma$
1	1	13,45	13,45	16,40	2,90
0,575	3	23,45	16,00	12,65	11,17
0,373	5	23,80	14,05	11,90	11,50
0,197	10	24,00	14,00	11,85	13,60
0,1015	20	25,55	15,55	11,70	14,05
0,021	100	25,70	15,15	11,65	14,25

Для контура скорости

k	b	$S_{K_{ТП}}^\sigma$	$S_{T_\mu}^\sigma$	$S_{R_\gamma}^\sigma$	$S_{L_\gamma}^\sigma$	S_j^s	$S_{k\Phi}^s$
1	1	46,45	17,15	5,40	51,80	25,90	25,00
0,575	3	19,30	2,30	36,75	16,75	8,45	9,75
0,373	5	12,85	2,90	2,65	10,40	14,55	15,00
0,197	10	10,00	1,95	2,20	8,15	15,30	15,50
0,1015	20	9,05	1,50	1,90	7,50	15,15	15,20
0,021	100	8,45	1,15	1,60	7,05	15,00	14,75

Как и ожидалось, в контуре тока имеет место повышение параметрической чувствительности практически по всем параметрам. А именно, при изменении параметра b от 1 до 100, функция параметрической чувствительности по малой постоянной времени увеличился в 1,2 раза, по коэффициенту усиления ТП – в 2 раза, и по индуктивности якоря – в 4,85 раза. Исключение представляет функция параметрической чувствительности по сопротивлению якоря, которая уменьшилась в 1,37 раза. В контуре скорости наблюдается противоположная картина. Параметрическая чувствительность его значительно снизилась: по малой постоянной времени в 14,9 раза, по коэффициенту усиления ТП – в 5,5 раза, по индуктивности якоря – в 7,34 раза, по сопротивлению

якоря в 3,37 раза, по моменту инерции – в 1,7 раза и по магнитному потоку – в 1,7 раза.

Подведем промежуточный итог исследования. Перемещение точки настройки параметров ПИ регулятора контура тока в сторону увеличения параметра b повышает параметрическую чувствительность контура тока, а также влечет за собой необходимость повышать точность расчета параметра k . Например, настройка контура тока в точку B требует повышения точности расчета k на порядок по сравнению с точностью расчета k при настройке на МО. Также установлено, что повышение параметрической чувствительности в контуре тока сопровождается еще большим понижением ее в контуре скорости. Таким образом, происходит перераспределение чувствительности между подчиненным и главным контурами: контур тока становится более чувствительным к отклонению величин входящих в него параметров, а контур скорости становится более грубым.

Новая настройка контура тока должна позволить достигнуть в контуре скорости повышенного качества управления по критерию МДУ: будь-то максимальная добротность контура скорости при заданном перерегулировании, либо максимальный запас устойчивости при заданной добротности. При этом необходимо чтоб переходные процессы в самом контуре тока соответствовали ряду требований. Во-первых, постоянное перерегулирование – 4,3%. Во-вторых, предельно возможное быстродействие, при этом за меру быстродействия примем время нарастания t_n . Это одно из главных требований т.к. ранее отмечалось, чем больше быстродействие в контуре тока, тем меньше перерегулирование в контуре скорости. Желание достигнуть в контуре скорости максимального значения добротности предъявляет третье требование: точность контура тока должна быть максимально высокой, при этом мерой точности контура тока примем значение добротности по скорости $D_\omega = k / 2T_\mu$, где T_μ – малая постоянная времени. Это второе важное требование к настройке контура тока, которое связано с пропорциональной зависимостью добротности контура скорости от добротности контура тока.

Таким образом, новая настройка, при заданном перерегулировании, должна отвечать двум конфликтующим требованиям: максимальному быстродействию и максимальной добротности. Настройка на МО лишь частично удовлетворяет им: т.к. при высокой точности не обеспечивает максимального быстродействия. Известный комплексный критерий минимума квадратично интегральной оценки (КИО), точка

настройки которого с параметрами $k = 0,6$ и $b = 2,86$ нанесена на рис. 1, 2, 4 является компромиссом между быстродействием и точностью, но, к сожалению, не обеспечивает главного – максимально достижимого повышения качества управления в контуре скорости по критерию МДУ. Хотя, в принципе, на нем можно и остановиться. Однако попробуем разобраться во всем по порядку и предложить свои рекомендации по настройке контура тока. Новая настройка должна обеспечить максимальное быстродействие при минимальном снижении добротности, допустимая величина которого напрямую зависит от параметров контура скорости. Поиск такой настройки – сложная задача, поэтому опишем порядок ее проведения без учета влияния контура скорости, предварительно проанализируем выполнение всех вышеперечисленных требований.

Для начала остановимся подробнее на оценке быстродействия контура тока. Характер и величину изменения быстродействия контура тока легко уяснить по данным в табл.1 и по кривой на рис. 2. Известно, что время нарастания при настройке на МО составляет $4,7T_{\mu}$, поэтому

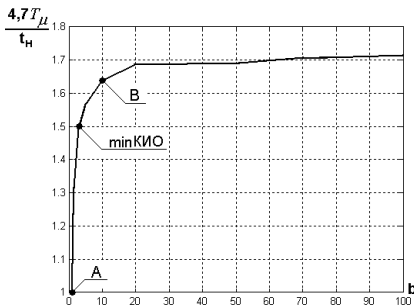


Рис. 2.

ось ординат на рис. 2 обозначена как частное от времени нарастания при настройке на МО и времени нарастания при движении точки настройки по изолинии 4,3% в сторону увеличения параметра b , далее это частное будем называть – выигрыш в быстродействии.

На рис. 2 видно, что при изменении b от 1 до 20 выигрыш в быстродействии значи-

тельно растет, а после $b = 20$ – этот рост существенно замедляется. Настройке на минимум КИО соответствует значение выигрыша в быстродействии 1,5 и увеличению параметра b от 1 до 2,86. Выигрыш в быстродействии 1,64 достигается настройкой B при увеличении параметра b от 1 до 10, дальнейшее увеличение b от 1 до 20 дает уже выигрыш в быстродействии 1,68. Стоит ли далее увеличивать параметр b , ради сотых долей выигрыша в быстродействии, может помочь понять одновременная оценка значений добротности D_{ω} , которые несложно рассчитать по данным табл. 1. Настройке на минимум КИО соответствует уменьшение добротности D_{ω} в 1,67 раза, а настройке B соответс-

твует уменьшение добротности в 5 раз. При изменении же b от 1 до 20, добротность уменьшается в 9,85 раза. Становится очевидным, что выбор параметра b , а, следовательно, и всей настройки, зависит от того, насколько можно уменьшить добротность и повысить параметрическую чувствительность контура тока, ради его выигрыша в быстродействии. Не стоит забывать также и о необходимости повышать точность расчета параметра k ПИ регулятора тока с ростом параметра b .

Таким образом, судя по зависимостям добротности и выигрыша в быстродействии от параметра b , рациональным представляется выбор параметра b до или на "колене" кривой выигрыша в быстродействии. Так можно обобщенно сформулировать рекомендации по настройке контура тока на повышенное качества управления контура скорости. Окончательный же вывод о величине параметра b можно сделать при совместном рассмотрении контуров тока и скорости. Следует помнить, что влияние добротности контура тока на добротность контура скорости зависит от соотношения электромеханической и малой постоянных времени. Для случая рассматриваемого в [1] достаточно остановится на значении $b = 10$, т.е. на "колене" кривой (рис. 2).

Перейдем к решению второй задачи. И выясним, не станет ли применяемый полупроводниковый преобразователь с постоянной времени T_μ , препятствием на пути повышении быстродействия в контуре тока. Для лучшего понимания физических процессов, происходящих в контуре тока, при изменении параметров ПИ регулятора тока k и b по изолинии перегулирования 4,3%, построим логарифмические амплитудные частотные характеристики (ЛАЧХ) разомкнутого контура тока по передаточной функции (3), которая записана без учета отрицательной обратной связи по ЭДС.

$$Wrkt(s) = \frac{k \cdot (b \cdot T_e s + 1)}{2T_\mu s (T_\mu s + 1) (T_e s + 1)} . \quad (3)$$

На рис. 3 приведены ЛАЧХ контура тока: A – настроенного на МО с параметрами настройки ПИ регулятора тока $k = 1$ и $b = 1$; B - настроенного по предлагаемой настройке с параметрами $k = 0,197$ и $b = 10$. Как видно на рис. 4, обе настройки соответствуют различному быстродействию в контуре тока при одинаковом перегулировании 4,3%.

Построенные ЛАЧХ подтверждают и объясняют характер переходных процессов на рис. 4: предлагаемая настройка имеет большее быстродействие т.к. ее ЛАЧХ – B имеет в 1,33 раза большую частоту среза.

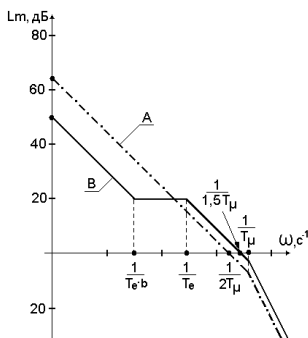


Рис.3.

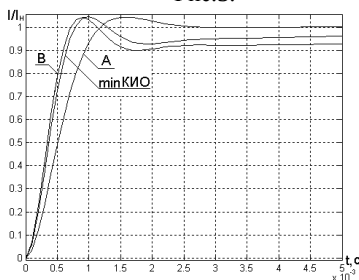


Рис.4.

Также по ЛАЧХ отчетливо видно что, повышение быстродействия контура тока обеспечивается не за счет компенсации малой постоянной времени, а лишь благодаря дифференцирующему действию множителя $(bT_e s + 1)$ в числителе передаточной функции разомкнутого контура тока (3) при $b > 1$, который сокращался при $b = 1$ с множителем $(T_e s + 1)$ в знаменателе.

Теперь на примере ТП выясним, позволит ли он осуществить предлагаемую перестройку контура тока, и при этом, продолжать рассматриваться как линейный элемент. Т.к. явления, связанные со спецификой ТП как нелинейного динамического элемента системы, будут мало сказываться на

работе системы тогда, когда частота среза контура, в котором используется преобразователь, будет ниже зоны частот, существенных для динамики собственно преобразователя, то увеличение частоты среза контура тока от величины $1/2T_\mu$ до $1/1.5T_\mu$, что не превышает частоту $1/T_\mu$ применяемого ТП, позволяет продолжать рассматривать его как линейный динамический элемент [5].

Таким образом, предлагаемая настройка контура тока практически реализуема и обладает как недостатками, связанными со сложностью расчета и повышением параметрической чувствительности контура тока, так и преимуществами: позволяет демпфировать переходные процессы и повышать робастность в контуре скорости, что открывает резервы для дальнейшего повышения качества управления контура скорости.

Разработаем методику для практической настройки параметров ПИ регулятора тока. Как видно по ЛАЧХ, предлагаемая настройка зависит от постоянных времени T_μ и T_e . В связи с этим, было проведе-

но компьютерное моделирование контура тока с различными значениями T_μ и T_e . В результате было установлено, что настройка контура тока при $b=10$ с соотношением T_e/T_μ от 1 до 20 находится до или на "колене" кривой выигрыша в быстродействии, что соответствует сформулированной выше рекомендации. Поэтому, для упрощения расчетов синтезируемой настройки примем параметр $b = 10$. Для удобства далее заменим соотношение T_e/T_μ латинской буквой R . Опытным путем рассчитаем значения параметра k при $b=10$ для контура тока с перерегулированием 4,3% для R от 1 до 20. Полученные данные поместим в табл. 3 и по ним построим кривую на рис. 5. В табл. 3 также помещены соответствующие выигрыши в быстродействии. По данным табл. 3 видно, что чем больше R , тем меньше выигрыш в быстродействии и значение параметра k . Поэтому можно утверждать, что применение такой настройки будет более эффективно при малом соотношении постоянных времени T_e/T_μ .

Таблица 3

R	1	3	5	7	9,43
k	0,858	0,362	0,267	0,224	0,197
$4,7 T_\mu / t_n$	3,720	2,370	2,000	1,790	1,650

R	11	13	15	17	19
k	0,185	0,173	0,165	0,158	0,153
$4,7 T_\mu / t_n$	1,580	1,520	1,470	1,430	1,390

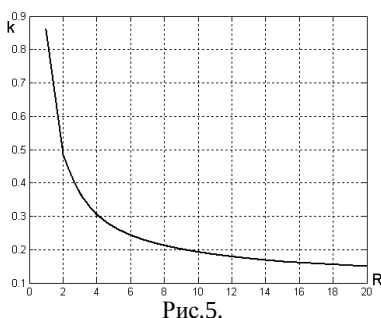


Рис.5.

Разобьем кривую на рис.5 на 7 участков, каждый из которых аппроксимируем полиномом от 3 до 5 порядка и запишем формулу для расчета параметра k ПИ регулятора тока

$$k = \sum_{n=0}^5 a_n R^n \quad (4)$$

В табл.4 запишем значения коэффициентов a_n

Таблица 4

Диапазон	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$2 \leq R \leq 5$	1.531	-1.119	0.462	-0.105	0.0124	-0.0006
$5 \leq R \leq 7,5$	7.466	-5.590	1.747	-0.274	0.0214	-0.0007
$7,5 \leq R \leq 10$	11.476	-6.674	1.586	-0.189	0.0111	-0.0003
$10 \leq R \leq 12$	0.9583	-0.191	0.016	-0.0005		
$12 \leq R \leq 14$	9.9212	-2.971	0.341	-0.0174	0.0003	
$14 \leq R \leq 16$		0.105	-0.016	0.0008		
$16 \leq R \leq 20$	0.437	-0.040	0.002			

Методика расчета параметров ПИ регулятора тока:

1 – необходимо рассчитать параметры ПИ регулятора для настройки контура тока на МО;

2 – вычислить соотношение T_e / T_μ и выбрать из табл. 4 необходимый диапазон R и соответствующие коэффициенты a_n для расчета параметра k , попутно можно оценить ожидаемый выигрыш в быстродействии по табл. 3;

3 – подставить в передаточную функцию (1) ПИ регулятора тока, настроенного на МО, $b=10$ и рассчитанные значения параметра k .

Такая настройка контура тока позволяет снизить параметрическую чувствительность и повышает запас устойчивости контура скорости, что дает возможность повысить добротность контура скорости перенастройкой его параметров на максимум добротности с помощью диаграмм качества управления.

Выводы. В статье произведена оценка изменения основных показателей качества управления контура тока, при настройке его по изолинии перерегулирования 4,3% в сторону увеличения параметра b , а именно, изменение добротности и быстродействия, при этом также выявлено существенное повышение параметрической чувствительности контура тока практически по всем параметрам. Построена кривая зависимости выигрыша в быстродействии от параметра b , по которой установлено, что при изменении b от 1 до 20 выигрыш в быстродействии значительно возрастает, а после $b=20$ – этот рост существенно замедляется. В результате чего, была дана обобщенная рекомендация по настройке контура тока на повышенное качество управления контура скорости: рациональным представляется производить выбор параметров ПИ регулятора тока k и b на изолинии перерегулирования так, чтобы точка настройки располагалась до или на "колене" кривой выигрыша в быстродействии. В статье также дано теоретическое обоснование реализуемости предлагаемой настройки контура тока с применением по-

лупроводникового преобразователя с постоянной времени T_μ на примере ТП. Разработана методика и приведены коэффициенты полинома для расчета параметра k согласно предлагаемой настройки. Показано, что применение такой настройки будет более эффективно при малом соотношении постоянных времени T_e / T_μ .

Список литературы: 1. *Литвиненко Д.Г.* О настройке подчиненного контура тока на повышение качества управления контура скорости в системах подчиненного регулирования // Электроінформ. – Львів: ЕКОінформ. – 2009. – Тематичний вип. – С. 82-85 2. *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. 3. *Гуль А.И., Кунченко Т.Ю., Колесникова В.Д., Литвиненко Д.Г.* О диаграммах качества управления // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. Електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДНТУ. – Вип. 7 (128). – С. 285-286. 4. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 767 с. 5. *Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.* Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отд-ние, 1982. – 392с.



Литвиненко Дмитрий Григорьевич, НТУ "ХПИ", аспирант кафедры "Автоматизированные электромеханические системы". В 2007 г. закончил Харьковский политехнический институт по специальности "Электротехническая техника". В 2007 г. поступил в аспирантуру с отрывом от производства.

Поступила в редколлегию 17.05.2010