

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-959-967

IMPROVING THE ACCURACY AND PERFORMANCE OF THE CURRENT LOOP BY INCREASING THE OPEN LOOP TRANSFER COEFFICIENT

E. V. Shiryaev, N. A. Uliisskiy

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

A method for reducing the static error in control and increase of the current loop performance in the control system of the electric drive by increasing the transfer coefficient of the open loop is considered. This is achieved by introducing a hard negative feedback loop. The resulting structure is stable at any arbitrarily large open loop transfer coefficient. The proposed method of increasing the open loop transfer coefficient does not change the structure of the control object, so when setting the current loop to the technical optimum, the structure of the current regulator also does not change. Two ways for increasing the open loop transfer coefficient are considered: reaching the hard negative feedback or link of armature winding or link of semiconducting converter. Expressions for static errors and time constants of the current loop are obtained for each way. A comparison of static errors and time constants of the circuit between the above options, as well as each option with a standard structural circuit of the current circuit is given. It is shown that the introduction of hard feedback into the current loop increases its performance and reduces the static error compared to the standard structural scheme of the current loop. In this case, the coverage by hard feedback of the link of armature winding of the motor gives less static error and higher performance than the coverage of the link of semiconducting converter.

Keywords: general transfer coefficient, static error, performance, technical optimum, hard feedback.

For citation:

Shiryaev, Eduard V., and Nikolay A. Uliisskiy. "Improving the accuracy and performance of the current loop by increasing the open loop transfer coefficient." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 959–967. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-959-967.

УДК 621.3.072.1

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ КОНТУРА ТОКА ПУТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ РАЗОМКНУТОГО КОНТУРА

Э. В. Ширяев, Н. А. Улиссский

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены способы уменьшения статической ошибки по управлению и увеличения быстродействия контура тока в системе управления электропривода путем неограниченного увеличения коэффициента передачи разомкнутого контура, что достигается введением в контур тока жесткой отрицательной обратной связи. При этом возникающая структура устойчива при любом сколь угодно большом коэффициенте передачи разомкнутого контура. Предлагаемый способ увеличения коэффициента передачи разомкнутого контура не меняет структуру объекта управления, поэтому при настройке контура тока на технический оптимум структура регулятора тока также не изменяется. Рассмотрены два варианта увеличения коэффициента передачи разомкнутого контура: охват жесткой отрицательной обратной связью либо звена обмотки якоря либо звена полупроводникового преобразователя. Для каждого варианта получены выражения для статических ошибок и постоянных времени контура тока. В качестве примера для заданных значений параметров двигателя постоянного тока и полупроводникового преобразователя выполнен расчет зависимостей показателей качества переходного процесса в контуре тока от значения коэффициента жесткой отрицательной обратной связи. Проведено сравнение статических ошибок и постоянных времени контура между рассмотренными вариантами и с вариантом, имеющим стандартную структурную схему контура тока. Показано, что введение жесткой обратной связи в контур тока увеличивает его быстродействие и уменьшает

статическую ошибку по сравнению со стандартной структурной схемой контура тока. При этом охват жесткой обратной связью звена обмотки якоря электродвигателя дает меньшую статическую ошибку и более высокое быстродействие, чем охват звена полупроводникового преобразователя.

Ключевые слова: общий коэффициент передачи, статическая ошибка, быстродействие, технический оптимум, жесткая обратная связь.

Для цитирования:

Ширяев Э. В. Повышение точности и быстродействия контура тока путем увеличения коэффициента передачи разомкнутого контура / Э. В. Ширяев, Н. А. Улиссский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 959–967. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-959-967.

Введение (Introduction)

В теории построения систем управления электропривода широко распространена настройка на технический оптимум контуров регулирования переменных состояния электропривода. В большинстве случаев в качестве переменных состояния рассматривают ток (момент) и угловую скорость электродвигателя. В проведенном исследовании рассматривается повышение точности и быстродействия контура тока на примере двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, так как подход к синтезу регулятора тока одинаков для всех типов электродвигателей. Некоторым вопросам повышения качества переходных процессов в электроприводе посвящены работы [1]–[3].

При синтезе регулятора тока не учитывают внутреннюю отрицательную обратную связь электродвигателя по скорости, полагая, что электрические переходные процессы протекают гораздо быстрее механических, что приводит к появлению статической ошибки при управлении током якоря [4]. В общем случае способами снижения статической ошибки являются [5]:

- повышение астатизма системы;
- компенсация влияния внешних возмущений;
- увеличение коэффициента передачи разомкнутой системы.

Некоторые возможные способы повышения астатизма системы рассмотрены в научной публикации [6]. Возможные способы компенсации влияния внешних возмущений приведены в [7]–[9].

Увеличение общего коэффициента передачи разомкнутого контура имеет ограниченное применение, так как любая одноконтурная система имеет критический коэффициент передачи, при превышении которого система теряет свою устойчивость. Принципиальную возможность создания таких структур САУ, которые допускают неограниченное увеличение общего коэффициента передачи системы без потери устойчивости, еще во второй половине XX в. исследовал советский ученый М. В. Мееров [10]. Суть метода построения таких систем состоит в следующем. Пусть имеется некоторая замкнутая одноконтурная система управления (рис. 1) с ограниченным общим коэффициентом передачи.

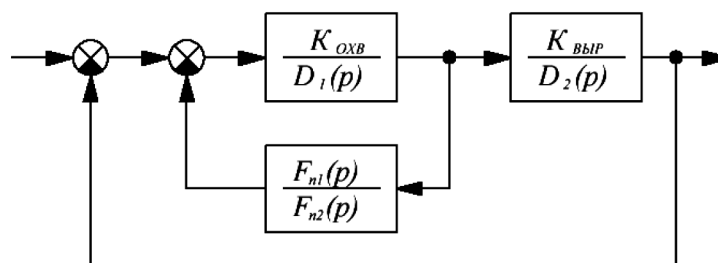


Рис. 1. Структурная схема с корректирующим звеном общего типа

Необходимо изменить эту систему так, чтобы она допускала неограниченное увеличение общего коэффициента передачи без потери устойчивости. Для этого одно или несколько звеньев структурной схемы охватывается отрицательной обратной связью (ООС) с корректирующим

звеном (параллельная коррекция). На рис. 1 использованы следующие условные обозначения: $K_{\text{охв}}$ — коэффициент передачи (усиления) части системы, охватываемой корректирующим звеном; $D_1(p)$ — характеристическое уравнение части системы, охватываемой корректирующим звеном; $K_{\text{выр}}$ — коэффициент передачи (усиления) части системы, не охватываемой корректирующим звеном; $D_2(p)$ — характеристическое уравнение части системы, не охватываемой корректирующим звеном; $F_{n1}(p)/F_{n2}(p)$ — передаточная функция корректирующего звена общего типа.

Вид корректирующего звена и количество охватываемых им звеньев определяется условием [10]:

$$n \leq 2 + n_1 - n_2, \quad (1)$$

где n — степень полинома $D_1(p)$; n_1 — степень полинома $F_{n1}(p)$; n_2 — степень полинома $F_{n2}(p)$.

Например, если колебательное звено ($n = 2$) охватывается дифференцирующим звеном ($n_1 = 1, n_2 = 0$), то система будет устойчивой при любом сколь угодно большом коэффициенте передачи разомкнутой системы.

Следует отметить, что в общем случае введение нового контура с корректирующим звеном изменяет передаточную функцию исходного контура, т. е. при введении нового контура в контур тока последний уже не будет настроен на технический оптимум. Однако в некотором частном случае, который рассматривается далее, существует такая передаточная функция корректирующего звена, которая не меняет структуру объекта управления, сохраняя при этом настройку на технический оптимум.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование было проведено с переводом параметров в относительные единицы, которые обозначены верхним индексом * [4]. Относительная единица — это отношение некоторой абсолютной величины к ее базовому значению. В качестве основных базовых величин двигателя постоянного тока принимают: $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение якоря; $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток якоря; ω_6 — базовое значение скорости. За базовое значение скорости принимается электрическая скорость вращения якоря на холостом ходу при номинальном напряжении на обмотке якоря и номинальном токе в обмотке возбуждения. Для машин с независимым возбуждением базовое значение скорости находится при токе якоря, равном нулю. Производные базовые величины выражаются через основные базовые величины: сопротивление $R_6 = U_6/I_6 = U_{\text{ном}}/I_{\text{ном}}$; индуктивность $L_6 = R_6/\omega_6$; мощность $P_6 = U_6 \cdot I_6 = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}}$; электромагнитный момент $M_6 = P_6/\omega_6$; угловая скорость вращения ротора $\Omega_6 = \omega_6/p_n$, где $p_n = \text{floor}(3000/n_n)$ — число пар полюсов; $\text{floor}(x)$ — целая часть числа x .

Известно, что при синтезе регулятора тока не учитывается отрицательная обратная связь (ООС) электродвигателя по скорости. Объект управления в этом случае имеет передаточную функцию

$$W_{\text{оу1}} = \frac{1}{T_3 p + 1} \frac{1/R_2^*}{T_2 p + 1}, \quad (2)$$

где T_3 и T_2 — постоянные времени, соответственно, полупроводникового преобразователя и обмотки якоря, с;

R_2^* — активное сопротивление обмотки якоря в относительных единицах.

Передаточная функция контура тока при настройке на технический оптимум:

$$W_{\text{кт1}} = \frac{1/k_t^*}{2T_{\mu1}^2 p^2 + 2T_{\mu1} p + 1}, \quad (3)$$

где $T_{\mu1} = T_3$ — постоянная времени контура тока, с;

k_t^* — коэффициент обратной связи контура тока, о. е.

Передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_{\text{рт1}} = \frac{R_2^* T_2}{2k_d^* T_3} + \frac{R_2^*}{2k_d^* T_3 p}. \quad (4)$$

Структурная схема контура тока с учетом пренебрежения ООС по скорости приведена на рис. 2.

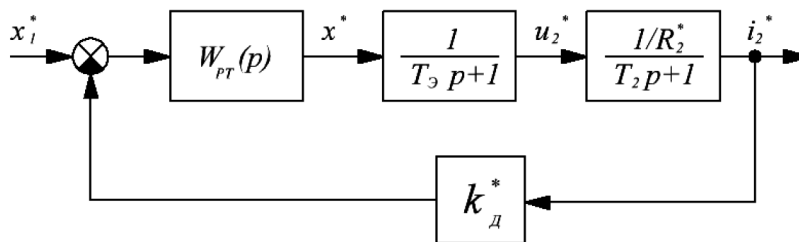


Рис. 2. Структурная схема контура тока

Ошибка по управлению, обусловленная отказом от учета внутренней ООС электродвигателя по скорости:

$$\delta_1 = \frac{2 \frac{T_э}{R_2^* T_{\text{мех}}}}{k_{\text{д}}^* \left(1 + 2 \frac{T_э}{R_2^* T_{\text{мех}}} \right)}, \quad (5)$$

где $T_{\text{мех}} = J \frac{\omega_0}{M_0}$ — механическая постоянная времени, с;

J — момент инерции вала электродвигателя и присоединенных к нему вращающихся масс, кг·м²;

ω_0 — базовое значение угловой скорости электродвигателя, рад/с;

$M_0 = p_n \frac{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}}{\omega_0}$ — базовый электромагнитный момент, Н·м;

$U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение якоря, В;

$I_{\text{ном}}$ — номинальный ток якоря, А.

Для уменьшения ошибки совместим метод, указанный в источнике [10], и метод настройки контура на технический оптимум. Другими словами, введем в контур тока параллельное корректирующее звено так, чтобы контур был по-прежнему настроен на технический оптимум, и структура регулятора не изменилась. Это возможно в том случае, если не изменится структура объекта управления [11]. Известно, что апериодическое и колебательное звенья не меняют свою структуру при охвате их жесткой ООС ($n_1 = n_2 = 0$). В рассматриваемом случае контура тока существует три способа введения жесткой ООС с коэффициентом K^* :

– жесткой ООС охватывается звено объекта управления (полупроводниковый преобразователь плюс обмотка якоря электродвигателя, апериодическое звено второго порядка: $n = 2$);

– жесткой ООС охватывается звено обмотки якоря электродвигателя (апериодическое звено первого порядка: $n = 1$);

– жесткой ООС охватывается звено полупроводникового преобразователя (апериодическое звено первого порядка: $n = 1$).

При всех способах условие (1) выполняется.

Первый способ ($n = 2$). Из теории автоматического управления известно, что апериодическое звено второго порядка и колебательное звено имеют одинаковые передаточные функции. При этом вид звена определяется коэффициентом затухания ζ . Для апериодического второго порядка звена $\zeta \geq 1$, а для колебательного звена $0 < \zeta < 1$. Увеличение коэффициента K^* жесткой ООС уменьшает коэффициент затухания и увеличивает колебательность переходного процесса звена, поэтому этот вариант введения жесткой ООС не рассматривается.

Второй способ ($n = 1$). В этом случае передаточная функция объекта управления принимает вид

$$W_{\text{ов2}} = \frac{1}{T_3 p + 1} \cdot \frac{1/(R_2^* + K^*)}{\frac{R_2^*}{R_2^* + K^*} T_2 p + 1}, \quad (6)$$

где K^* — коэффициент жесткой ООС в относительных единицах.

Структурная схема контура тока с учетом пренебрежения ООС по скорости приведена на рис. 3.

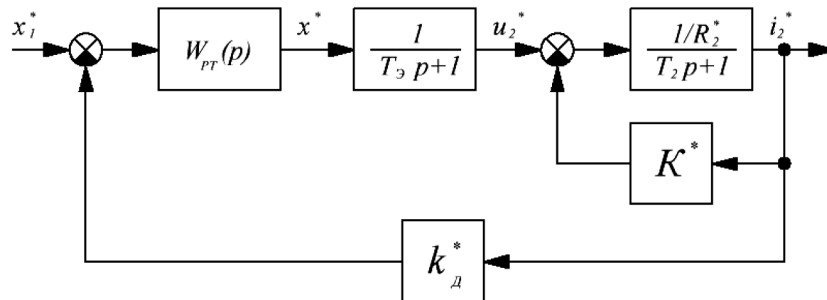


Рис. 3. Структурная схема контура тока при введении жесткой ООС для звена обмотки якоря электродвигателя

При этом для обеспечения быстродействия контура тока необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\frac{R_2^*}{R_2^* + K^*} T_2 < T_3. \quad (7)$$

Условие (7) будет соблюдаться в следующем случае:

$$K^* > \frac{R_2^* (T_2 - T_3)}{T_3}. \quad (8)$$

Передаточная функция регулятора тока, обеспечивающего настройку контура тока на технический оптимум, имеет вид:

$$W_{\text{PT2}} = \frac{(R_2^* + K^*)^2 T_3}{2k_d^* R_2^* T_2} + \frac{(R_2^* + K^*)^2}{2k_d^* R_2^* T_2 p}. \quad (9)$$

Статическая ошибка по управлению

$$\delta_2 = \frac{2R_2^* T_2}{k_d^* (T_{\text{мех}} (R_2^* + K^*)^2 + 2R_2^* T_2)}. \quad (10)$$

Постоянная времени контура тока

$$T_{\mu 2} = \frac{R_2^* T_2}{R_2^* + K^*}. \quad (11)$$

Третий способ ($n = 1$). Передаточная функция объекта управления:

$$W_{\text{оуз}} = \frac{1/(1 + K^*)}{\frac{T_3}{1 + K^*} p + 1} \cdot \frac{1/R_2^*}{T_2 p + 1}. \quad (12)$$

Структурная схема контура тока приведена на рис. 4.

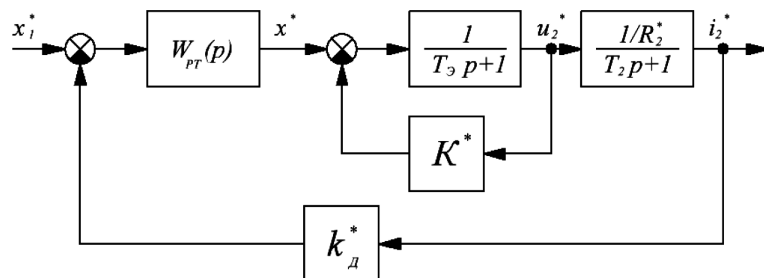


Рис. 4. Структурная схема контура тока при введении жесткой ООС для звена полупроводникового преобразователя

Передаточная функция регулятора тока

$$W_{PT3} = \frac{(1 + K^*)^2 R_2^* T_2}{2k_d^* T_3} + \frac{(1 + K^*)^2 R_2^*}{2k_d^* T_3 p}. \quad (13)$$

Статическая ошибка по управлению

$$\delta_3 = \frac{2T_3}{k_d^* (R_2^* T_{мех} (1 + K^*)^2 + 2T_3)}. \quad (14)$$

Постоянная времени контура

$$T_{\mu 3} = \frac{T_3}{1 + K^*}. \quad (15)$$

Результаты (Results)

На рис. 5 представлены зависимости от коэффициента жесткой ООС, соответственно, величины статической ошибки (рис. 5, а) и постоянной времени контура тока (рис. 5, б). При построении графиков были приняты следующие значения параметров электродвигателя и преобразователя: $R_2^* = 0,12$; $T_2 = 0,02$ с; $T_{мех} = 1$ с, $T_3 = 0,005$ с [4]. Из анализа этих графиков и выражений (10), (11), (14) и (15) следует, что при стремлении коэффициента K^* к бесконечности статическая ошибка и постоянная времени контура стремятся к нулю.

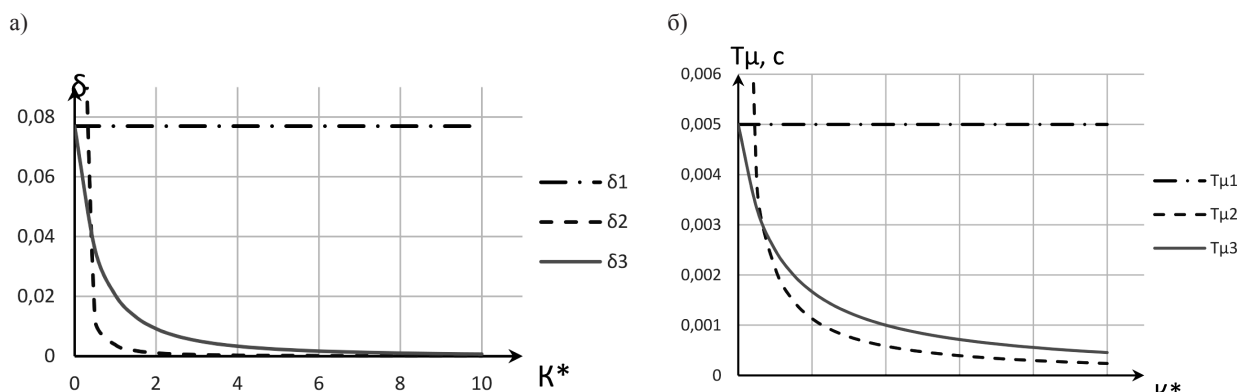


Рис. 5. Зависимости от значения коэффициента K^* :

а — величины статической ошибки; б — постоянной времени контура тока

На рис. 5 видно, что при некоторых значениях K^* статическая ошибка и постоянная времени при охвате звена обмотки якоря жесткой ООС больше, чем без нее: $T_{\mu 2} > T_{\mu 1}$, $\delta_2 > \delta_1$. Определим эти значения. Изменив знак неравенства в выражении (8) на противоположный, получим значения K_1^* , при которых $T_{\mu 2} > T_{\mu 1}$:

$$K_1^* < \frac{R_2^*(T_2 - T_3)}{T_3}. \quad (16)$$

Приравняв друг к другу выражения (5) и (10) и решив полученное уравнение относительно K^* , получим значения K_2^* , при которых $\delta_2 > \delta_1$:

$$K_2^* < \frac{R_2^*(\sqrt{T_2 T_3} - T_3)}{T_3}. \quad (17)$$

На рис. 5 также видно, что при некоторых значениях K^* $T_{\mu 3} = T_{\mu 2}$ и $\delta_3 = \delta_2$. Определим эти значения. Для этого приравняем друг к другу выражения (10) и (14) и выражения (11) и (15), решив затем полученные уравнения относительно K^* . Получим значение K_3^* , при котором $T_{\mu 3} = T_{\mu 2}$, и K_4^* , при котором $\delta_3 = \delta_2$:

$$K_3^* = \frac{R_2^*(T_2 - T_3)}{T_3 - R_2^* T_2}; \quad (18)$$

$$K_4^* = \frac{\left(R_2^* T_2 + \sqrt{T_3 T_2 (R_2^* - 1)^2} - T_3 + R_2^* T_2 \right) R_2^*}{T_3 - R_2^{*2} T_2}. \quad (19)$$

Как следует из рис. 5, при $K^* < K_3^*$ $T_{\mu 3} < T_{\mu 2}$ и при $K^* < K_4^*$ $\delta_3 < \delta_2$.

Для принятых ранее значений параметров электродвигателя и преобразователя имеем: $K_1^* < 0,36$; $K_2^* < 0,12$; $K_3^* = 0,692$; $K_4^* = 0,158$.

Обсуждение (Discussion)

Целью настоящего исследования является повышение точности и быстродействия контура тока, настроенного на технический оптимум. Для этой цели был применен метод, изложенный в источнике [10]. В ходе исследования рассмотрены три возможные структуры контура тока:

1. Стандартная структура с постоянной времени $T_{\mu 1}$ и статической ошибкой δ_1 в выражении (5) [4].
2. Структура с охватом жесткой ООС звена обмотки якоря электродвигателя — постоянная времени $T_{\mu 2}$ в выражении (11) и статическая ошибка δ_2 в выражении (10).
3. Структура с охватом жесткой ООС звена полупроводникового преобразователя — постоянная времени $T_{\mu 3}$ в выражении (15) и статическая ошибка δ_3 в выражении (14).

На рис. 5 наглядно показаны соотношения между показателями качества различных структур контура тока: постоянных времени контура и статических ошибок, однако графики на рис. 5 — частный случай общей закономерности. Выведем выражения, отражающие эти соотношения в общем виде.

Соотношения постоянных времени контура:

$$\frac{T_{\mu 3}}{T_{\mu 1}} = \frac{1}{1 + K^*} \quad (20)$$

Выражение (20) показывает, что $T_{\mu 1} > T_{\mu 3}$, т. е. быстродействие контура тока с жесткой ООС вокруг звена полупроводникового преобразователя выше, чем у обычного контура:

$$\frac{T_{\mu 2}}{T_{\mu 1}} = \frac{R_2^* T_2}{T_3 (R_2^* + K^*)}. \quad (21)$$

Из выражения (21) и при выполнении условия (7) следует, что $T_{\mu 1} > T_{\mu 2}$, т. е. быстродействие контура тока с жесткой ООС вокруг звена обмотки якоря электродвигателя также выше, чем у обычного контура:

$$\frac{T_{\mu 2}}{T_{\mu 3}} = \frac{R_2^* T_2 (1 + K^*)}{T_3 (R_2^* + K^*)}. \quad (22)$$

Здесь, с учетом выражения (18), $T_{\mu 3} < T_{\mu 2}$ при $0 < K^* < K_3^*$ и $T_{\mu 3} > T_{\mu 2}$ при $K_3^* < K^* < \infty$.

Соотношения статических ошибок:

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{R_2^* T_2 (R_2^* T_{\text{мех}} + 2 T_3)}{T_3 (T_{\text{мех}} (R_2^* + K^*)^2 + 2 R_2^* T_2)}; \quad (23)$$

$$\frac{\delta_3}{\delta_1} = \frac{R_2^* T_{\text{мех}} + 2 T_3}{R_2^* T_{\text{мех}} (1 + K^*)^2 + 2 T_3} \quad (24)$$

При увеличении K^* дроби (23) и (24) уменьшаются, т. е. $\delta_1 > \delta_2$ и $\delta_1 > \delta_3$, статические ошибки в контурах тока с жесткой ООС меньше, чем в контуре без нее.

Разделим выражение (10) на (14):

$$\frac{\delta_2}{\delta_3} = \frac{R_2^* T_2 (R_2^* T_{\text{мех}} (1 + K^*)^2 + 2 T_3)}{T_3 (T_{\text{мех}} (R_2^* + K^*)^2 + 2 R_2^* T_2)}. \quad (25)$$

Здесь, с учетом выражения (19), $\delta_3 < \delta_2$ при $0 < K^* < K_3^*$ и $\delta_3 > \delta_2$ при $K_3^* < K^* < \infty$.

Заключение (Conclusion)

В исследовании рассмотрен способ повышения точности и быстродействия контура тока, настроенного на технический оптимум, с помощью увеличения общего коэффициента передачи разомкнутого контура. На коэффициент передачи контура можно оказывать влияние введением жесткой ООС с коэффициентом K^* либо вокруг звена обмотки якоря электродвигателя, либо вокруг звена полупроводникового преобразователя. При увеличении значения коэффициента K^* увеличивается коэффициент передачи разомкнутого контура. Коэффициент K^* теоретически может неограниченно увеличиваться, но его величина будет зависеть от способа технической реализации рассмотренного в настоящем исследовании метода. При этом в статье показано, что при одном и том же значении K^* охват жесткой ООС звена обмотки якоря дает большее быстродействие и меньшую статическую ошибку, чем охват звена преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Iqbal A. Adaptive fuzzy logic-controlled surface mount permanent magnet synchronous motor drive / A. Iqbal, H. Abu-Rub, H. Nounou // Systems Science & Control Engineering. — 2014. — Vol. 2. — Is. 1. — Pp. 465–475. DOI:10.1080/21642583.2014.915203.
2. Chaitanya N. Current Controller Based Power Management Strategy for Interfacing DG Units to Micro Grid / N. Chaitanya, P. Sujatha, K. Chandra Sekhar // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). — 2017. — Vol. 7. — Is. 5. — Pp. 2300–2308. DOI: 10.11591/ijece.v7.i5.pp2300-2308.
3. Guo Z. Research on efficiency optimization of current-fed asynchronous motor drive based on hybrid search method / Z. Guo, J. Zhang, Q. Zhang // Systems Science & Control Engineering. — 2019. — Vol. 7. — Is. 1. — Pp. 89–96. DOI:10.1080/21642583.2019.1573440.
4. Самосейко В. Ф. Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.
5. Юревич Е. И. Теория автоматического управления / Е. И. Юревич. — СПб.: БХВ-Петербург, 2016. — 560 с.
6. Ширяев Э. В. Повышение точности и быстродействия регулятора тока в системах управления электропривода / Э. В. Ширяев // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России: материалы X Межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов. 22 мая 2019 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — С. 248–253.
7. Шадрин Г. К. Физический подход к построению систем управления на основе компенсации динамики объекта и возмущений / Г. К. Шадрин // Автоматика и телемеханика. — 2016. — № 7. — С. 33–46. DOI: 10.1134/S0005117916070031.
8. Глуценко А. И. Об эффективности настройки отдельных параметров ПИ-регулятора с помощью нейросетевого настройщика для компенсации возмущений при управлении нагревательными объектами / А. И. Глуценко // Управление большими системами: сборник трудов. — 2019. — № 78. — С. 71–105.
9. Лекарева А. В. Обеспечение инвариантности ошибки по возмущению в системах автоматического управления траекторными перемещениями технологических объектов / А. В. Лекарева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2016. — Т. 16. — № 5. — С. 787–795. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-787-795.

10. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности / М. В. Мееров. — М.: Наука, 1967. — 424 с.

11. Самосейко В. Ф. Адаптивный алгоритм векторного управления электроприводами с асинхронными электродвигателями / В. Ф. Самосейко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.

REFERENCES

1. Iqbal, Atif, Haitham Abu-Rub, and Hazem Nounou. "Adaptive fuzzy logic-controlled surface mount permanent magnet synchronous motor drive." *Systems Science & Control Engineering* 2.1 (2014): 465–475. DOI: 10.1080/21642583.2014.915203.

2. Chaitanya, N., P. Sujatha, and K. Chandra Sekhar. "Current Controller Based Power Management Strategy for Interfacing DG Units to Micro Grid." *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 7.5 (2017): 2300–2308. DOI: 10.11591/ijece.v7.i5.pp2300-2308.

3. Guo, Zhen, Jiasheng Zhang, and Qingwei Zhang. "Research on efficiency optimization of current-fed asynchronous motor drive based on hybrid search method." *Systems Science & Control Engineering* 7.1 (2019): 89–96. DOI: 10.1080/21642583.2019.1573440.

4. Samosejko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravleniya elektroprivodom*. SPb.: Elmor, 2007.

5. Jurevich, E. I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. SPb.: BHV-Peterburg, 2016.

6. Shirjaev, E. V. "Povyshenie tochnosti i bystrodejstvija reguljatora toka v sistemakh upravleniya elektroprivoda." *Sovremennye tendencii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii: materialy X mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii aspirantov, studentov i kursantov, 22 may 2019*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019. 248–253.

7. Shadrin, G. K. "A physics-based approach to control systems design using compensation of controlled plant dynamics and perturbations." *Automation and Remote Control* 77.7 (2016): 1152–1162. DOI: 10.1134/S0005117916070031.

8. Glushchenko, A. I. "On efficiency of each of pi-controller parameters adjustment with neural tuner to reject disturbances acting on heating furnaces." *Large-Scale Systems Control* 78 (2019): 71–105.

9. Lekareva, A. V. "Disturbance error invariance in automatic control systems for technological object trajectory movement." *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 16.5 (2016): 787–795. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-787-795.

10. Meerov, M. V. *Sintez struktur sistem avtomaticheskogo upravleniya vysokoj tochnosti*. M.: Nauka, 1967.

11. Samosejko, Veniamin F. "The adaptive algorithm of the vector control of electrical drives with the induction motors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ширяев Эдуард Вячеславович — аспирант
Научный руководитель:
Самосейко Вениамин Францевич — доктор
технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: shiryaev.edward@yandex.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Улиссский Николай Анатольевич — аспирант
Научный руководитель:
Самосейко Вениамин Францевич — доктор
технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: nikolayulisskiy@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shiryaev, Eduard V. — Postgraduate
Supervisor:
Samosejko, Veniamin F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: shiryaev.edward@yandex.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Ulisskiy, Nikolay A. — Postgraduate
Supervisor:
Samosejko, Veniamin F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: nikolayulisskiy@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 16 сентября 2019 г.
Received: September 16, 2019.