

УДК 62-83

В.А. Войтенко, канд. техн. наук

ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР С ДВОЙНЫМ ИНТЕГРИРОВАНИЕМ

Рассматривается проблема влияния внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя постоянного тока на работу контура регулирования тока, настроенного на модульный оптимум. Предлагается вместо пропорционально-интегрального регулятора тока использовать пропорционально-интегральный регулятор с двойным интегрированием сигнала ошибки по току. Проводится сравнительный анализ статических и динамических ошибок работы контура регулирования тока с обоими регуляторами.

Ключевые слова: контур регулирования тока, модульный оптимум, пропорционально-интегральный регулятор, отрицательная внутренняя обратная связь по ЭДС, передаточная функция.

V.A.Voytenko, PhD

PROPORTIONALLY-INTEGRAL REGULATOR WITH DOUBLE INTEGRATION

The problem of influencing of negative internal feed-back on electromotive force of engine of direct current on the process of adjusting of current in the contour of adjusting of the current adjusted on a module optimum is examined. It is suggested in place of proportionally-integral regulator of current to use a proportionally-integral regulator with double integration of signal of error on a current. The comparative static and dynamic error of work of contour of current analysis with both regulators is conducted.

Keywords: contour of adjusting of current, module optimum, a proportionally-integral regulator is the negative internal feed-back on electromotive force, transmission function.

В.А.Войтенко, канд. техн. наук

ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРАЛЬНИЙ РЕГУЛЯТОР З ПОДВІЙНОЮ ІНТЕГРАЦІЄЮ

Розглядається проблема впливу внутрішнього від'ємного зворотного зв'язку за ЕРС двигуна постійного струму на роботу контура регулювання струму, налаштованого на модульний оптимум. Пропонується замість пропорційно-інтегрального регулятора струму використовувати пропорційно-інтегральний регулятор з подвійним інтегруванням сигналу похибки за струмом. Проводиться порівняльний аналіз статичних і динамічних похибок роботи контура регулювання струму з обома регуляторами.

Ключові слова: контур регулювання струму, модульний оптимум, пропорційно-інтегральний регулятор, негативний внутрішній зворотний зв'язок за ЕРС, передавальна функція.

При синтезе контура тока стараются получить высокое быстродействие и малое перерегулирование. Высокое быстродействие контура регулирования тока (КРТ) обеспечивает уменьшение динамической и статической погрешности регулирования скорости при изменении возмущающих воздействий. Уменьшение перерегулирования позволяет более полно использовать полупроводниковые силовые ключи по току, так как уменьшается разность максимальных значений тока в динамических и статических режимах.

Требование повышения быстродействия КРТ приводит к необходимости учета динамических свойств усилителя мощности (УМ). Поэтому на структурной схеме КРТ необходимо представить УМ в виде апериодического динамического звена, как это показано на рис.1. Обычно при синтезе регуля-

тора тока (РТ) не учитывают внутреннюю отрицательную обратную связь по ЭДС двигателя и, следовательно, не учитывают влияния на работу КРТ момента нагрузки на валу двигателя постоянного тока (ДПТ) [1,2,3]. Это позволяет упростить процедуру синтеза РТ, но несмотря на применение пропорционально-интегрального регулятора тока (ПИ-РТ), вносит дополнительные погрешности, допустимость которых обычно проверяют на математических или физических моделях. Структурная схема КРТ, в которой не учитывают внутреннюю отрицательную обратную связь по ЭДС двигателя, приведена на рис.1.

На этой структурной схеме приняты следующие обозначения:

$H_{РТ}(p) = \frac{k_{РТ} T_{РТ} p + 1}{T_{РТ} p}$ – передаточная функция

ПИ-РТ; $k_{ТП}$, $T_{ТП}$ – коэффициент усиления и

© Войтенко В.А., 2011

постоянная времени УМ; R_0, T_0 – суммарное активное сопротивление и электромагнитная постоянная времени якорной цепи системы УМ-Д; k_{OT} – коэффициент обратной связи по току.

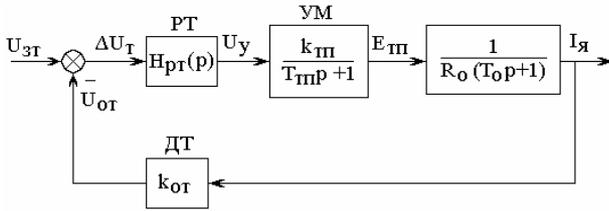


Рис.1. Структурная схема КРТ без учёта внутренней отрицательной обратной связи ДПТ по ЭДС

На вход КРТ поступает сигнал задания $U_{зт}$ и сигнал обратной связи по току $U_{от}$, в результате сравнения которых получается сигнал, пропорциональный ошибке по току $\Delta U_{т} = k_{от} \Delta I_{я}$, который поступает на вход РТ. На выходе РТ формируется сигнал управления $U_{у}$, поступающий на вход УМ. На выходе УМ формируется ЭДС $E_{тп}$, которая обеспечивает протекание тока $I_{я}$ в якорной обмотке ДПТ.

На основании структурной схемы, приведенной на рис.1, и методики, изложенной в [1], можно получить формулы для определения параметров ПИ-РТ и передаточную функцию (ПФ) КРТ, настроенного на модульный оптимум (МО):

$$T_{РТ} = 2 \frac{1}{R_0} T_{тп} k_{тп} k_{от}, \quad (1)$$

$$k_{РТ} = \frac{T_0}{T_{РТ}} = \frac{T_0 R_0}{2 T_{тп} k_{тп} k_{от}}, \quad (2)$$

$$N_{КРТ\ МО}(p) = \frac{I_{я}(p) \cdot k_{от}}{U_{зт}(p)} = \frac{U_{от}(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{1}{2 T_{тп}^2 p^2 + 2 T_{тп} p + 1}. \quad (3)$$

ПФ (3) соответствует передаточной функции разомкнутого КРТ с единичной обратной связью по току

$$W_{РКТ}(p) = \frac{U_{от}(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{1}{2 T_{тп} p (T_{тп} p + 1)}. \quad (4)$$

Исследуем влияние внутренней отрицательной обратной связи двигателя по ЭДС на свойства КРТ, настроенного на МО с помо-

щью ПИ-РТ, параметры которого рассчитаны по формулам (1) и (2). Для этого рассмотрим структурную схему КРТ, показанную на рис.2. На этой схеме в дополнение к обозначениям рис.1 используются обозначения: $k_{д}$, $T_{м}$ – коэффициент усиления двигателя (величина, обратная конструктивному двигателю по ЭДС якоря $E_{д}$) и электро механическая постоянная времени электропривода.

Процессы в структурной схеме, приведенной на рис.2, описываются выражениями в операторной форме записи:

$$E_{тп} = (U_{зт} - k_{от} I_{я}) H_{РТ} \frac{k_{тп}}{T_{тп} p + 1}, \quad (5)$$

$$I_{я} = \left(E_{тп} - \frac{\omega}{k_{д}} \right) \frac{1}{R_0 (T_0 p + 1)}, \quad (6)$$

$$\omega = (I_{я} - I_{с}) \frac{R_0 k_{д}}{T_{м} p}. \quad (7)$$

На основании (6) и (7) можно получить выражение, определяющее связь между током якоря $I_{я}$ и внешними воздействиями $E_{тп}$ и $I_{с}$ с учётом внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС $E_{д}$,

$$I_{я} = \frac{T_{м} p E_{тп} + R_0 I_{с}}{R_0 (T_0 T_{м} p^2 + T_{м} p + 1)}. \quad (8)$$

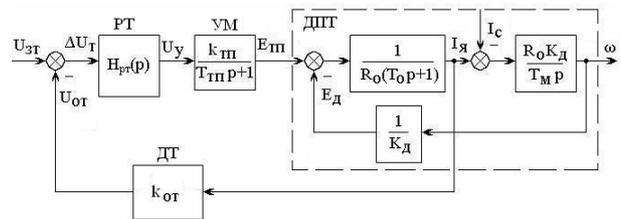


Рис.2. Структурная схема контура регулирования тока якоря ДПТ с учётом внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС

После подстановки в (8) вместо $E_{тп}$ правой части (5) и решения полученного уравнения относительно $I_{я}$:

$$I_{я} = \frac{T_{м} (T_0 p + 1) U_{зт} + 2 (T_{тп} p + 1) T_{тп} k_{от} I_{с}}{F(p) \cdot k_{от}}, \quad (9)$$

где $F(p) = 2 (T_0 T_{м} p^2 + T_{м} p + 1) (T_{тп} p + 1) T_{тп} + T_{м} (T_0 p + 1)$.

На основании (9) запишем выражение, определяющее динамическую ошибку по току при настройке контура тока на МО с по-

мощью ПИ-РТ, параметры которого рассчитаны по формулам (1) и (2),

$$\Delta U_T = U_{3T} - k_{OT} I_{\text{я}} = \frac{2(T_0 T_M p^2 + T_M p + 1)(T_{\text{ПП}} p + 1) T_{\text{ПП}} U_{3T}}{F(p)} - \frac{2(T_{\text{ПП}} p + 1) T_{\text{ПП}} k_{OT} I_C}{F(p)}. \quad (10)$$

Из (10) видно, что при учёте внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя настройка контура тока на МО с помощью ПИ-РТ обеспечивает контуру регулирования тока статические свойства, как по управляющему U_{3T} , так и по возмущающему воздействию I_C . Поэтому реально при регулировании тока с помощью ПИ-РТ будет иметь место установившаяся ошибка (при $U_{3T} = \text{const}$ и $I_C = \text{const}$), значение которой определяется выражением

$$\Delta U_T(0) = \frac{2T_{\text{ПП}} U_{3T}(0) - 2T_{\text{ПП}} k_{OT} I_C(0)}{2T_{\text{ПП}} + T_M} = \frac{U_{3T}(0) - k_{OT} I_C(0)}{1 + \frac{T_M}{2T_{\text{ПП}}}}. \quad (11)$$

Для определения установившегося значения ошибки регулирования тока необходимо использовать формулу

$$\Delta I(0) = \frac{\Delta U_T(0)}{k_{OT}} = \frac{U_{3T}(0) - k_{OT} I_C(0)}{k_{OT} \left(1 + \frac{T_M}{2T_{\text{ПП}}} \right)}. \quad (12)$$

Из (12) и рис. 2 следует, что чем меньше значение T_M , тем быстрее (при неизменных значениях $I_{\text{я}}$ и I_C) изменяется угловая скорость вала ДПТ и ЭДС E_d , что сопровождается увеличением ошибки регулирования тока. Если использовать УМ с низкими динамическими характеристиками (большое $T_{\text{ПП}}$) и ДПТ с высокими динамическими свойствами (малое T_M), то ошибка регулирования тока может превысить допустимое значение. В связи с этим попробуем синтезировать РТ, с помощью которого можно настроить КРТ на МО с учётом внутренней отрицательной обратной связи двигателя по ЭДС. Поскольку при настройке систем, как правило, оптимизируют реакцию системы на изменение управляющего воздействия, то в выражении (8) принимаем $I_C = 0$ и будем учитывать ре-

акцию тока якоря только на изменение ЭДС на выходе УМ (рис.3).

При настройке КРТ на МО необходимо, чтобы ПФ разомкнутого контура тока при наличии в замкнутой системе единичной обратной связи по току имела вид (4). Поэтому следует соответствующим образом выбрать РТ. Для этого решаем уравнение, отражающее равенство ПФ $W_{\text{РКТ.МО}}$ и ПФ разомкнутого контура тока, структурная схема которого приведена на рис.3

$$\frac{H_{\text{РТ}}(p) k_{\text{ПП}} T_M p k_{OT}}{R_0 (T_{\text{ПП}} p + 1)(T_0 T_M p^2 + T_M p + 1)} = \frac{1}{2T_{\text{ПП}} p (T_{\text{ПП}} p + 1)} \quad (13)$$

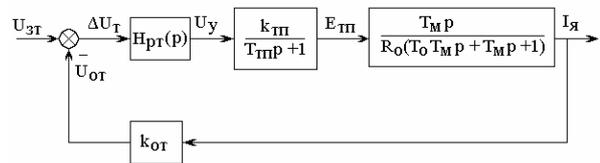


Рис.3. Структурная схема КРТ с учётом внутренней отрицательной обратной связи двигателя по ЭДС

Решая уравнение (13) относительно $H_{\text{РТ}}(p)$, получим

$$H_{\text{РТ}}(p) = \frac{R_0 (T_0 T_M p^2 + T_M p + 1)}{2k_{\text{ПП}} k_{OT} T_{\text{ПП}} T_M p^2} = \frac{R_0}{2k_{\text{ПП}} k_{OT} T_{\text{ПП}} T_M} \left(T_0 T_M + \frac{T_M}{p} + \frac{1}{p^2} \right). \quad (14)$$

ПФ РТ можно представить в виде

$$H_{\text{РТ}}(p) = k_{\text{РТ}} + \frac{1}{T_{\text{РТ1}} p} + \frac{1}{T_{\text{РТ2}}^2 p^2}. \quad (15)$$

Сравнивая выражения (14) и (15), получим формулы для расчёта параметров РТ

$$k_{\text{РТ}} = \frac{R_0 T_0}{2k_{\text{ПП}} k_{OT} T_{\text{ПП}}}. \quad (16)$$

$$T_{\text{РТ1}} = \frac{2k_{\text{ПП}} k_{OT} T_{\text{ПП}}}{R_0}. \quad (17)$$

$$T_{\text{РТ2}}^2 = \frac{2k_{\text{ПП}} k_{OT} T_{\text{ПП}} T_M}{R_0}. \quad (18)$$

Таким образом, при учёте внутренней отрицательной обратной связи двигателя по E_d для настройки контура тока на МО необходимо использовать пропорционально интегральный регулятор тока с двойным интег-

рированием сигнала ошибки по току (ПИИ²-РТ). Необходимо подчеркнуть, что в ПИИ²-РТ формулы для вычисления значений $k_{РТ}$ и $T_{РТ1}$ совпадают с формулами вычисления соответствующих параметров в ПИ-РТ (1) и (2).

Исследуем свойства контура тока с учетом внутренней отрицательной обратной связи двигателя по ЭДС E_d при использовании ПИИ²-РТ. После подстановки в (8) вместо $E_{ТП}$ правой части (5) с учётом (15) и решения полученного уравнения относительно тока якоря

$$I_B = \frac{(T_0 T_M p^2 + T_M p + 1) U_{3T} + 2(T_{ТП} p + 1) T_{ТП} k_{OT} p I_C}{(T_0 T_M p^2 + T_M p + 1) [2(T_{ТП} p + 1) T_{ТП} p + 1] k_{OT}} \quad (19)$$

На основании (19) запишем выражение, определяющее динамическую ошибку по току при настройке контура тока на МО с помощью ПИИ²-РТ

$$\begin{aligned} \Delta U_T &= U_{3T} - k_{OT} I_{я} = \\ &= \frac{2(T_0 T_M p^2 + T_M p + 1)(T_{ТП} p + 1) T_{ТП} p U_{3T} -}{(T_0 T_M p^2 + T_M p + 1) [2(T_{ТП} p + 1) T_{ТП} p + 1]} - \\ &\quad \frac{2(T_{ТП} p + 1) T_{ТП} k_{OT} p I_C}{k_{OT}} \quad (20) \end{aligned}$$

Из (20) видно, что при настройке контура тока на МО с помощью ПИИ²-РТ контур регулирования тока имеет астатизм 1-го порядка как по управляющему U_{3T} , так и по возмущающему воздействию I_C . Поэтому установившееся значение ошибки регулирования тока при $U_{3T} = const$ и $I_C = const$ будет равно нулю.

В пакете MatLab Simulink был промоделирован контур регулирования якорного тока, реализованный на базе тиристорного преобразователя напряжения (ТП) с использованием двигателя постоянного тока типа 2ПО200ЛУХЛ4 ($P_H = 11$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 58$ А). Применялся 2-комплектный ТП с СИФУ косинусного типа с управляемыми выпрямителями, выполненными по 3-фазной мостовой схеме ($T_{ТП} = 3,3 \times 10^{-3}$ с, $k_{ТП} = 27,7$). Для структурной схемы, приведенной на рис.1 были рассчитаны параметры: $R_0 = 0,4864$ Ом, $T_0 = 0,0147$ с, $T_M = 0,11$ с, $k_{OT} = 0,0786$ В/А. По формулам (1), (2), (16), (17) и (18) были определены параметры ПИ-

РТ ($T_{РТ} = 0,0295$ с, $k_{РТ} = 0,49$), и ПИИ²-РТ ($k_{РТ} = 0,49$, $T_{РТ1} = 0,0295$ с, $T_{РТ2}^2 = 0,00325$ с²).

При $U_{3T} = 1$ В, $I_C = 10$ А на рис.4 и рис.5 показаны графики переходных процессов в контуре тока, настроенного на МО, при использовании ПИ-РТ и ПИИ²-РТ с учетом внутренней отрицательной обратной связи двигателя по ЭДС. Из рис.4 видно, что применение ПИ-РТ даёт установившиеся ошибки по управлению и возмущению, которые можно определить по формуле (12). В частности, при $U_{3T} = 1$ В получена ошибка $\Delta I_{я} = 0,72$ А, а при совместном воздействии $U_{3T} = 1$ В и $I_C = 10$ А – $\Delta I_{я} = 0,154$ А, что полностью совпадает с результатами, полученными на модели (рис.4,б).

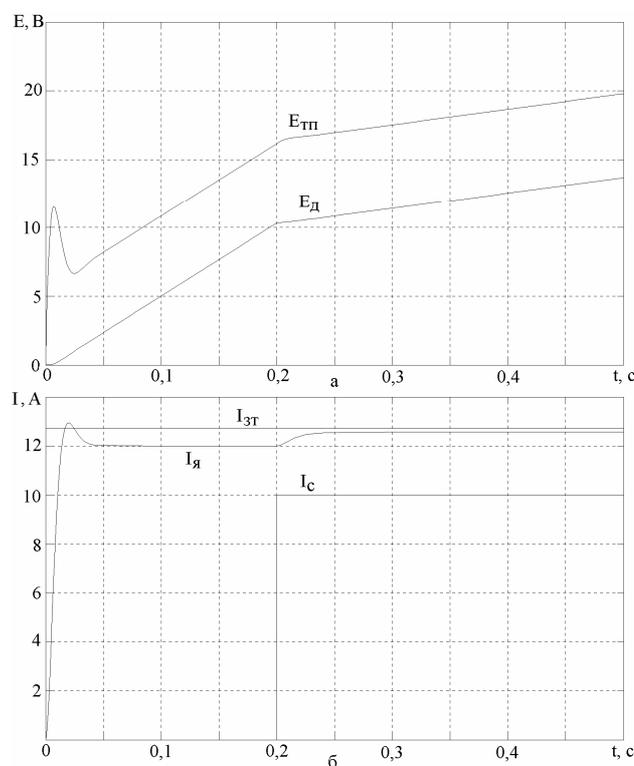


Рис.4. Переходные процессы в контуре тока с ПИ-РТ

Из рис.5 видно, что применение ПИИ²-РТ обеспечивает отсутствие установившейся ошибки как по управлению, так и по возмущению. Результаты анализа графиков переходных процессов, показанных на рис. 4 и рис.5, приведены в таблице.

Поскольку с помощью РТ оптимизируется реакция КРТ на изменение управляющего воздействия, то необходимо сравнить в первую очередь влияние ПИ-РТ и ПИИ²-РТ на работу КРТ при изменении сигнала зада-

ния. В результате этого можно сделать вывод, что применение ПИИ²-РТ позволяет обеспечить меньшее перерегулирование и меньшую длительность переходного процесса при изменении сигнала задания, а погрешность в установившемся режиме стремится к нулю.

1. Основные параметры переходных процессов в контуре тока при использовании ПИ-РТ и ПИИ²-РТ

Показатель	ПИ-РТ	ПИИ ² -РТ
Изменение $U_{3T}=1В$		
Заданное значение тока	12,72 А	12,72 А
Установившееся значение тока, при $U_{3T}=1В, I_C=0$	12,00 А	12,72 А
Установившееся значение тока, при $U_{3T}=1 В, I_C=10 А$	12,566 А	12,72А
Максимальное значение тока при $U_{3T}=1 В, I_C=0$	12,94 А	13,3 А
Перерегулирование при изменении сигнала задания тока ($U_{3T}=1В, I_C=0$)	7,83 %	4,56 %
Время первого согласования (достижение установившегося значения $U_{3T}=1 В, I_C=0$)	0,014 с	0,0156с
Длительность переходного процесса при скачке $U_{3T}=1 В$ (погрешность $\pm 2 \%$)	0,0322с	0,0288с
Изменение $I_C=10 А$		
Заданное значение тока	12,72 А	12,72 А
Установившееся значение тока, при $U_{3T}=1В, I_C=0$	12,566А	12,72 А
Максимальное значение тока при $U_{3T}=1 В, I_C=10 А$	12,566А	13,21 А
Перерегулирование при изменении тока нагрузки ($U_{3T}=1 В, I_C=10 А$)	0 %	3,85 %
Длительность переходного процесса при скачке $I_C=10 А$ (погрешность $\pm 2 \%$)	0,0148 с	0,117 с

Что касается реакции КРТ на изменение возмущающего воздействия I_C , то использование ПИИ²-РТ приводит к увеличению перерегулирования и длительности переходного процесса относительно КРТ с ПИ-РТ. Однако необходимо подчеркнуть, что ПИИ²-РТ обеспечивает нулевую установившуюся ошибку регулирования тока при изменении возмущающего воздействия в отличие от ПИ-РТ.

ПИИ²-РТ можно реализовать на базе более простых регуляторов. Для этого необходимо рассмотреть два варианта в зависимости от того, какие нули имеет ПФ (14). В том случае, если полином

$$D_2(\delta) = (\dot{O}_0 \dot{O}_1 \delta^2 + \dot{O}_1 \delta + 1) \quad (21)$$

имеет вещественные корни, то ПИИ²-РТ может быть реализован последовательным включением двух ПИ-регуляторов. Если корни полинома (21) комплексные, то ПИИ²-РТ может быть реализован последовательным включением И-регулятора и ПИД-регулятора.

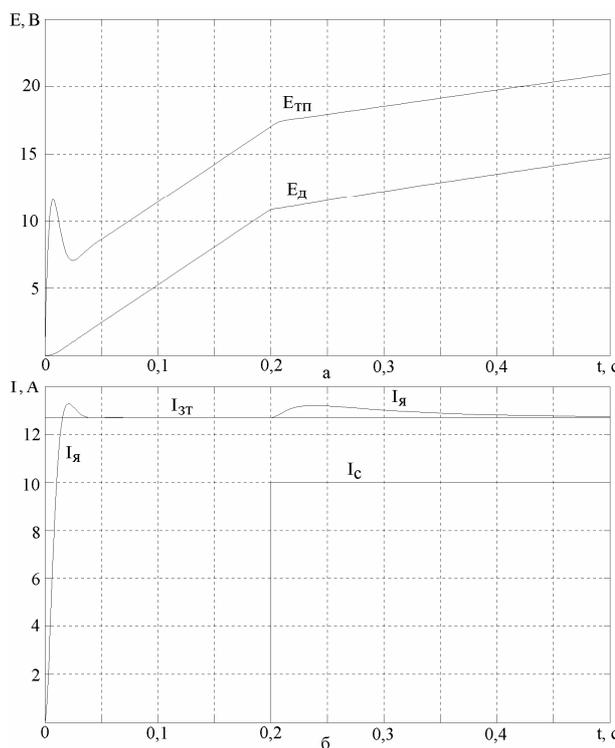


Рис.5. Переходные процессы в контуре тока с ПИИ²-РТ

К достоинствам пропорционально-интегрального регулятора с двойным интегрированием (как и ПИ-регулятора) можно отнести отсутствие дифференцирующих звеньев, что повышает помехоустойчивость систем с таким регулятором.

ПИИ²-регулятор рекомендуется применять для объектов управления, ПФ которых можно представить в виде двух последовательно включённых динамических звеньев

$$H_{Oy1}(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$$

$$H_{Oy2}(p) = \frac{T_2 p}{(T_3 T_4 p^2 + T_5 p + 1)}$$

К таким объектам управления можно отнести преобразователи напряжения или УМ, к выходу которых подключены электрические цепи с активно-индуктивным сопротивлением, содержащие источник электрической энергии, напряжение которого изменяется во время работы замкнутой системы регулирования. Например, устройства, предназначенные для регулирования тока в силовых обмотках двигателей или для заряда аккумуляторных и конденсаторных батарей. Особенно важно использовать ПИИ²-регулятор в тех случаях, когда постоянная времени (T_M), определяющая скорость изменения ЭДС в цепи нагрузки, невелика и сопоставима по значению с постоянной времени, оценивающей динамические свойства усилителя мощности (в статье это T_{TP}). В этом случае при использовании ПИ-регулятора ошибка регулирования тока может превысить допустимое значение.

Список использованной литературы

1. Герасимьяк Р.П. Повышение качества систем автоматического управления/ Р.П. Герасимьяк. Учеб. пособие.– К.: УМК ВО, 1992. – 100 с.

2. Ключев В.И. Теория электропривода/ В.И.Ключев. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

3. Фрер Ф. Введение в электронную технику регулирования: Пер. с нем. / Ф. Фрер, Ф.Орттенбургер. – М.: Энергия, 1973 – 192 с.

Получено 10.10.2011.

References

1. Gerasymiak R.P Improving the quality of automatic control systems. Textbook. allowance. – Kiev: UMK VO, 1992.– - 100. [in Russian].

2. Kliuchevoj V.I The theory of electric. Textbook for high schools. – Moscow: Energo Atomizdat, 1985. – 560. [in Russian].

3. Freire F, Ortttenburger F. Introduction to control electronic devices. / Per. with it. – Moscow: Energiya, 1973. – 192 p. [in Russian].



Войтенко
Владимир Андреевич,
канд. техн. наук, доц.
каф. Электромех. систем с
компьют. управлением
Одеск.нац.политехн. ун-та.
тел. 048-7-348-467