

**РЕГУЛЯТОР С ДВОЙНЫМ ИНТЕГРИРОВАНИЕМ**

Обычно при синтезе регулятора тока (РТ) не учитывают внутреннюю отрицательную обратную связь (ВООС) по ЭДС двигателя и, следовательно, не учитывают влияния на работу контура регулирования тока (КРТ) момента нагрузки на валу двигателя постоянного тока (ДПТ). Это позволяет упростить процедуру синтеза РТ, но не позволяет избавиться при регулировании тока от установившейся ошибки, как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям даже при использовании пропорционально-интегрального регулятора тока (ПИ-РТ). На основании известной методики, изложенной в [1,2], можно записать формулы для определения параметров ПИ-РТ и передаточную функцию (ПФ) КРТ, настроенного на модульный оптимум (МО) без учёта ВООС по ЭДС двигателя:

$$T_{РТ} = 2 \frac{1}{R_0} T_{ТП} k_{ТП} k_{ОТ}, \tag{1}$$

$$k_{РТ} = \frac{T_0}{T_{РТ}} = \frac{T_0 R_0}{2 T_{ТП} k_{ТП} k_{ОТ}}, \tag{2}$$

$$H_{КРТ МО}(p) = \frac{U_{ОТ}(p)}{U_{ЗТ}(p)} = \frac{1}{2 T_{ТП}^2 p^2 + 2 T_{ТП} p + 1}. \tag{3}$$

где  $k_{ТП}$ ,  $T_{ТП}$  – коэффициент усиления и постоянная времени усилителя мощности (УМ);  $R_0$ ,  $T_0$  – суммарное активное сопротивление и электромагнитная постоянная времени якорной цепи системы УМ-Д;  $k_{ОТ}$  – коэффициент обратной связи по току;  $U_{ЗТ}$  – сигнал задания тока якоря;  $U_{ОТ}$  – сигнал обратной связи по току якоря.

Из (3) следует, что ПФ разомкнутого КРТ с единичной обратной связью по току имеет вид

$$W_{РКТ МО}(p) = \frac{U_{ОТ}(p)}{U_{ЗТ}(p)} = \frac{1}{2 T_{ТП} p (T_{ТП} p + 1)}. \tag{4}$$

Оценим влияние ВООС по ЭДС двигателя на свойства КРТ, настроенного на МО с помощью ПИ-РТ, параметры которого рассчитаны по формулам (1) и (2). На структурной схеме КРТ, показанной на рис.1, приняты следующие обозначения:  $H_{РТ}(p)$  – передаточная функция РТ;  $k_d$ ,  $T_M$  – коэффициент усиления ДПТ и электромагнитная постоянная времени электропривода.

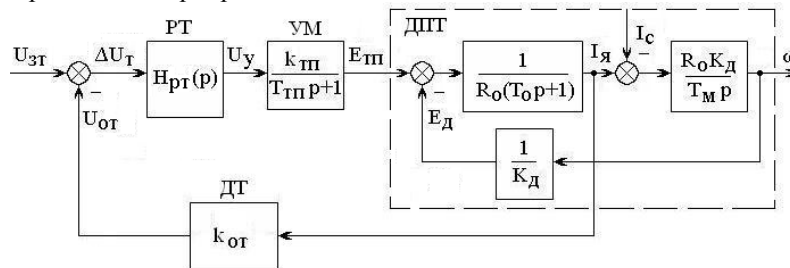


Рис.1. Структурная схема КРТ с учётом ВООС по ЭДС двигателя

На основании структурной схемы, приведенной на рис.1, можно получить выражение, определяющее динамическую ошибку по току при настройке КРТ на МО с помощью ПИ-РТ, параметры которого рассчитаны по формулам (1) и (2),

$$\Delta U_T = U_{ЗТ} - k_{ОТ} I_a = \frac{2(T_0 T_{MP}^2 + T_{MP} + 1)(T_{ТП} p + 1) T_{ТП} U_{ЗТ} - 2(T_{ТП} p + 1) T_{ТП} k_{ОТ} I_C}{2(T_0 T_{MP}^2 + T_{MP} + 1)(T_{ТП} p + 1) T_{ТП} + T_M (T_0 p + 1)}. \tag{5}$$

Из (5) видно, что при учёте ВООС по ЭДС двигателя, настройка КРТ на МО с помощью ПИ-РТ обеспечивает КРТ статические свойства, как по управляющему  $U_{ЗТ}$ , так и по возмущающему воздействию  $I_C$ . Поэтому реально при регулировании тока с помощью ПИ-РТ будет иметь место установившаяся ошибка, значение которой определяется выражением

$$\Delta I(0) = \frac{\Delta U_T(0)}{k_{ОТ}} = \frac{U_{ЗТ}(0) - k_{ОТ} I_C(0)}{\left(1 + \frac{T_M}{2 T_{ТП}}\right) k_{ОТ}}. \tag{6}$$

Из (6) следует, что если в КРТ используется УМ с низкими динамическими характеристиками (с большим  $T_{ТП}$ ) и ДПТ с высокими динамическими свойствами (с малым  $T_M$ ), то ошибка регулирования тока может превы-

сдать допустимое значение. В связи с этим, попробуем синтезировать РТ, с помощью которого можно настроить КРТ на МО с учётом ВООС по ЭДС двигателя. Поскольку при настройке системы на МО оптимизируют её реакцию на изменение управляющего воздействия  $U_{ЗТ}$ , то принимаем  $I_C=0$ . В результате расчётная структурная схема КРТ принимает вид, показанный на рис.2.

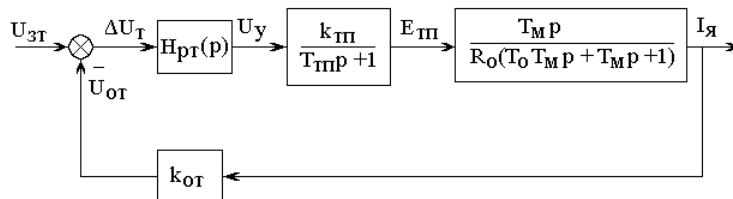


Рис.2. Расчётная структурная схема КРТ с учётом ВООС по ЭДС двигателя

При настройке КРТ на МО ПФ разомкнутого КРТ должна иметь вид (4). Для этого необходимо решить уравнение, отражающее равенство ПФ (4) и ПФ разомкнутого КРТ, структурная схема которого приведена на рис.2

$$\frac{H_{РТ}(p) k_{ТП} T_M p k_{OT}}{R_0 (T_{ТП} p + 1) (T_0 T_M p^2 + T_M p + 1)} = \frac{1}{2 T_{ТП} p (T_{ТП} p + 1)}. \quad (7)$$

Решая уравнение (7) относительно  $H_{РТ}(p)$ , получим

$$H_{РТ}(p) = \frac{R_0 (T_0 T_M p^2 + T_M p + 1)}{2 k_{ТП} k_{OT} T_{ТП} T_M p^2} = \frac{R_0}{2 k_{ТП} k_{OT} T_{ТП} T_M} \left( T_0 T_M + \frac{T_M}{p} + \frac{1}{p^2} \right). \quad (8)$$

ПФ синтезированного РТ можно представить в виде

$$H_{РТ}(p) = k_{РТ} + \frac{1}{T_{РТ1} p} + \frac{1}{T_{РТ2}^2 p^2}. \quad (9)$$

Сравнивая выражения (8) и (9) получим формулы для расчёта параметров РТ

$$k_{РТ} = \frac{R_0 T_0}{2 k_{ТП} k_{OT} T_{ТП}}, \quad (10)$$

$$T_{РТ1} = \frac{2 k_{ТП} k_{OT} T_{ТП}}{R_0}, \quad (11)$$

$$T_{РТ2}^2 = \frac{2 k_{ТП} k_{OT} T_{ТП} T_M}{R_0}. \quad (12)$$

Таким образом, при учёте ВООС по ЭДС двигателя для настройки КРТ на МО необходимо использовать пропорционально интегральный регулятор тока с двойным интегрированием сигнала ошибки по току (ПИИ<sup>2</sup>-РТ). Необходимо подчеркнуть, что в ПИИ<sup>2</sup>-РТ формулы вычисления значений  $k_{РТ}$  и  $T_{РТ1}$  совпадают с формулами вычисления соответствующих параметров в ПИ-РТ (1) и (2).

Исследуем статические и динамические свойства КРТ с учетом ВООС по ЭДС двигателя при использовании ПИИ<sup>2</sup>-РТ. На основании структурной схемы, приведенной на рис.2, с учётом (8) запишем выражение, определяющее динамическую ошибку по току при настройке КРТ на МО с помощью ПИИ<sup>2</sup>-РТ

$$\Delta U_T = U_{ЗТ} - k_{OT} I_я = \frac{2(T_0 T_M p^2 + T_M p + 1)(T_{ТП} p + 1) T_{ТП} p U_{ЗТ} - 2(T_{ТП} p + 1) T_{ТП} k_{OT} p I_C}{(T_0 T_M p^2 + T_M p + 1)[2(T_{ТП} p + 1) T_{ТП} p + 1]}. \quad (13)$$

Из (13) видно, что применение ПИИ<sup>2</sup>-РТ обеспечивает КРТ астатизм 1-го порядка как по управляющему  $U_{ЗТ}$ , так и по возмущающему воздействию  $I_C$ . В результате установившееся значение ошибки регулирования тока будет равно нулю.

В пакете MatLab Simulink была разработана модель КРТ, которая показала, что применение ПИИ<sup>2</sup>-РТ обеспечивает: нулевое значение установившейся ошибки по управлению и по возмущению; при изменении сигнала  $U_{ЗТ}$  уменьшает перерегулирование с 7,83% до 4,56%, а длительность переходного процесса – на 10,6%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Войтенко В.А. Пропорционально-интегральный регулятор с двойным интегрированием. / В.А. Войтенко // Электротехнические и компьютерные системы – Київ.: «Техніка». – 2011. – Вып. 04(80). – С. 19-24.
2. Герасимьяк Р.П. Повышение качества систем автоматического управления/ Герасимьяк Р.П. Учеб. пособие.– К.: УМК ВО, 1992. – 100 с.