

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С БЕЗДАТЧИКОВЫМ ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Е.М. Прищепова,

ст. преподаватель каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ

В современных частотно-регулируемых электроприводах используются принципы блочно-модульного построения по типовым функциональным схемам. Поэтому проектирование систем автоматизированного электропривода сводится к определению его функциональной схемы и синтезу параметров регуляторов. В данной статье получены выражения, позволяющие определить параметры настройки регуляторов тока, потокосцепления и скорости, а также передаточные функции, обеспечивающие проведение оценки точности поддержания скорости электропривода в установившемся режиме, и качество переходных процессов при набросе или сбросе нагрузки.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, передаточные функции, параметры настройки, точность регулирования, анализ качества переходных процессов.

The principles of block-modular construction according to standard functional schemes are used in modern variable-frequency electric drives. Therefore, the design of automated electric drive systems is restricted to the determination of its functional scheme and the synthesis of the controller parameters. The article presents the data allowing to determine current regulator settings, flux linkage, and speed, as well as transfer functions providing assessment of the accuracy of electric drive speed holding in the steady state mode, and the quality of transients during load rise or load dump.

Keywords: variable-frequency electric drive, transfer functions, instrument settings, control accuracy, quality transients analysis.

Введение

В современных частотно-регулируемых асинхронных электроприводах (ЭП) используются, как правило, принципы блочно-модульного построения по типовым функциональным схемам. При этом способ управления ЭП определяется в основном требованиями к его статическим и динамическим характеристикам, а также условиями эксплуатации ЭП. Статические характеристики определяются диапазоном регулирования скорости и механическими характеристиками рабочей машины в этом диапазоне, а динамические характеристики определяются в основном набросом или сбросом нагрузки. Поэтому проектирование систем автоматизированного ЭП сводится в основном к определению ее структуры или функциональной схемы ЭП и синтезу параметров регуляторов, при условии обеспечения необходимой точности поддержания заданной координаты в установившемся режиме и качества переходных процессов двигателя или рабочей машины.

Целью работы является разработка методики оптимизации параметров настройки контуров регулирования тока, потокосцепления и скорости разработанного частотно-регулируемого ЭП.

Основная часть

При анализе технологического процесса рабочей машины (вальцовый плющилки-измельчителя зерна),

автором статьи был выявлен диапазон регулирования ее угловой скорости, механические характеристики и условия работы.

В результате было определено, что все эти требования обеспечит частотно-регулируемый асинхронный ЭП с бездатчиковым векторным управлением, то есть привод, обеспечивающий обратную связь по угловой скорости, но скорость будет вычисляться по мгновенным значениям тока и напряжения статора асинхронного двигателя (АД).

На базе наиболее широко распространенного ЭП с векторным управлением фирмы Siemens типа «Трансвектор», описанного в работах [1-3], была разработана структурная схема частотно-регулируемого асинхронного ЭП с бездатчиковым векторным управлением и ориентацией по вектору потокосцепления ротора – двухкоординатная, с двумя внешними контурами регулирования потокосцепления и скорости, и двумя внутренними подчиненными контурами тока (рис. 1).

На рисунке 1 приняты следующие обозначения передаточных функций и параметров:

$W_{p\omega}(p)$ – передаточная функция регулятора потокосцепления;

$W_{pc}(p)$ – передаточная функция регулятора скорости;

$W_{pt}(p)$ – передаточная функция регулятора тока;

$K_T = \frac{U_{3\text{ т. макс}}}{I_{1\text{ макс}}}$ – коэффициент обратной связи по току, В/А. Принимаем $U_{3\text{ т. макс}}=10\text{ В}$;

$I_{1\text{ макс}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{\text{эл макс}}^2 - I_0^2}$, А – максимально допустимое значение тока АД, А;

$I_{\text{эл макс}}$ – максимально допустимый ток АД, соответствующий его максимально допустимому моменту нагрузки, А;

$T_{\text{то}} = \frac{T_{\text{ст}}}{3}$ – постоянная времени запаздывания

в цепи обратной связи по току, с;

$T_{\text{ст}} = \frac{1}{f_{\text{шим}}} \cdot n_T$ – период сглаживания результата

измерений тока, с.

Принимаем количество измерений $n_T = 8$.

Характерной особенностью частотно-регулируемых электроприводов переменного тока является относительно большая инерционность в цепях обратных связей контуров регулирования тока, потягивания и скорости.

Настройка параметров многоконтурной системы с подчиненным регулированием параметров достигается последовательной оптимизацией контуров, начиная с внутреннего, и заканчивая внешним. Под оптимизацией контуров понимают такую настройку контуров, которая наилучшим образом отвечает предъявленным к ним требованиям. К этим требованиям можно отнести два основных: обеспечение заданной точности в установившихся режимах и как можно быстрое и точное следование регулируемой величины за изменением ее задания, а также как можно меньшее отклонение регулируемой величины от заданной при воздействии на систему различных возмущений (изменений нагрузки, напряжения питающей сети). Отклонения регулируемой величины (угловой скорости) от заданного значения должны устраняться регулятором за кратчайшее время и с минимальным перерегулированием. В реальных же системах эти два основных требования вступают в противоречие, т.е. повышение быстродействия контура повышает перерегулирование регулируемой величины, и наоборот. Поэтому окончательное решение при настройке контура или всей системы ЭП будет компромиссным. В электроприводе принято, что технически оптимальной настройкой системы регулирования является такая, которая при возможных возмущениях обеспечивает близкий к монотонному апериодическому или периодический затухающий процесс регулируемой величины с числом периодов перерегулирования регулируемой величины $0,5 \dots 1$.

В практике настройки систем ЭП в основном применяют два критерия оптимальной настройки контуров по управлению: модульный (технический), оптимум (МО) и симметричный оптимум (СО) [4-9].

Так как структурные схемы контуров токов с инерционной обратной связью и полной компенсации внутренней отрицательной связи по ЭДС двигателя I_{1d} и I_{1g} в структурной схеме частотно-регулируемого ЭП идентичны, то проведем оптимизацию их настройки по одной и той же методике, предварительно изобразив структурную схему контура тока (рис. 2).

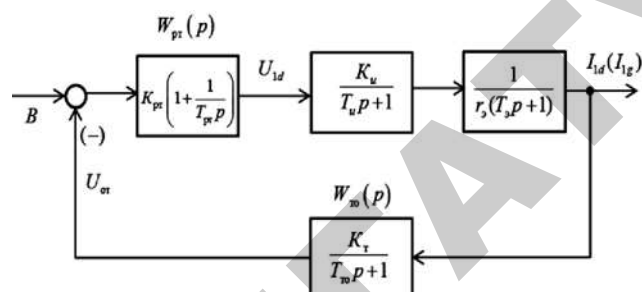


Рис. 2. Структурная схема контура тока с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором

Тогда передаточная функция разомкнутого контура тока рассматриваемой схемы (рис. 2) определяется следующим образом:

$$W_{\text{кт}}(p) = W_{\text{пр}}(p) \cdot \frac{K_u}{T_u p + 1} \cdot \frac{1}{r_3 (T_3 p + 1)} \cdot \frac{K_t}{T_{\text{то}} p + 1}, \quad (1)$$

где r_3 – эквивалентное сопротивление АД, Ом;

T_3 – эквивалентная электромагнитная постоянная времени АД, с.

Для упрощения процедуры оптимизации параметров настройки регуляторов тока понизим порядок передаточной функции контура тока. Для этого заменим инерционные звенья с малыми постоянными времени одним инерционным звеном с постоянной времени

$$T_{\text{мт}} = T_u + T_{\text{то}}, \quad (2)$$

и выражение (1) преобразуем к виду

$$W_{\text{кт}}(p) = W_{\text{пр}}(p) \cdot \frac{K_u K_t}{T_{\text{мт}} p + 1} \cdot \frac{1/r_3}{r_3 (T_3 p + 1)}. \quad (3)$$

Учитывая, что разомкнутый контур тока, настроенный на МО, должен иметь следующую передаточную функцию:

$$W_{\text{мо}}(p) = \frac{1}{a_{\text{мт}} T_{\text{мт}} p (T_{\text{мт}} p + 1)}, \quad (4)$$

где $a_{\text{мт}}=1 \dots 6$ – коэффициент настройки на модульный оптимум контура тока;

$a_{\text{мт}}=2$ – стандартный коэффициент настройки на МО;

$T_{\text{мт}}$ – малая постоянная времени настраиваемого контура тока, с.

Приравнивая правые части выражений передаточных функций (3) и (4) и решая полученное урав-

нение относительно передаточной функции регулятора тока, получим

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{(T_{\text{мт}}p + 1)(T_3p + 1)}{a_{\text{мт}}T_{\text{мт}}p(T_{\text{мт}}p + 1) \cdot K_{\text{и}} \cdot K_{\text{т}} \cdot 1 / r_3} \quad (5)$$

Если принять равным $T_{\text{мт}}=T_{\text{мт}}$, то передаточная функция регулятора тока будет следующей:

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{T_3p + 1}{a_{\text{мт}}T_{\text{мт}}p \cdot K_{\text{и}} \cdot K_{\text{т}} \cdot 1 / r_3} \quad (6)$$

Разделив числитель уравнения (6) на его знаменатель, получим

$$W_{\text{рт}}(p) = K_{\text{рт}} + \frac{1}{T_{\text{рт}}p}, \quad (7)$$

где $K_{\text{рт}} = \frac{T_3 r_3}{a_{\text{мт}} T_{\text{мт}} K_{\text{и}} \cdot K_{\text{т}}}$ – коэффициент передачи регулятора тока, о.е.;

где $T_{\text{рт}} = \frac{a_{\text{мт}} T_{\text{мт}} K_{\text{и}} \cdot K_{\text{т}}}{r_3}$ – постоянная времени регулятора тока, с.

Таким образом, в результате преобразований получим, что при настройке контура тока на МО, регулятор тока будет пропорционально-интегрального типа с соответствующим коэффициентом передачи $K_{\text{рт}}$ и постоянной времени интегрирования $T_{\text{рт}}$.

Уравнение (6) можно преобразовать и к другому, наиболее часто используемому виду, разделив и умножив его знаменатель на постоянную времени T_3 :

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{(T_3p + 1)}{a_{\text{мт}}T_{\text{мт}} \cdot K_{\text{и}} \cdot K_{\text{т}} \cdot T_3 / T_3 \cdot 1 / r_3 \cdot p}$$

После преобразований

$$W_{\text{рт}}(p) = K_{\text{рт}} \frac{T_{\text{рт}}p + 1}{T_{\text{рт}}p} = K_{\text{рт}} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{рт}}p} \right), \quad (8)$$

где постоянная времени регулятора тока $T_{\text{рт}}=T_3$, а коэффициент его передачи $K_{\text{рт}}$ остался прежним, как и в выражении (7).

Уравнения (7) и (8) идентичны, однако уравнение (8) в большей степени отражает суть проведенной оптимизации параметров регулятора тока, заключающейся в компенсации больших инерционностей объекта в контуре регулирования.

Из уравнения (8) следует, что в составе регулятора тока имеется звено $T_{\text{рт}}p + 1 = T_3p + 1$, которое компенсирует действие апериодического звена объекта управления (обмоток статора АД)

$W_{\text{ос}}(p) = \frac{1}{T_3p + 1}$ с эквивалентной электромагнитной

постоянной времени обмоток статора T_3 , что и позво-

ляет добиться максимального быстродействия контура регулирования тока.

После определения передаточной функции регулятора тока, найдем передаточную функцию разомкнутого контура регулирования координат тока

$$\begin{aligned} W_{\text{раз.т}}(p) &= W_{\text{рт}}(p) \cdot \frac{K_{\text{и}}}{T_{\text{и}}p + 1} \cdot \frac{1}{r_3 (T_3p + 1)} \\ &= \frac{K_{\text{т}}}{T_{\text{то}}p + 1} = \frac{T_3 r_3}{a_{\text{мт}} T_{\text{мт}} \cdot K_{\text{и}} \cdot K_{\text{т}}} \cdot \frac{T_3p + 1}{T_3p} \cdot \frac{K_{\text{и}}}{T_{\text{и}}p + 1} \\ &= \frac{1}{r_3 (T_3p + 1)} \cdot \frac{K_{\text{т}}}{T_{\text{то}}p + 1} = \\ &= \frac{1}{a_{\text{мт}} T_{\text{мт}} p (T_{\text{и}} T_{\text{то}} p^2 + (T_{\text{и}} + T_{\text{то}}) p + 1)} = \\ &= \frac{1}{a_{\text{мт}} T_{\text{мт}} T_{\text{и}} T_{\text{то}} p^3 + a_{\text{мт}} T_{\text{мт}}^2 p^2 + a_{\text{мт}} T_{\text{мт}} p} \end{aligned}$$

Затем передаточную функцию замкнутого контура по управлению для регулируемых координат тока

$$\begin{aligned} W_{\text{зам.т}}(p) &= \frac{1}{W_{\text{то}}(p)} \cdot \frac{W_{\text{раз.т}}(p)}{1 + W_{\text{раз.т}}(p)} = \\ &= \frac{1}{K_{\text{т}}} \cdot \frac{W_{\text{раз.т}}(p)}{1 + W_{\text{раз.т}}(p)} = \\ &= \frac{1}{K_{\text{т}} (T_{\text{то}}p + 1)} \\ &= \frac{1}{a_{\text{мт}} T_{\text{мт}} T_{\text{и}} T_{\text{то}} p^3 + a_{\text{мт}} T_{\text{мт}}^2 p^2 + a_{\text{мт}} T_{\text{мт}} p + 1} \approx \\ &\approx \frac{1}{K_{\text{т}} (T_{\text{то}}p + 1)} \\ &\approx \frac{1}{a_{\text{мт}} T_{\text{мт}}^2 p^2 + a_{\text{мт}} T_{\text{мт}} p + 1}, \end{aligned}$$

где $W_{\text{то}}(p)$ – передаточная функция обратной связи контура тока.

Настройка контура близка к настройке на МО системы 2-го порядка. Контур является астатичной системой 1-го порядка по управлению.

Контур потокосцепления также настраиваем на МО. При настройке на МО контура потокосцепления, внутренний оптимизированный контур тока можем представить звеном, имеющим передаточную функцию второго порядка, с малой некомпенсированной постоянной времени $T_{\text{мт}}$:

$$W_{кт}(p) = \frac{1}{a_{\mu\tau} T_{\mu\tau}^2 p^2 + a_{\mu\tau} T_{\mu\tau} p + 1} \cdot \frac{1}{K_{\tau}}$$

Для упрощения решения задачи синтеза контура потокосцепления, понизим порядок передаточной функции подчиненного контура тока до передаточной функции 1-го порядка и это, согласно приведенным исследованиям [6], не скажется на точности решения.

$$W_{кт}(p) = \frac{1}{a_{\mu\tau} T_{\mu\tau} p + 1} = \frac{1}{T_{\mu\tau} p + 1} \cdot \frac{1}{K_{\tau}}$$

где $T_{\mu\tau} = a_{\mu\tau} \cdot T_{\mu\tau} = T_{и} + T_{то}$ – малая постоянная времени оптимизированного контура тока, с.

В этом случае передаточная функция разомкнутого контура потокосцепления рассматриваемой структурной схемы (рис. 3) определится следующим образом:

$$W_{кп}(p) = W_{р\psi}(p) \cdot \frac{1}{T_{\mu\tau} p + 1} \cdot \frac{L_M}{T_2 p + 1} \cdot \frac{K_{\psi}}{T_{\psi_0} p + 1}, \quad (9)$$

где L_M – индуктивность контура намагничивания АД, Гн;

T_2 – электромагнитная постоянная времени цепи ротора АД, с.

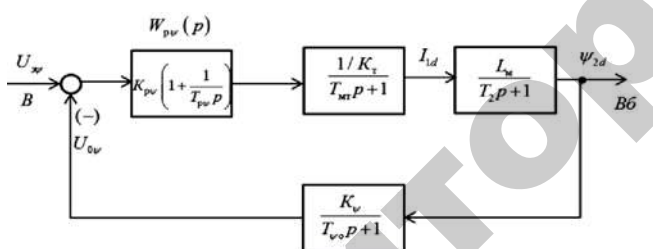


Рис. 3. Структурная схема контура потокосцепления с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором

Для упрощения синтеза параметров регулятора потокосцепления, понизим порядок передаточной функции контура потокосцепления. Учитывая, что электромагнитная постоянная времени ротора АД T_2 в 1,5...2,5 раза больше постоянной времени статора T_3 , то найдем суммарную малую постоянную времени контура потокосцепления $T_{\mu\psi} = T_{\mu\tau} + T_{\psi_0}$, тогда выражение (9) преобразуем к виду

$$W_{кп}(p) = W_{р\psi}(p) \cdot \frac{L_M K_{\psi}}{T_2 p + 1} \cdot \frac{1}{T_{\mu\psi} p + 1} \cdot \frac{1}{K_{\tau}} \quad (10)$$

Далее приравняем правые части выражений (10) и (4), предварительно в выражении (4) заменив $a_{\mu\tau}$ на $a_{\mu\psi}$, а $T_{\mu\tau}$ на $T_{\mu\psi}$

$$W_{р\psi}(p) \cdot \frac{L_M K_{\psi}}{T_2 p + 1} \cdot \frac{1}{T_{\mu\psi} p + 1} \cdot \frac{1}{a_{\mu\psi} T_{\mu\psi} p (T_{\mu\psi} p + 1)} = \frac{1}{a_{\mu\psi} T_{\mu\psi} p (T_{\mu\psi} p + 1)}$$

Решая полученное равенство относительно передаточной функции регулятора потокосцепления, получим

$$W_{р\psi}(p) = \frac{(T_{\mu\psi} p + 1)(T_2 p + 1)}{a_{\mu\psi} T_{\mu\psi} p (T_{\mu\psi} p + 1) L_M K_{\psi} \frac{1}{K_{\tau}}}$$

Если принять равным $T_{\mu\psi} = T_{\mu\tau}$, то регулятор потокосцепления будет иметь передаточную функцию

$$W_{р\psi}(p) = \frac{T_2 p + 1}{a_{\mu\psi} T_{\mu\psi} p L_M K_{\psi} \frac{1}{K_{\tau}}} \quad (11)$$

Разделив числитель уравнения (11) на его знаменатель, получим

$$W_{р\psi}(p) = K_{р\psi} + \frac{1}{T_{р\psi} p},$$

где $K_{р\psi} = \frac{T_2 K_{\tau}}{a_{\mu\psi} T_{\mu\psi} L_M K_{\psi}}$ – коэффициент передачи регулятора потокосцепления, о.е.;

$T_{р\psi} = \frac{a_{\mu\psi} T_{\mu\psi} L_M K_{\psi}}{K_{\tau}}$ – постоянная времени регулятора потокосцепления, с.

Или в другом виде, для этого знаменатель уравнения (11) разделив и умножив на постоянную времени T_2 , получим

$$W_{р\psi}(p) = \frac{T_2 p + 1}{a_{\mu\psi} T_{\mu\psi} L_M K_{\psi} \frac{T_2}{T_2} \cdot \frac{1}{K_{\tau}} \cdot p}$$

После преобразований, получим

$$W_{р\psi}(p) = K_{р\psi} \cdot \frac{T_{р\psi} p + 1}{T_{р\psi} p} = K_{р\psi} \left(1 + \frac{1}{T_{р\psi} p} \right), \quad (12)$$

где постоянная времени регулятора потокосцепления $T_{р\psi} = T_2$, а коэффициент его передачи $K_{р\psi}$ остался прежним.

Аналогично, как и в регуляторе тока, из уравнения (12) следует, что в составе регулятора потокосцепления имеется звено $T_{р\psi} p + 1 = T_2 p + 1$, которое компенсирует действие аperiodического звена объекта управления (обмоток ротора АД)

$W_{об}(p) = \frac{1}{T_2 p + 1}$ с электромагнитной постоянной времени обмоток ротора T_2 , что также позволяет до-

биться максимального быстродействия контура регулирования потокосцепления.

Далее, по аналогии с контуром тока, найдем передаточную функцию разомкнутого контура регулирования потокосцепления

$$\begin{aligned} W_{\text{раз.}\psi}(p) &= W_{p\psi}(p) \cdot \frac{1}{T_{\text{MT}}p+1} \cdot \frac{L_M}{T_2p+1} \cdot \frac{K_\psi}{T_{\psi_0}p+1} = \\ &= \frac{T_2 K_T}{a_{\text{мп}} T_{\text{мпс}} \cdot L_M \cdot K_\psi} \cdot \frac{T_2 p + 1}{T_2 p} \cdot \frac{1}{T_{\text{MT}} p + 1} \cdot \frac{L_M}{T_2 p + 1} \cdot \\ &\cdot \frac{K_\psi}{T_{\psi_0} p + 1} = \\ &= \frac{1}{a_{\text{мп}} T_{\text{мпс}} p (T_{\text{MT}} T_{\psi_0} p^2 + (T_{\text{MT}} + T_{\psi_0}) p + 1)} = \\ &= \frac{1}{a_{\text{мп}} T_{\text{мпс}} T_{\text{MT}} T_{\psi_0} p^3 + a_{\text{мп}} T_{\text{мпс}}^2 p^2 + a_{\text{мп}} T_{\text{мпс}} p} \end{aligned}$$

Затем передаточную функцию замкнутого контура по управлению для регулирования потокосцепления

$$\begin{aligned} W_{\text{зам.}\psi}(p) &= \frac{1}{W_{\psi_0}(p)} \cdot \frac{W_{\text{раз.}\psi}(p)}{1 + W_{\text{раз.}\psi}(p)} = \\ &= \frac{\frac{1}{K_\psi} (T_{\psi_0} p + 1)}{a_{\text{мп}} T_{\text{мпс}} T_{\text{MT}} T_{\psi_0} p^3 + a_{\text{мп}} T_{\text{мпс}}^2 p^2 + a_{\text{мп}} T_{\text{мпс}} p + 1} \approx \\ &\approx \frac{\frac{1}{K_\psi} (T_{\psi_0} p + 1)}{a_{\text{мп}} T_{\text{мпс}}^2 p^2 + a_{\text{мп}} T_{\text{мпс}} p + 1} \end{aligned}$$

Из передаточной функции очевидно, что настройка контура потокосцепления близка к настройке на МО системы 2-го порядка. Контур потокосцепления является астатической системой регулирования 1-го порядка по управлению, и обеспечивает нулевую установившуюся ошибку по потокосцеплению.

Так как контур регулирования скорости электропривода имеет двукратное интегрирование, т.е. имеет звено с большой инерционностью, которую необходимо компенсировать, и интегрирующее звено объекта управления, но независимо от этого он должен обеспечивать высокую жесткость механических характеристик в широком диапазоне регулирования скорости, контур скорости следует настраивать на

СО, так как настройка контура на МО с ПИ-регулятором неосуществима. При настройке на СО контур скорости будет иметь симметричный вид логарифмической частотной характеристики.

При этом разомкнутый контур скорости, настроенный на СО, должен иметь следующую передаточную функцию:

$$\begin{aligned} W_{\text{pc}}(p) &= \frac{b_c \cdot a_c \cdot T_{\text{мс}} p + 1}{a_{\text{cc}} \cdot T_{\text{мс}}^2 p^2 (T_{\text{мс}} p + 1)} = \\ &= \frac{4 T_{\text{мс}} p + 1}{a_{\text{cc}} \cdot T_{\text{мс}}^2 p^2 (T_{\text{мс}} p + 1)}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $b_c \cdot a_c = 4$, так как коэффициенты оптимизации $b_c = a_c = 2$;

$a_{\text{cc}} = 4 \dots 16$ – коэффициент настройки контура скорости на симметричный оптимум;

$a_{\text{cc}} = b_c \cdot a_c^2 = 8$ – стандартный коэффициент настройки, так как коэффициенты оптимизации $b_c = a_c = 2$;

$T_{\text{мс}}$ – малая постоянная времени настраиваемого контура скорости, с.

Для упрощения решения задачи синтеза контура скорости, передаточную функцию подчиненного контура тока 1-го порядка заменим, как и в контуре потокосцепления

$$W_{\text{кт}}(p) = \frac{1}{a_{\text{мп}} T_{\text{мп}} p + 1} = \frac{1}{T_{\text{MT}} p + 1}$$

Тогда передаточная функция разомкнутого контура скорости рассматриваемой структурной схемы (рис. 4) определится следующим образом:

$$W_{\text{кc}}(p) = W_{\text{pc}}(p) \cdot \frac{1}{K_T} \cdot \frac{K_M}{J_3 p} \cdot \frac{K_c}{T_{\text{со}} p + 1}, \quad (14)$$

где $K_M = \frac{3}{2} K_2 p \Psi_{2d}$ – коэффициент момента АД Вб;

Ψ_{2d} – проекция вектора потокосцепления ротора на ось d , синхронно вращающейся ортогональной системы координат d, g , Вб.

В однозонном ЭП значение Ψ_{2d} остается постоянным и равным проекции вектора потокосцепления на ось d при номинальном режиме работы АД. В двухзонном ЭП во второй зоне регулирования значение Ψ_{2d} уменьшается блоком формирования значения потокосцепления БФЗУ.

Далее понизим порядок передаточной функции контура скорости. Для этого найдем суммарную малую постоянную времени контура скорости $T_{\text{мс}} = T_{\text{MT}} + T_{\text{со}}$. Тогда выражение (14) примет следующий вид:

$$W_{\text{кc}}(p) = W_{\text{pc}}(p) \cdot \frac{K_c \cdot \frac{1}{K_T}}{T_{\text{мс}} p + 1} \cdot \frac{K_M}{J_3 p}. \quad (15)$$

Приравнявая правые части выражений (13) и (15) и решая полученное уравнение относительно передаточной функции регулятора скорости, получим

$$W_{pc}(p) = \frac{4T_{mc}p + 1}{a_{cc} \cdot T_{mc}^2 p^2 (T_{mc}p + 1)} \cdot \frac{(T_{mc}p + 1)J_3 p}{K_c \cdot \frac{1}{K_T} \cdot K_M}$$

Если принять равными постоянные времени $T_{mc} = T_{итг}$, то регулятор скорости будет иметь передаточную функцию

$$W_{pc}(p) = \frac{(4T_{mc}p + 1)J_3}{a_{cc} \cdot T_{mc}^2 p \cdot K_c \cdot \frac{1}{K_T} \cdot K_M} \quad (16)$$

Разделив числитель полученного уравнения на его знаменатель, получим

$$W_{pc}(p) = K_{pc} + \frac{1}{T_{pc}p}, \quad (17)$$

где $K_{pc} = \frac{4J_3 K_T}{a_{cc} \cdot T_{mc} \cdot K_c \cdot K_M}$ – коэффициент передачи регулятора скорости, о.е.;

$$T_{pc} = \frac{a_{cc} \cdot T_{mc}^2 \cdot K_c \cdot K_M}{J_3 K_T} \text{ – постоянная времени}$$

регулятора скорости, с.

Или преобразовав к другому виду, для чего разделим и умножим знаменатель уравнения (16) на 4

$$\begin{aligned} W_{pc}(p) &= \frac{(4T_{mc}p + 1)J_3}{a_{cc} \cdot T_{mc}^2 p \cdot K_c \cdot \frac{1}{K_T} \cdot K_M \cdot \frac{4}{4}} = \\ &= \frac{(4T_{mc}p + 1)4J_3 K_T}{a_{cc} \cdot T_{mc}^2 p \cdot K_c \cdot K_M \cdot 4} = K_{pc} \left(\frac{4T_{mc}p + 1}{4T_{mc}p} \right) = \\ &= K_{pc} \frac{T_{pc}p + 1}{T_{pc}p} = K_{pc} \left(1 + \frac{1}{T_{pc}p} \right), \end{aligned}$$

где постоянная времени регулятора скорости $T_{pc} = 4T_{mc}$, а коэффициент его передачи K_{pc} остался прежним, как и в выражении (17).

Таким образом, в составе регулятора скорости имеется звено $T_{pc}p + 1 = 4T_{mc}p + 1$, которое компенсирует инерционные звенья контура и интегрирующее звено объекта $W_{об}(p) = \frac{1}{J_3 p}$.

Затем найдем передаточную функцию разомкнутого контура регулирования скорости

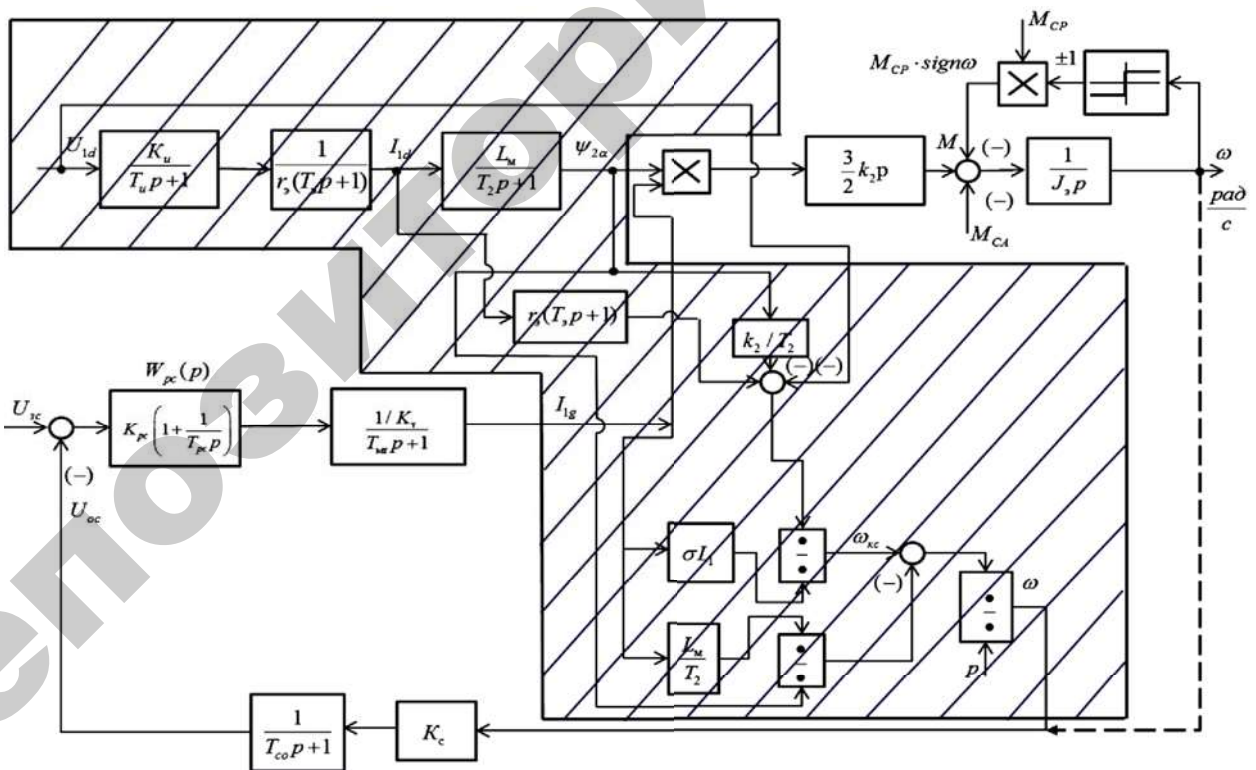


Рис. 4. Структурная схема контура скорости с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором: – блоки, обеспечивающие расчет угловой скорости ротора ω; - - - - расчетная обратная связь по угловой скорости ω.

$$W_{\text{раз.с}}(p) = W_{\text{р.с}}(p) \cdot \frac{1}{T_{\text{MT}}p+1} \cdot \frac{K_{\text{M}}}{J_{\text{э}}p} \cdot \frac{K_{\text{с}}}{T_{\text{CO}}p+1} =$$

$$= \frac{(4T_{\text{MC}}p+1)J_{\text{э}}K_{\text{T}}}{a_{\text{CC}} \cdot T_{\text{MC}}^2 p \cdot K_{\text{с}} \cdot K_{\text{M}} (T_{\text{MT}}p+1)K_{\text{T}} J_{\text{э}}p T_{\text{CO}}p+1} =$$

$$= \frac{4T_{\text{MC}}p+1}{a_{\text{CC}} \cdot T_{\text{MC}}^2 p^2 (T_{\text{MT}}T_{\text{CO}}p^2 + (T_{\text{KC}} + T_{\text{CO}})p+1)} =$$

$$= \frac{4T_{\text{MC}}p+1}{a_{\text{CC}} \cdot T_{\text{MC}}^2 T_{\text{MT}}T_{\text{CO}}p^4 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^3 p^3 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^2 p^2}$$

Далее найдем передаточную функцию замкнутого контура по управлению для регулирования скорости

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{W_{\text{CO}}(p) 1 + W_{\text{раз.с}}(p) K_{\text{с}}} = \frac{1}{(4T_{\text{MC}}p+1)(T_{\text{CO}}p+1)}$$

$$\frac{1}{a_{\text{CC}} \cdot T_{\text{MC}}^2 T_{\text{MT}}T_{\text{CO}}p^4 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^3 p^3 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^2 p^2 + 4T_{\text{MC}}p+1}$$

Оптимизированный контур скорости на СО должен обеспечивать высокое быстродействие.

Для анализа реакции контура скорости на возмущающее воздействие, т.е. наброс или сброс нагрузки $\Delta M_{\text{с}}$, определим передаточную функцию замкнутого контура скорости по возмущению согласно выражению:

$$W_{\text{зам.в}}(p) = \frac{\omega(p)}{-M_{\text{с}}} = \frac{W_{\text{об.м}}(p)}{1 + W_{\text{раз.с}}(p)}$$

где $W_{\text{об.м}}(p)$ – передаточная функция механической части ЭП.

Тогда

$$W_{\text{зам.в}}(p) = \frac{1/J_{\text{э}}p}{1 + \frac{4T_{\text{MC}}p+1}{a_{\text{CC}} \cdot T_{\text{MC}}^2 T_{\text{MT}}T_{\text{CO}}p^4 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^3 p^3 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^2 p^2}} =$$

$$= \frac{1/J_{\text{э}}(a_{\text{CC}} \cdot T_{\text{MC}}^2 T_{\text{MT}}T_{\text{CO}}p^3 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^3 p^2 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^2 p)}{a_{\text{CC}} \cdot T_{\text{MC}}^2 T_{\text{MT}}T_{\text{CO}}p^4 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^3 p^3 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^2 p^2 + 4T_{\text{MC}}p+1} =$$

$$= \frac{1/J_{\text{э}} \cdot (a_{\text{CC}} \cdot T_{\text{MC}}^2 p(T_{\text{MT}}p+1)(T_{\text{CO}}p+1))}{a_{\text{CC}} \cdot T_{\text{MC}}^2 T_{\text{MT}}T_{\text{CO}}p^4 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^3 p^3 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^2 p^2 + 4T_{\text{MC}}p+1} \approx$$

$$\approx \frac{1/J_{\text{э}} \cdot (a_{\text{CC}} \cdot T_{\text{MC}}^2 p(T_{\text{MC}}p+1))}{a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^3 p^3 + a_{\text{CC}}T_{\text{MC}}^2 p^2 + 4T_{\text{MC}}p+1}$$

Оптимизированный замкнутый контур скорости с ПИ-регулятором представляет собой астатическую систему регулирования 1-го порядка по возмущению. Ожидаемые показатели качества работы контура при обработке ступенчатого возмущающего воздействия [10]:

- установившаяся ошибка по возмущению $\Delta\omega_{\text{в.уст}}=0$;
- динамический провал (или всплеск) скорости при набросе (или сбросе) нагрузки $\Delta M_{\text{с}}$

$$\Delta\omega_{\text{в.макс}} \approx \frac{1,75(T_{\text{MT}} + T_{\text{CO}})}{J_{\text{э}}} \cdot \Delta M_{\text{с}};$$

- время обработки (окончания) возмущающего воздействия

$$t_{\text{р.в}} \approx (12,5 \dots 10,9)(T_{\text{MT}} + T_{\text{CO}}).$$

Полученные выражения для расчета коэффициентов передачи и постоянных времени ПИ-регуляторов, а также передаточных функций разомкнутых и замкнутых по управлению и возмущению контуров регулирования тока, потокосцепления и скорости, которые необходимо использовать при их настройке и анализе качества работы при векторном управлении, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты передачи и постоянные времени ПИ-регуляторов, передаточные функции разомкнутого и замкнутого по управлению и возмущению контуров регулирования тока, потокосцепления и скорости при векторном управлении

Контур	Расчетные формулы
Т О К А	$K_{\text{р.т}} = \frac{T_{\text{э}} r_{\text{э}}}{a_{\text{MT}} T_{\text{MT}} K_{\text{и}} \cdot K_{\text{T}}}; T_{\text{р.т}} = \frac{a_{\text{MT}} T_{\text{MT}} K_{\text{и}} \cdot K_{\text{T}}}{r_{\text{э}}};$
	$W_{\text{раз.т}}(p) = \frac{1}{a_{\text{MT}} T_{\text{MT}} T_{\text{и}} T_{\text{ТО}} p^3 + a_{\text{MT}} T_{\text{MT}}^2 p^2 + a_{\text{MT}} T_{\text{MT}} p};$
	$W_{\text{зам.т}}(p) = \frac{\frac{1}{K_{\text{T}}}(T_{\text{ТО}}p+1)}{a_{\text{MT}} T_{\text{MT}} T_{\text{и}} T_{\text{ТО}} p^3 + a_{\text{MT}} T_{\text{MT}}^2 p^2 + a_{\text{MT}} T_{\text{MT}} p+1} \approx \frac{\frac{1}{K_{\text{T}}}(T_{\text{ТО}}p+1)}{a_{\text{MT}} T_{\text{MT}}^2 p^2 + a_{\text{MT}} T_{\text{MT}} p+1}.$

Продолжение таблицы 1.

Контур	Расчетные формулы
ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ	$K_{p\psi} = \frac{T_2 K_T}{a_{\mu\pi} T_{m\pi c} L_M K_\psi}; T_{p\psi} = \frac{a_{\mu\pi} T_{m\pi c} L_M K_\psi}{K_T};$ $W_{\text{раз.}\psi}(p) = \frac{1}{a_{\mu\pi} T_{m\pi c} T_{m\pi} T_{\psi_0} p^3 + a_{\mu\pi} T_{m\pi c}^2 p^2 + a_{\mu\pi} T_{m\pi c} p};$ $W_{\text{зам.}\psi}(p) = \frac{\frac{1}{K_\psi} (T_{\psi_0} p + 1)}{a_{\mu\pi} T_{m\pi c} T_{m\pi} T_{\psi_0} p^3 + a_{\mu\pi} T_{m\pi c}^2 p^2 + a_{\mu\pi} T_{m\pi c} p + 1} \approx \frac{\frac{1}{K_\psi} (T_{\psi_0} p + 1)}{a_{\mu\pi} T_{m\pi c}^2 p^2 + a_{\mu\pi} T_{m\pi c} p + 1}.$
СКОРОСТИ	$K_{pc} = \frac{4J_\Delta K_T}{a_{cc} \cdot T_{mc} \cdot K_c \cdot K_M}; T_{pc} = \frac{a_{cc} \cdot T_{mc}^2 \cdot K_c \cdot K_M}{J_\Delta K_T};$ $W_{\text{раз.}c}(p) = \frac{4T_{mc} p + 1}{a_{cc} \cdot T_{mc}^2 T_{m\pi} T_{co} p^4 + a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2};$ $W_{\text{зам.}c}(p) = \frac{1}{K_c} \cdot \frac{(4T_{mc} p + 1)(T_{co} p + 1)}{a_{cc} \cdot T_{mc}^2 T_{m\pi} T_{co} p^4 + a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2 + 4T_{mc} p + 1};$ $W_{\text{зам.}b}(p) = \frac{1/J_\Delta \cdot (a_{cc} \cdot T_{mc}^2 p(T_{m\pi} p + 1)(T_{co} p + 1))}{a_{cc} \cdot T_{mc}^2 T_{m\pi} T_{co} p^4 + a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2 + 4T_{mc} p + 1} \approx \frac{1/J_\Delta \cdot (a_{cc} \cdot T_{mc}^2 p(T_{m\pi} p + 1))}{a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2 + 4T_{mc} p + 1}.$
$a_{\mu\pi} = 1 \dots 6$ ($a_{\mu\pi} = 2$); $T_{m\pi} = T_{\pi} + T_{\pi 0}$; $a_{\mu\pi} = 1 \dots 6$ ($a_{\mu\pi} = 2$); $T_{m\pi c} = T_{m\pi} + T_{\psi 0}$; $b_c = a_c = 2$; $a_{cc} = 4 \dots 16$ ($a_{cc} = b_c \cdot a_c^2 = 8$); $T_{mc} = T_{m\pi} + T_{co}$	

Заключение

1. Анализ полученных выражений коэффициентов передачи по току, потокосцеплению и скорости показывает, что их значения определяются соотношениями постоянных времени структурных звеньев прямых и обратных ветвей соответствующих контуров регулирования, а также коэффициентов усиления и обратных связей.

2. Постоянные времени контуров регулирования по току, потокосцеплению и скорости определяются суммой постоянных времени прямых и обратных ветвей соответствующих контуров, моментом инерции механической части ЭП и соответствующими коэффициентами усиления и обратных связей.

3. Полученные выражения передаточных функций ПИ-регуляторов замкнутых по управлению контуров регулирования токов, потокосцепления и скорости свидетельствуют о высокой точности поддержания заданных режимов в статическом режиме, так как все контуры являются астатическими системами регулирования.

4. Из передаточной функции замкнутого контура скорости по возмущению с ПИ-регулятором очевидно, что он представляет собой астатическую систему регу-

лирования 1-го порядка по возмущению. При этом ожидаемые показатели качества работы контура при обработке ступенчатого возмущающего воздействия:

– установившаяся ошибка по возмущению $\Delta\omega_{в.уст} = 0$;

– динамический провал (или всплеск) скорости при набросе (или сбросе) нагрузки ΔM_c

$$\Delta\omega_{в.макс} \approx \frac{1,75(T_{m\pi c} + T_{co})}{J_\Delta} \cdot \Delta M_c;$$

– время обработки (окончания) возмущающего воздействия $t_{p.в} \approx (12,5 \dots 10,9)(T_{m\pi c} + T_{co})$.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Blaschke, F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen / F. Blaschke // Siemens Zeitschrift, 1971. – № 45. – P.10.

2. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дортау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.

3. Flöter, W., Ripperger H. Die Trasvektor – Regelung für den feldorientierten betrieb einer Asynchron – maschine // Siemens Zeitschrift, 1971. – № 45. – P. 10.

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

5. Шёнфельд, Р. Автоматизированные электроприводы: пер. с нем.; / Р. Шёнфельд, Э. Хабигер; под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат; Ленинградское отд-ие, 1985. – 464 с.

6. Удут, Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов: учеб. пос. / Л.С. Удут, О.П. Мальцев, Н.В. Кояин. – 2-е изд. перераб. и доп. – Томск: ТПУ, 2007. – 156 с.

7. Aström, K.J. PID Controllers: the on design and tuning / K. J. Aström, T. Hägglung. 2-d Edition. – North

Carolina. Instrument society of America, 1995.

8. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учеб. пос. / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И. А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

9. Удут, Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов: учеб. пос./ Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 164 с.

10. Мальцева, О.П. Системы управления электроприводов: учеб. пос./ О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 82 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 09.12.2019

Устройство для сдваивания колес тракторов «БЕЛАРУС»

Предназначено для улучшения агроэкологических свойств тракторов при выполнении сельскохозяйственных и транспортных работ. Предложенное устройство позволяет значительно снизить динамические нагрузки на конечные передачи и полуоси ведущих мостов тракторов, а, следовательно, и трансмиссию в целом, обеспечить повышение ресурса узлов трактора, шин, повысить транспортную скорость, уменьшить расход топлива, улучшить управляемость и поворотливость агрегатов. Эффективность достигается благодаря периодическому отключению и переводу в ведомый режим наружных колес трактора. Для перевода наружных колес на необходимый режим используется имеющаяся на тракторе пневмосистема. Конструкция защищена патентом Республики Беларусь №16282.



Основные технические данные

Максимальные габаритные размеры, мм	420x550
Масса комплекта, кг	90...200
Способ управления включением наружного колеса	периодически от пневмосистемы трактора
Рабочее давление в пневмокамерах, МПа	0,8
Время включения/выключения пневмопривода, с	100/60
Снижения давления на почву ходовой части тракторов, %	25...40