

СИСТЕМА ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ФИЛЬТРОМ В КАНАЛЕ КОМПЕНСАЦИИ ИДЕНТИФИЦИРОВАННОГО СТАТИЧЕСКОГО МОМЕНТА

Коцегуб П.Х., Толочко О.И.,
Мариничев В.Ю., Розкаряка П.И.

Донецкий национальный технический университет

Введение. Для улучшения динамики астатических систем подчиненного регулирования скорости (СПРС) в [1] предложено вместо замены пропорционального регулятора скорости (П-РС) пропорционально-интегральным (ПИ-РС) замыкать контур тока по идентифицированному при помощи наблюдателя состояния (НС) первого порядка динамическому току или дополнять систему каналом компенсации влияния нагрузки на статические свойства привода, используя для этого идентифицированный момент статического сопротивления.

Цель работы. Рассмотреть вариант предложенной в [1] системы с полной или частичной компенсацией статического падения скорости при набросе нагрузки, обеспечивая тем самым желаемое значение этого показателя, и проанализировать возможность включения в канал компенсации фильтра с оценкой влияния, оказываемого им на качество переходных процессов.

Содержание исследования. Структурная схема астатической по управляющему и возмущающему воздействиям СПРС двигателя постоянного тока, питаемого от управляемого вентильного преобразователя, с ПИ-регулятором динамического тока, идентифицированного наблюдателем состояния, и П-регулятором скорости без учета внутренней обратной связи по противоЭДС двигателя приведена на рис.1.

В структурной схеме используется система относительных единиц, в которой в качестве базовых величин приняты: для тока якоря – ток короткого замыкания $I_{кз}$, для скорости – скорость идеального холостого хода двигателя ω_0 .

На рисунке введены следующие обозначения: T_μ – малая некомпенсированная постоянная времени контура регулирования тока (КРТ); T_T, T_C – постоянные времени интегрирования разомкнутых контуров тока и скорости соответственно; T_M – электромеханическая постоянная времени привода; I – коэффициент, характеризующий настройку наблюдателя.

Достоинство системы с П-РС и обратной связью по динамическому току состоит в том, что астатизм по возмущению (нагрузке) достигается без ухудшения динамических свойств по управляющему воздействию.

В типовых системах астатизм по возмущающему воздействию достигается за счет применения ПИ-РС с фильтром на его входе. Это, как известно, приводит к уменьшению быстродействия системы. Например, при работе привода от задатчика интенсивности (ЗИ) время первого согласования тока с установившимся значением увеличивается от $7,6 T_\mu$ до $14,3 T_\mu$.

Некоторым неудобством при использовании системы с обратной по динамическому току является необходимость ее усложнения с целью ограничения максимального-допустимого тока [3].

По этой причине может быть отдано предпочтение эквивалентной ей по динамическим и статическим параметрам системе с контуром регулирования тока и с положительной связью по статическому току, введенной с коэффициентом передачи, обратному коэффициенту усиления РС.

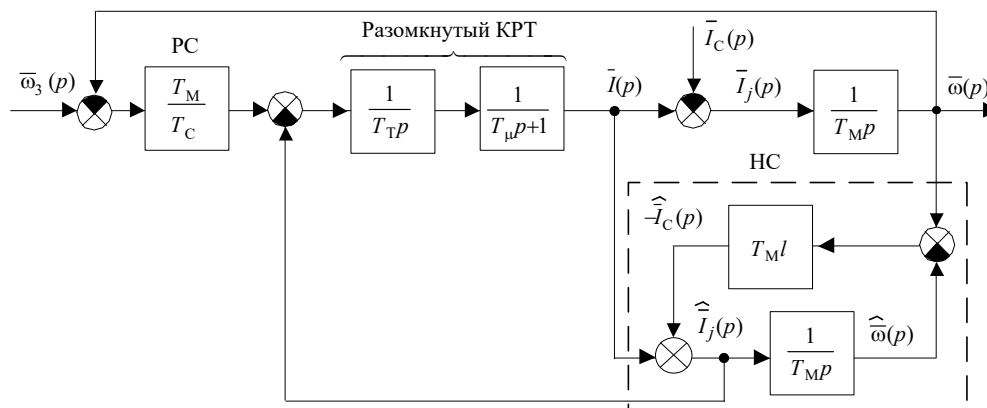


Рисунок 1 Структурная схема системы регулирования скорости с обратной связью по динамическому току, восстановленному наблюдателем

Ограничение максимального тока в такой системе осуществляется традиционным способом: ограничением выходного сигнала РС.

Такая система, дополненная фильтром в канале обратной связи по оценке статического тока, приведена на рис.2. Фильтр с передаточной функцией

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{G_{\Phi}(p)}, \quad (1)$$

где

$$G_{\Phi}(p) = T_{\Phi}p + 1 \text{ или } G_{\Phi}(p) = (T_{\Phi}p + 1)^2. \quad (2)$$

предназначен для уменьшения скорости изменения тока и перерегулирования по току при набросе нагрузки, а также для уменьшения влияния помех, которые могут возникнуть при восстановлении статического тока.

Определим передаточные функции рассматриваемой системы по управляющему и по возмущающему воздействиям: $K(p) = \bar{\omega}(p)/\omega_3(p)$ и $K_B(p) = \bar{\omega}(p)/\bar{I}_C(p)$. При этом будем пользоваться правилом Мейсона, в соответствии с которым

$$K(p) = \frac{\sum_{i=1}^m W_{\text{пр}i}(p) \Delta_i(p)}{\Delta(p)}, \quad (3)$$

где $W_{\text{пр}i}(p)$ – передаточные функции прямых путей от входа до выхода; m – число путей;

$\Delta(p)$ – специальный «полином», который характеризует совокупность всех замкнутых контуров системы и вычисляется по формуле

$$\Delta(p) = 1 - \sum W_{K1}(p) + \sum W_{K2}(p) - \sum W_{K3}(p) + \dots,$$

в которой $\sum W_{K1}(p)$ – сумма передаточных функций всех контуров; $\sum W_{K2}(p)$ – сумма произведений передаточных функций не касающихся друг друга пар контуров; $\sum W_{K3}(p)$ – сумма произведений передаточных функций не касающихся друг друга троек контуров и т.д.; $\Delta_i(p)$ составляются

также, как и $\Delta(p)$, только для контуров, не касающихся i -го прямого пути.

Для передаточной функции по управляющему воздействию имеется один прямой путь с передаточной функцией

$$W_{\text{пр}1}(p) = \frac{1}{T_C T_T p^2 (T_{\mu} p + 1)}. \quad (4)$$

При этом

$$\begin{aligned} \Delta(p) = & 1 + \frac{1}{T_T p (T_{\mu} p + 1)} + \frac{1}{T_C T_T p^2 (T_{\mu} p + 1)} + \frac{1}{p} + \\ & + \frac{1}{T_T p (T_{\mu} p + 1)} \cdot \frac{1}{p} + \frac{1}{T_C T_T p^2 (T_{\mu} p + 1)} \cdot \frac{1}{p} + \\ & + \frac{1}{T_T p^2 (T_{\mu} p + 1) G_{\Phi}(p)} - \frac{l(1-\beta)}{T_T p^2 (T_{\mu} p + 1) G_{\Phi}(p)}. \end{aligned} \quad (5)$$

В последней составляющей для $\Delta(p)$ вместо звена в наблюдателе с передаточной функцией $\frac{1}{T_M p}$ подставлено $\frac{1-\beta}{T_M p}$, где β – малая величина.

Это выполнено для того, чтобы не потерять в характеристическом полиноме системы с наблюдателем характеристический полином фильтра.

Последнее выражение может быть представлено в виде

$$\Delta(p) = \Delta_C(p) \Delta_H(p) + \frac{\beta}{T_T p^2 (T_{\mu} p + 1) G_{\Phi}(p)}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_C(p) = & 1 + \frac{1}{T_T p (T_{\mu} p + 1)} + \frac{1}{T_C T_T p^2 (T_{\mu} p + 1)} = \\ = & \frac{G_C(p)}{T_C T_T p (T_{\mu} p + 1)} \end{aligned} \quad (7)$$

– «полином» системы, замкнутой по собственным координатам без учета связи, поступающей через фильтр;

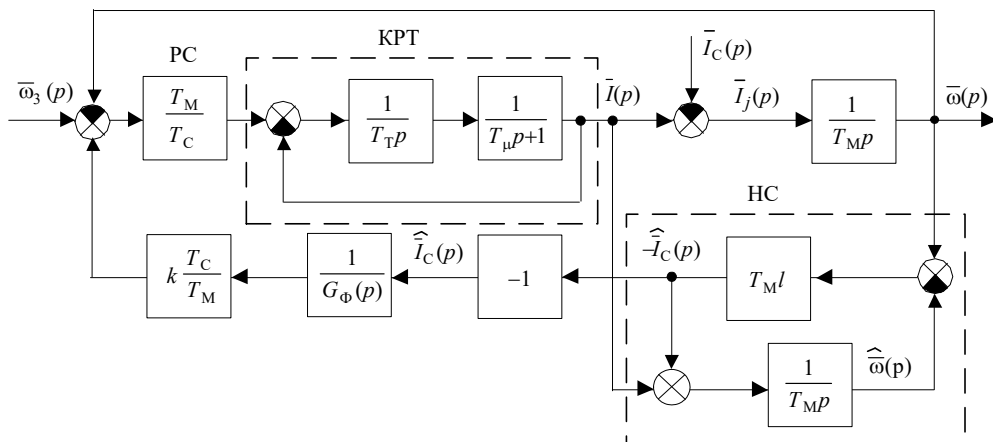


Рисунок 2 Структурная схема системы регулирования скорости с комбинированным управлением по возмущающему воздействию

$$G_C(p) = T_{C1}T_T T_\mu p^3 + T_{C1}T_T p^2 + T_{C1}p + 1 \quad (8)$$

– характеристический полином системы, замкнутой по собственным координатам (т.е. обычной системы подчиненного регулирования с П-РС);

$$\Delta_H(p) = 1 + \frac{I}{p} = \frac{p+I}{p} = \frac{G_H(p)}{p} \quad (9)$$

– «полином» наблюдателя;

$$G_H(p) = p + I \quad (10)$$

– характеристический полином наблюдателя.

Выражение (6) с учетом (7) и (9) может быть представлено в виде

$$\Delta(p) = \frac{G_\Phi(p)G_C(p)G_H(p) + \beta T_C p}{T_C T_T T_\mu p^3 (T_\mu p + 1) G_\Phi(p)}, \quad (11)$$

где

$$G(p) = G_\Phi(p)G_C(p)G_H(p) + \beta T_C p \quad (12)$$

– характеристический полином системы с наблюдателем, который ввиду малости величины β превращается в выражение

$$G(p) = G_\Phi(p)G_C(p)G_H(p). \quad (13)$$

«Полином» контуров, не касающихся прямого пути с передаточной функцией (4), равен

$$\Delta_1(p) = 1 + \frac{I}{p} = \frac{p+I}{p} = \frac{G_H(p)}{p} = \Delta_H(p). \quad (14)$$

После подстановки (14) и (11) в (3) получаем передаточную функцию системы по управляющему воздействию с учетом, что $\beta \approx 0$:

$$K(p) = \frac{\bar{\omega}(p)}{\omega_3(p)} = \frac{W_{\text{нр1}}(p)\Delta_1(p)}{\Delta(p)} = \frac{1}{G_C(p)}. \quad (15)$$

Из последнего выражения видно, что передаточная функция по управляющему воздействию системы с фильтром в канале компенсации нагрузки совпадает с передаточной функцией системы подчиненного регулирования скорости с П-регулятором скорости и с передаточной функцией системы, представленной на рис.1. Отсюда следует, что фильтр в канале обратной связи по статическому току не влияет на динамические свойства системы при обработке управляющего воздействия.

Передаточная функция рассматриваемой системы по возмущающему воздействию равна

$$K_B(p) = \frac{\bar{\omega}(p)}{\bar{I}_C(p)} = - \frac{\frac{1}{T_M p} \Delta_i(p)}{\Delta(p)}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_i(p) &= 1 + \frac{I}{p} + \frac{1}{T_T p (T_\mu p + 1)} - \\ &- \frac{I}{T_T p^2 (T_\mu p + 1) G_\Phi(p)} + \frac{1}{T_T p (T_\mu p + 1)} \cdot \frac{I}{p} = \\ &= \frac{H_i(p)}{T_T p^2 (T_\mu p + 1) G_\Phi(p)}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$= (T_T p^2 (T_\mu p + 1) + I T_T p (T_\mu p + 1) + p + I) G_\Phi(p) - I. \quad (18)$$

После подстановки $\Delta_i(p)$ из (17) и $\Delta(p)$ из (11) в (16) и полагая $\beta=0$, получим

$$\begin{aligned} K_B(p) &= \frac{\bar{\omega}(p)}{\bar{I}_C(p)} = - \frac{T_C}{T_M} \frac{H_i(p)}{G(p)} = \\ &= - \frac{T_C}{T_M} \frac{H_i(p)}{G_\Phi(p)G_C(p)G_H(p)}. \end{aligned} \quad (19)$$

В силу того, что $G_\Phi(0) = 1$ (см. уравнение (2)), имеем $H(0) = 0$ и соответственно $K_B(0) = 0$, что свидетельствует об астатических свойствах системы по возмущающему воздействию.

Из (19) также видно, что параметры фильтра, определяемые полиномом $G_\Phi(p)$, входят как в числитель, так и в знаменатель передаточной функции $K_B(p)$. Следовательно, они влияют на качество переходных процессов при набросе нагрузки.

Подчеркнем, что, если в качестве обратной связи по статическому току принять величину, равную $k \frac{T_C}{T_M}$, то при изменении k от 0 до 1 можно влиять на

статическое падение скорости, которое будет определяться по формуле

$$\Delta \bar{\omega}_C = \frac{T_C}{T_M} \bar{I}_C (1-k). \quad (20)$$

При $k=0$ имеем обычную СПР с П-РС, при $k=1$ – астатическую по нагрузке систему, обладающую более высокими показателями при отработке управляющего воздействия, чем система, в которой астатизм достигается за счет применения ПИ-РС.

Для подтверждения отмеченного выше на рис.3 приведены переходные функции контура скорости по управляющему воздействию с ПИ-РС (кривая 1) и с П-РС (кривая 2), определяющие поведение тока якоря при разгоне (торможении) привода с задатчиком интенсивности, а на рис. 4 – графики изменения тока и статического падения скорости в системе с ПИ-РС (кривые 1) и в системе с комбинированным управлением при $k=1$ (кривые 2) для $T_\Phi = 0$ (рис.4а) и $T_\Phi = 3T_\mu$ (рис.4б).

Кривая 2 на рис.3 отображает переходную функцию КРС с П-РС не зависимо от наличия или отсутствия компенсирующей обратной связи по оценке статического тока и параметров звеньев, установленных в этом канале.

Графики 2 на рис. 4 получены для фильтра с характеристическим полиномом $G_\Phi(p) = (1 + T_\Phi p)^2$.

Так, например, при одинаковом перерегулировании по току динамическое падение скорости и время ее восстановления в комбинированной системе оказывается примерно в 2 раза меньше, чем в системе с ПИ-РС (см. рис.4а).

Если по каким-либо причинам скорость изменения тока при набросе нагрузки превышает допустимое значение, то ее можно уменьшить включением фильтра.

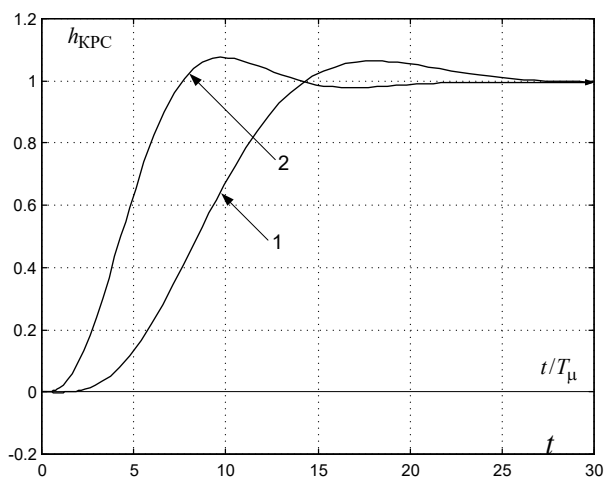
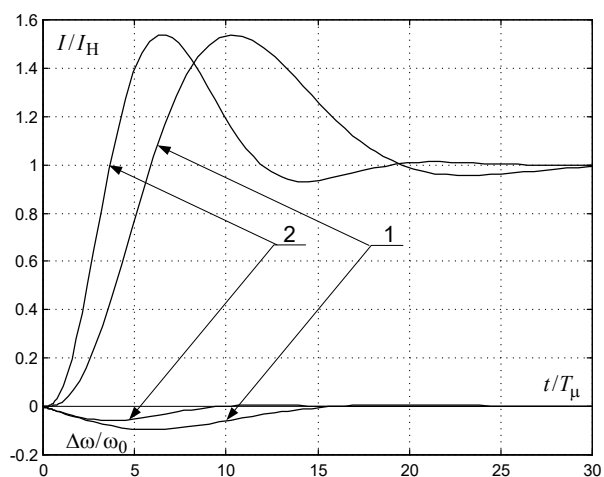
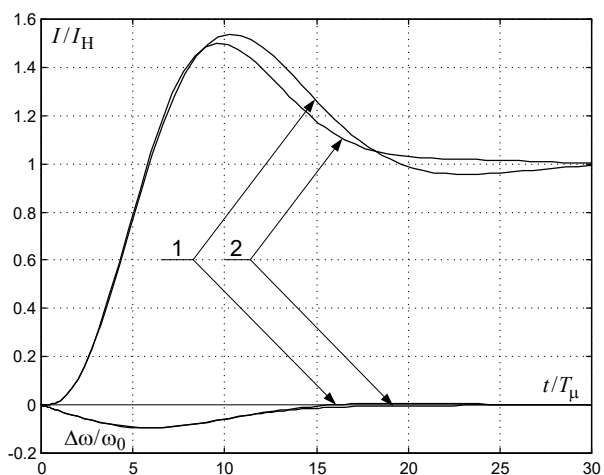


Рисунок 3 Переходные функции КРС по управляющему воздействию в системе с ПИ-РС (1) и с П-РС (2)



а)



б)

Рисунок 4 Графики изменения тока и падения скорости при набросе нагрузки в системе с ПИ-РС (кривые 1) и в комбинированной системе с П-РС (кривые 2) при $T_{\Phi} = 0$ (а) и $T_{\Phi} = 3 T_{\mu}$ (б)

Это подтверждается графиками изменения тока и статического падения скорости, приведенных на рис.4б. Включение фильтра с характеристическим полиномом $G_{\Phi}(p) = (1 + T_{\Phi}p)^2$ при $T_{\Phi} = 3 T_{\mu}$ обеспечивает примерно такие же переходные процессы при набросе нагрузки, как и в системе с ПИ-РС. Однако последнее, как отмечалось ранее, не приводит к ухудшению динамики при отработке управляющего воздействия.

Это особенно важно, когда замкнутый контур регулирования скорости (КРС) входит в состав системы регулирования положения (СРП), в силу того, что при этом можно обеспечить более высокие динамические и статические показатели СРП.

Можно показать, что при замене фильтра второго порядка фильтром первого порядка с полиномом $G_{\Phi}(p) = 1 + T_{\Phi}p$ постоянную времени T_{Φ} для достижения того же темпа изменения тока на начальном участке приходится увеличивать примерно в 2 раза. При этом обеспечивается одинаковое перерегулирование, но время затухания переходного процесса несколько увеличивается.

Выводы.

1. Комбинированная по возмущающему воздействию система регулирования скорости, приведенная на рис.2, позволяет регулировать статическое падение скорости при набросе нагрузки от нуля, до величины, имеющей место в системе подчиненного регулирования скорости с П-регулятором скорости.
2. При нулевой инерционности фильтра ($T_{\Phi} = 0$) комбинированная система при $k = 1$ обладает более высоким быстродействием, чем система с ПИ-РС не только при отработке управляющего воздействия, но и при набросе нагрузки.
3. Инерционность фильтра в канале обратной связи по статическому току влияет только на качество переходных процессов при набросе нагрузки. Управляющее воздействие обрабатывается как в обычной системе подчиненного регулирования с П-РС.
4. Применение рассматриваемой комбинированной системы регулирования скорости в качестве внутреннего контура регулирования скорости в системе регулирования положения может улучшить ее динамические и статические характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Мариничев В.Ю., Розкаряка П.И. Система подчиненного регулирования скорости с наблюдателем динамического и статического токов первого порядка // Проблема создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ.- Кременчуг: КГПУ. - №1 (10) – С.103-109.
2. Мариничев В.Ю. Токоограничение в астатических по нагрузке системах регулирования скорости с наблюдателями состояния // Наукові праці ДонНТУ. Серія “ Електротехніка і енергетика”, Випуск 67 – Донецьк: ДонНТУ, 2003. – С.174-181.