

УДК 62-83

к.т.н. Щелоков А.Г.,
к.т.н. Карпук И.А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНОЙ СВЯЗИ В РЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ СО СКОЛЬЗЯЩИМИ РЕЖИМАМИ ПРИ НАЛИЧИИ ФРИКЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

В данной статье рассмотрен вопрос уменьшения статической ошибки в релейных системах управления. Показано, что уменьшение статической ошибки возможно путем применения нелинейной пропорционально-интегральной связи. Представлены результаты компьютерного моделирования и основные расчетные зависимости.

Ключевые слова: фрикционные автоколебания, релейная система управления, нелинейная пропорционально-интегральная связь.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Во многих отраслях промышленности существуют машины и механизмы, механическая характеристика фрикционной нагрузки которых содержит падающий участок. К таким механизмам относятся валки прокатных станков, колесно-рельсовый транспорт, металлообрабатывающие станки и др. Известно, что при попадании рабочей точки электропривода (ЭП) на этот участок при определенном соотношении параметров электромеханической системы могут возникнуть т. н. фрикционные автоколебания (ФА), которые приводят к негативным последствиям: ускоренному износу и аварийным разрушениям кинематических звеньев механизмов, ухудшению качества технологического процесса, снижению КПД и пр. [1]. В [2-4] показана возможность ликвидации ФА путем применения релейных систем управления (РСУ), работающих в скользящем режиме. Данные РСУ обеспечивают полное подавление ФА, квазиинвариантность к изменению параметров объекта управления, высокое качество переходных процессов. Однако РСУ присущи и некоторые недостатки, например, наличие статической ошибки (иногда весьма существенной) для систем, синтезированных в фазовом пространстве естественных координат (например, ско-

рость и ток двигателя, ЭДС преобразователя).

Постановка задачи. Уменьшение статической ошибки в релейных системах управления, работающих с фрикционной нагрузкой путем использования дополнительной нелинейной пропорционально-интегральной связи в релейных алгоритмах управления.

Изложение материала и его результаты. Известно [5], что введение интеграла от ошибки регулирования позволяет получить РСУ в общем случае с астатизмом первого порядка по заданию и возмущению, а для объектов, имеющих собственные нулевые корни характеристического уравнения, – повысить на единицу порядок астатизма. В этом случае для одномассового ЭП постоянного тока закон управления РСУ в относительных единицах имеет вид [4]:

$$U = -\text{sign}(\Theta_{II} + \mathbf{K}\boldsymbol{\eta}), \quad (1)$$

где: Θ_{II} – величина нелинейной интегральной связи (НИ-связи); \mathbf{K} – вектор-строка коэффициентов обратных связей; $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{X} - \mathbf{X}^*$ – вектор ошибок координат состояния системы; \mathbf{X} – вектор исходных координат состояния системы; \mathbf{X}^* – вектор заданных траекторий.

Согласно [5], величина Θ_{II} определяется следующим образом:

$$\Theta_{И} = \begin{cases} \frac{k_{И}}{p} \eta_1, & \text{при } |\eta_1| < |\eta_{1M\Sigma}^{уст}|, |\Theta_{И}| < |\Theta_{ИМ}|; \\ \frac{k_{И}}{p} \eta_{1M\Sigma}^{уст}, & \text{при } |\eta_1| \geq |\eta_{1M\Sigma}^{уст}|, |\Theta_{И}| < |\Theta_{ИМ}|; \\ \pm \Theta_{ИМ}, & \text{при } |\Theta_{И}| \geq |\Theta_{ИМ}|, \end{cases} \quad (2)$$

где: $k_{И}$ – коэффициент усиления интегральной связи; $\Theta_{ИМ}$ – предельное значение выходной величины интегральной связи; η_1 – ошибка по главной регулируемой координате (в данном случае это скорость двигателя); $\eta_{1M\Sigma}^{уст}$ – максимально возможная ошибка регулирования в установившемся режиме.

Однако, как показано в [4], использование НИ-связи вида (2) в РСУ для электро-механических объектов с фрикционной нагрузкой может привести к возникновению автоколебательных режимов. Также ухудшение качества переходных процессов возможно и при постоянной статической нагрузке ввиду нестационарности ве-

личины $\Theta_{И}^{треб}$ – требуемого значения сигнала на выходе НИ-связи.

Для ликвидации этих недостатков в [4] вместо НИ-связи предложено использование нелинейной пропорционально-интегральной связи (НПИ-связи):

$$\Theta_{ПИ} = \begin{cases} \frac{k_{И}}{p} \eta_1 + k_{П} \eta_1, & \text{при } |\eta_1| < |\eta_{1M\Sigma}^{уст}|, |\Theta_{ПИ}| < |\Theta_{ИМ}|; \\ \frac{k_{И}}{p} \eta_{1M\Sigma}^{уст}, & \text{при } |\eta_1| \geq |\eta_{1M\Sigma}^{уст}|, |\Theta_{ПИ}| < |\Theta_{ИМ}|; \\ \pm \Theta_{ИМ}, & \text{при } |\Theta_{ПИ}| \geq |\Theta_{ИМ}|, \end{cases} \quad (3)$$

где $k_{П}$ – коэффициент усиления пропорциональной части.

Применение РСУ с НПИ-связью вида (3) позволяет ликвидировать ФА, обеспечить астатизм первого порядка по заданию и возмущению, получить высокое качество переходных процессов и добиться малой чувствительности к параметрическим и координатным воздействиям. Однако при задающих воздействиях, характеризующихся достаточно большой начальной ошибкой регулирования $|\eta_1| \leq |\eta_{1M\Sigma}^{уст}|$, подключение выходного сигнала пропорциональной части $\Theta_{П} = k_{П} \eta_1$ в начальный мо-

мент времени может привести к ухудшению переходных процессов. Аналогичная ситуация может возникнуть при скачкообразном изменении задающих или возмущающих воздействий. Поэтому представляет интерес дальнейшее усовершенствование НПИ-связи в РСУ с целью получения высоких статических и динамических показателей качества при различных задающих и возмущающих воздействиях.

Решение поставленной задачи представляется возможным путем применения НПИ-связи следующего вида:

$$\Theta_{ПИ} = \begin{cases} \frac{k_{И}}{p} \eta_1 + \left(1 - \left|\frac{\eta_1}{\eta_{1П}}\right|\right) k_{П} \eta_1, & \text{при } |\eta_1| < |\eta_{1П}|, |\Theta_{ПИ}| < |\Theta_{ИМ}|; \\ \frac{k_{И}}{p} \eta_1, & \text{при } |\eta_{1П}| \leq |\eta_1| \leq |\eta_{1М\Sigma}^{уст}|, |\Theta_{ПИ}| < |\Theta_{ИМ}|; \\ \frac{k_{И}}{p} \eta_{1М\Sigma}^{уст}, & \text{при } |\eta_1| \geq |\eta_{1М\Sigma}^{уст}|, |\Theta_{ПИ}| < |\Theta_{ИМ}|; \\ \pm \Theta_{ИМ}, & \text{при } |\Theta_{ПИ}| \geq |\Theta_{ИМ}|. \end{cases} \quad (4)$$

Структурная схема НПИ-связи вида (4) представлена на рисунке 1.

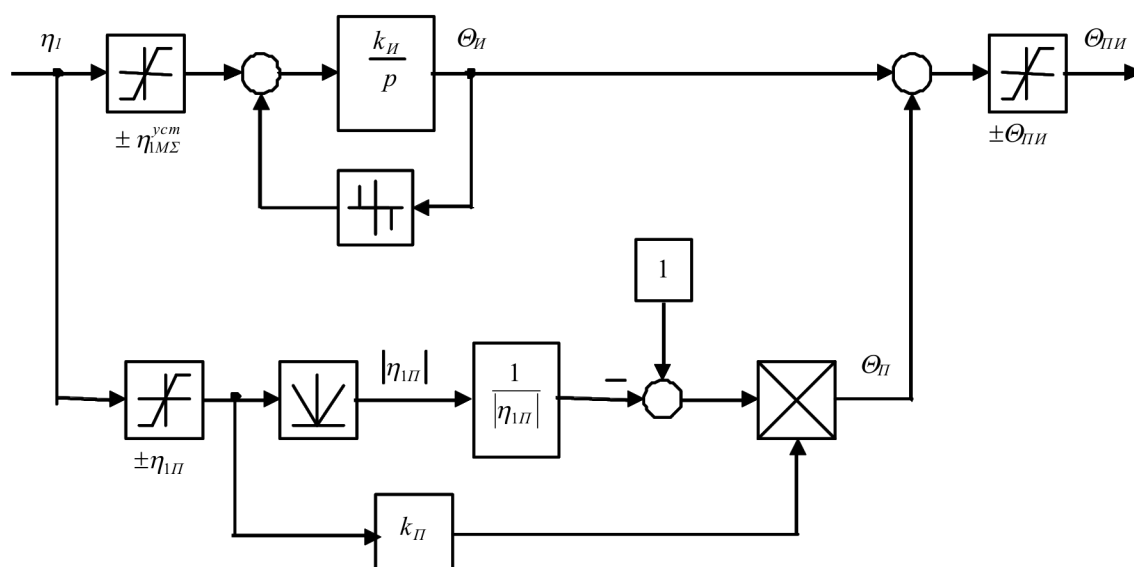


Рисунок 1 – Структурная схема нелинейной пропорционально-интегральной связи вида (4)

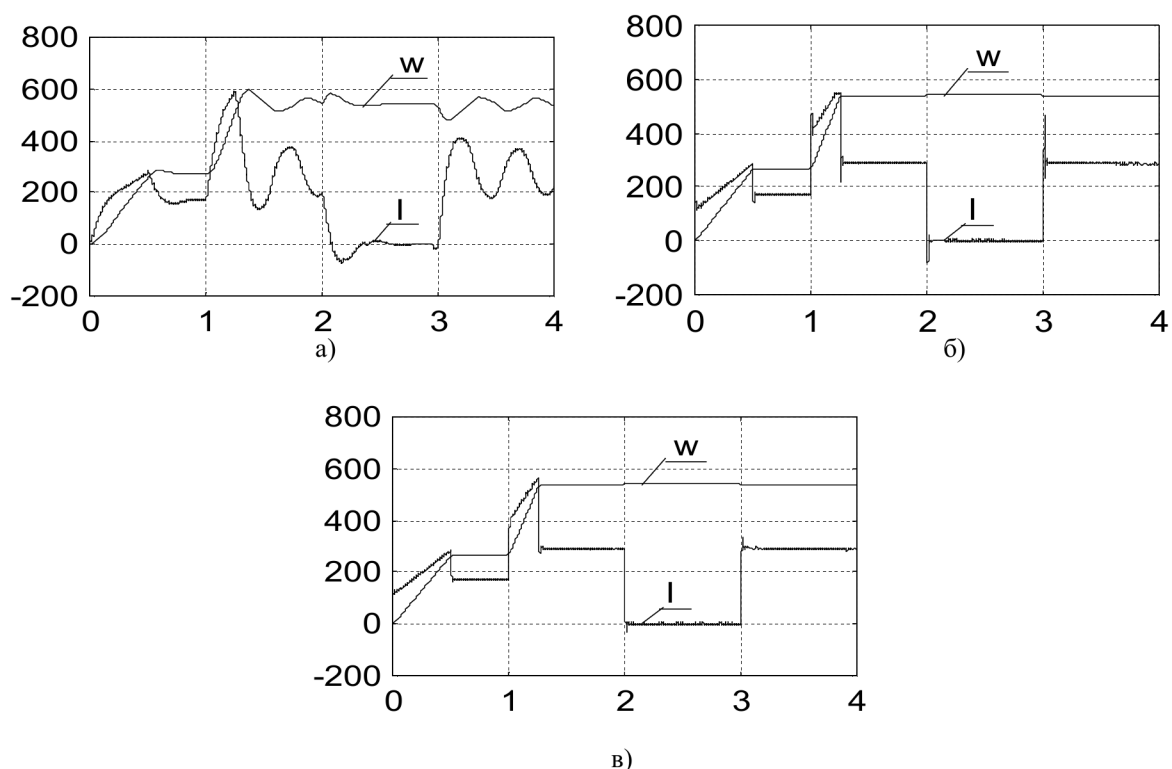
Рассмотрим работу РСУ с данной НПИ-связью. Как видно из (4), подключение выходного сигнала пропорциональной части (П-части) $\Theta_{П}$ происходит при достижении ошибки регулирования значения $\pm\eta_{1П}$. Величину $\eta_{1П}$ целесообразно принимать в пределах 10-15 % от максимально возможной ошибки регулирования в установившемся режиме.

В случае недостаточного темпа нарастания выходного сигнала НПИ-связи $\Theta_{ПИ} = \Theta_{И}$ подключение П-части вызывает его увеличение ($\Theta_{ПИ} = \Theta_{И} + \Theta_{П}$), что является при-

чиной более интенсивного снижения ошибки регулирования η_1 . Это позволяет получить на момент окончания времени пуска требуемую величину выходного сигнала НПИ-связи $\Theta_{ПИ} = \Theta_{И}^{треб}$ ($\Theta_{П} = 0$).

В случае избыточного сигнала $\Theta_{ПИ}$ в момент окончания времени пуска подключение П-части вызывает быстрое снижение величины $\Theta_{ПИ}$ до требуемого значения $\Theta_{И}^{треб}$.

Наличие варьируемого множителя $\left(1 - \left|\frac{\eta_1}{\eta_{1П}}\right|\right)$ позволяет осуществить плавное



ω – скорость двигателя, c^{-1} ; I – ток двигателя, А

Рисунок 2 – Графики переходных процессов для тока и скорости двигателя при пуске с фрикционной нагрузкой РСУ одномассового ЭП при наличии:

а) НИ-связи вида (2); б) НПИ-связи вида (3); в) НПИ-связи вида (4)

подключение П-части, благодаря чему удается избежать больших пиков тока. Коэффициент усиления П-части НПИ-связи k_{II} следует принимать максимальным из условия существования в РСУ устойчивого скользящего режима при наиболее неблагоприятных изменениях параметров ЭП. Выбор k_{II} – согласно [5].

Для анализа работоспособности РСУ с НПИ-связью вида (4), применительно к одномассовому ЭП с фрикционной нагрузкой, было произведено компьютерное моделирование в среде MATLAB / Simulink следующего рабочего цикла: пуск под нагрузкой – увеличение задания на скорость до номинального значения – сброс нагрузки – наброс нагрузки. Резуль-

таты моделирования представлены на рисунке 2. Таким образом, использование нелинейной пропорционально-интегральной связи вида (4) позволяет улучшить качество переходных процессов. При этом не нарушаются принципы построения релейных систем управления с дополнительной интегральной связью, т. к. структура и параметры интегральной части абсолютно не меняются, а подключение пропорциональной части фактически представляет собой незначительную автоматическую коррекцию коэффициента обратной связи при η_1 в алгоритме управления (1) в определенные моменты времени.

Библиографический список

1. Клепиков В.Б. О «фрикционных» автоколебаниях в электроприводах / В.Б. Клепиков. — *Электричество*, 1986. — № 4. — С. 59–62.
2. Мотченко А.И. Выбор оптимальных параметров релейной системы управления электропривода при наличии фрикционной нагрузки / А.И. Мотченко, А.Г. Щёлоков // *Вестник МАНЭБ*. — Алчевск, 2001. — Вып. 1/2001 (37). — С. 68–70.
3. Мотченко А.И. Подавление фрикционных автоколебаний в двухмассовых электромеханических системах / А.И. Мотченко, А.Г. Щёлоков, Е.В. Полилов // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ*. — Кременчук : КДПУ, 2004. — Вып. 3/2004 (26). — С. 21–22.
4. Щёлоков А.Г. Синтез релейных систем управления электроприводов постоянного тока с отрицательным вязким трением в нагрузке: дисс. ... канд. техн. наук.: 05.09.03 / А.Г. Щёлоков. — Харьков, 2002. — 243 с.
5. Яблонь В.П. Синтез релейных систем следящего электропривода повышенной точности с низкой чувствительностью к параметрическим и координатным возмущениям: дисс. ... канд. техн. наук.: 05.09.03 / В.П. Яблонь. — Донецк : Донецкий гос. тех. унив-т, 1999. — 220 с.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. ДонГТУ Комаревцевой Л.Н.,
главным энергетиком ПАО «АМК» Диковичем Ю.А.**

Статья поступила в редакцию 23.05.16.

к.т.н. Щолоков О.Г., к.т.н. Карпук І.А. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ВИКОРИСТАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРАЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ В РЕЛЕЙНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ З КОВЗАЮЧИМИ РЕЖИМАМИ ЗА НАЯВНОСТІ ФРИКЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

В даній статті розглянуто питання зменшення статичної помилки в релейних системах керування. Показано, що зменшення статичної помилки можливо шляхом застосування нелінійного пропорційно-інтегрального зв'язку. Подані результати комп'ютерного моделювання і основні розрахункові залежності.

Ключові слова: фрикційні автоколивання, релейна система керування, нелінійний пропорційно-інтегральний зв'язок.

PhD Shchiolokov A.G., PhD Karpuk I.A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

USING A NON-LINEAR PROPORTIONAL-INTEGRAL FEEDBACK IN RELAY CONTROL SYSTEMS WITH SLIDING MODES AT CONTINUOUS FRICTION LOAD

This paper studies the problem of reducing the static error in the relay control systems. A decrease in the static errors is possible by applying a nonlinear proportional-integral feedback is showed. The results of computer simulation and the basic calculation dependences are given.

Key words: friction self-oscillation, relay control system, nonlinear proportional-integral feedback.