

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ ЦИФРОВОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ НЕУРАВНОВЕШЕННУЮ НАГРУЗКУ

Канд. техн. наук, доц. **СТРИЖНЕВ А. Г.**,
инженеры **ЛЕДНИК Г. В.**, **ШИХОВ А. А.**, **РУСАКОВИЧ А. Н.**

Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ОКБ ТСП»

Многие цифровые следящие системы имеют неуравновешенную нагрузку, которая оказывает отрицательное влияние на точность их работы. Определение неуравновешенной нагрузки традиционными способами [1] с использованием информации от дополнительных датчиков момента или положения нагрузки является сложной и трудно реализуемой задачей. Сложность заключается в необходимости подключения дополнительных датчиков, а трудность – в настройке систем, так как при высокой чувствительности дополнительных датчиков система становится неустойчивой, а при низкой – снижается точность ее работы. Применяемые известные механические способы [2] для определения и устранения статической и динамической неуравновешенностей нагрузки имеют те же недостатки, к тому же их используют только на стадии изготовления механизмов и деталей. Кроме того, эти способы трудно реализовать, так как необходимо иметь специальное оборудование и контрольно-измерительную аппаратуру, а сам процесс настроечных и измерительных работ становится длительным и трудоемким. Отмеченные недостатки не позволяют в полной мере использовать известные технические решения для повышения точности работы цифровых следящих систем, имеющих неуравновешенную нагрузку. Ниже предлагаются более простой и доступный для практической реализации способ определения влияния неуравновешенной нагрузки на точность работы

цифровой следящей системы и метод компенсации этих влияний.

Структура и принцип работы цифровой следящей системы. Цифровая следящая система обычно имеет структурную схему, которая представлена на рис. 1. Эта система содержит устройство управления УУ, цифровое вычислительное устройство ЦВУ, цифровой регулятор ЦР, цифровое усилительно-преобразовательное устройство УПУ, исполнительный двигатель ИД, приводной механизм ПМ, цифровой преобразователь угла ЦПУ и нагрузку Н.

Система работает следующим образом. УУ вырабатывает управляющий сигнал a_i в виде цифрового кода, который поступает на суммирующий вход ЦВУ, где из управляющего сигнала вычитается сигнал b_i обратной связи, поступающий из ЦПУ. Сигнал разности c_i с выхода ЦВУ, вычисленный по формуле $c_i = a_i - b_i$, поступает на ЦР, который обеспечивает требуемые динамические показатели системы и формирует сигналы в виде цифрового кода d_i для управления УПУ. Само УПУ усиливает и, если необходимо, преобразует эти сигналы в напряжения u_i , необходимые для управления ИД, который через ПМ поворачивает нагрузку и входную ось ЦПУ на такой угол φ_i , при котором $c_i = 0$.

В установившемся режиме работы системы (рис. 1) предполагается, что сигнал c_i (ошибка системы) будет минимальным и не превысит заданного значения. Однако в реальности это не так.

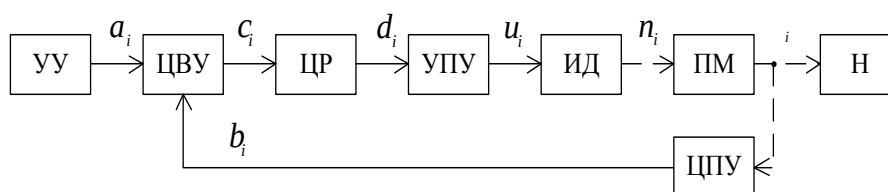


Рис. 1. Структурная схема цифровой следящей системы

Большинство цифровых следящих систем содержат неуравновешенную нагрузку, которая оказывает сильное влияние на точность их работы, что в ряде случаев является недопустимым. Кроме того, неуравновешенность нагрузки трудно определить, поскольку ее влияние на работу системы имеет сложную функциональную зависимость от выходной координаты. В связи с этим были разработаны способ определения влияний неуравновешенной нагрузки и метод компенсации влияний неуравновешенной нагрузки на работу цифровой следящей системы.

Способ определения влияний неуравновешенной нагрузки на работу цифровой следящей системы. Данный способ предполагает перевод системы в тестовый режим работы [3]. С помощью задающего устройства формируют управляющий тестовый сигнал a_i , линейно изменяющийся с постоянной малой скоростью во всем диапазоне рабочих значений от $a_{\min}$ до $a_{\max}$ и от $a_{\max}$ до $a_{\min}$. Изменение управляющего сигнала a_i в двух направлениях движения является существенным и обязательным, особенно для систем, работающих в угломестной (вертикальной) плоскости. График изменения тестового управляющего сигнала a_i для двух направлений движения показан на рис. 2.

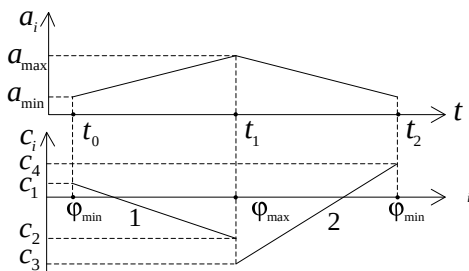


Рис. 2. График тестового управляющего сигнала и сигнала ошибки цифровой следящей системы

Управляющий тестовый сигнал a_i подают на вход системы и в процессе ее работы записывают текущие значения ошибки c_i и угла φ_i поворота нагрузки. Так как система содержит ЦПУ с коэффициентом преобразования $K_{\text{АЦП}}$, вместо угла φ_i можно записывать выходной b_i код ЦПУ. Используя полученные данные, строят графики зависимостей текущей ошибки c_i в функции угла поворота φ_i или сигнала b_i . Закон изменения текущей ошибки c_i в функции

угла поворота φ_i может быть любым, и для примера на рис. 2 он показан в виде линейных функций 1 и 2.

В диапазоне углов $(\varphi_{\min}; \varphi_{\max})$ данный закон (рис. 2, функция 1) может быть представлен в виде уравнения

$$c_{i1} = A_1 \varphi_i + A_2, \quad (1)$$

где A_1, A_2 – постоянные коэффициенты, $A_1 = \frac{\Delta c_{21}}{\Delta \varphi_1}$, $A_2 = c_{n1} - A_1 \varphi_{n1}$; Δc_{21} , $\Delta \varphi_1$ – диапазоны изменения ошибки и угла, $\Delta c_{21} = c_2 - c_1$, $\Delta \varphi_1 = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$; c_{n1} , φ_{n1} – фиксированные значения ошибки и угла (например, $c_{n1} = c_2$, $\varphi_{n1} = \varphi_{\max}$).

Аналогично для диапазона углов $(\varphi_{\max}; \varphi_{\min})$ (рис. 2, функция 2)

$$c_{i2} = A_3 \varphi_i + A_4, \quad (2)$$

где A_3, A_4 – постоянные коэффициенты, $A_3 = \frac{\Delta c_{43}}{\Delta \varphi_2}$, $A_4 = c_{n2} - A_3 \varphi_{n2}$; Δc_{43} , $\Delta \varphi_2$ – диапазоны изменений ошибки и угла, $\Delta c_{43} = c_4 - c_3$, $\Delta \varphi_2 = \varphi_{\min} - \varphi_{\max}$; c_{n2} , φ_{n2} – фиксированные значения ошибки и угла (например, $c_{n2} = c_4$, $\varphi_{n2} = \varphi_{\min}$); φ_i – угол поворота нагрузки, $\varphi_i = \frac{b_i}{K_{\text{АЦП}}}$; $K_{\text{АЦП}}$ – коэффициент преобразова-

ния ЦПУ, $K_{\text{АЦП}} = \frac{\Delta b}{\Delta \varphi}$; Δb – диапазон изменения кода b_i , $\Delta b = b_{\max} - b_{\min}$; $\Delta \varphi$ – диапазон изменения угла φ_i , $\Delta \varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$; $b_{\min}$, $b_{\max}$ – минимальное и максимальное значения кода b_i , соответствующие аналогичным значениям угла поворота φ_i .

При работе цифровой следящей системы в диапазоне рабочих углов и наличии неуравновешенной нагрузки, действующей на приводной механизм, ошибка слежения не остается постоянной (рис. 2), а изменяется. Величина ошибки зависит не только от скорости слежения, но и от характера неуравновешенности нагрузки. Балансировка нагрузки с помощью механических устройств – достаточно трудная, а порой и невыполнимая задача. Достаточно

просто можно решить данную задачу путем компенсации.

Метод компенсации влияний неуравновешенной нагрузки на работу цифровой следящей системы. Данный метод предполагает изменение структурной схемы системы [3]. Измененная структурная схема цифровой следящей системы представлена на рис. 3, которая в отличие от схемы на рис. 1 дополнительно содержит цифровой вычислитель ЦВ и цифровой сумматор ЦС.

Для компенсации отрицательных влияний неуравновешенной нагрузки, выявленных в процессе тестового контроля (рис. 2), требуется полученные уравнения (1) и (2) записать в ЦВ. В процессе работы системы ЦВ вычисляет значения сигналов c_{i1} и c_{i2} , которые в дальнейшем используют для компенсации ошибки слежения, вызванной неуравновешенностью нагрузки. Причем при отрицательном знаке текущего сигнала ошибки c_i , формируемого устройством ЦВУ, вычислитель ЦВ выдает на вход сумматора ЦС сигнал c_{i1} , а при положительном – сигнал c_{i2} . В результате на выходе сумматора ЦС будут сформированы управляющие сигналы:

$$\begin{aligned} q_1 &= c_i + c_{i1} \text{ при } c_i \geq 0; \\ q_2 &= c_i + c_{i2} \text{ при } c_i < 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Сигналы (3) поступают на вход ЦР, и в процессе дальнейшей работы системы контур управления их обрабатывает и устраняет ошибку слежения, источником которой является неуравновешенная нагрузка. В тех случаях, когда ошибка системы имеет шумоподобный характер и трудно определить знак текущего сигнала ошибки c_i , знак сигнала удобно находить по управляющему сигналу a_i . Причем когда производная управляющего сигнала положительна

($a'_i \geq 0$), считать $c_i \geq 0$, и наоборот, если $a'_i < 0$, то считать $c_i < 0$.

После реализации данного алгоритма нужно снова проверить работу системы по проверочному сигналу (рис. 2), и в случае неполной компенсации управляющий сигнал вычислять соответственно по формулам:

$$q_1 = c_i + K_1 c_{i1}; \quad q_2 = c_i + K_2 c_{i2}, \quad (4)$$

где K_1, K_2 – постоянные коэффициенты, подбираемые при настройке.

Экспериментальная проверка полученных результатов. Проверку влияний неуравновешенной нагрузки на точность работы цифровой следящей системы и компенсацию этих влияний проводили на приводе вертикального наведения оптико-электронной системы, который имеет схему, аналогичную рис. 1. В процессе экспериментальной проверки получены графики изменения сигналов управления a_i , выходного b_i , ошибок c_i и $\hat{c}_i$ системы, которые приведены на рис. 4.

Ошибка $\hat{c}_i$ системы определяется с использованием алгоритма скользящего среднего по формуле [4]

$$\hat{c}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} c_{i+j} \text{ при } N = 20.$$

На рис. 4 по оси абсцисс отложено текущее время (мс), по оси ординат – текущие значения сигналов управления, выходного и ошибок в делениях ЦПУ (дел.). Для наглядности управляющий a_i и выходной b_i сигналы приведены в уменьшенном в 20 раз масштабе. Из-за наличия неуравновешенной нагрузки сигнал ошибки $\hat{c}_i$ системы изменяется в диапазоне значений от -105 до $+45$ дел.

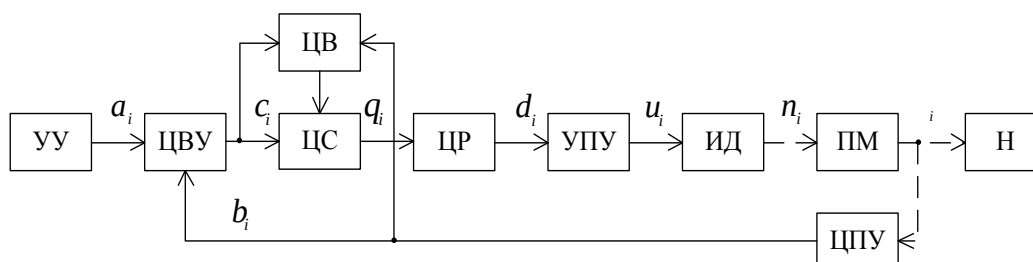


Рис. 3. Измененная структурная схема цифровой следящей системы

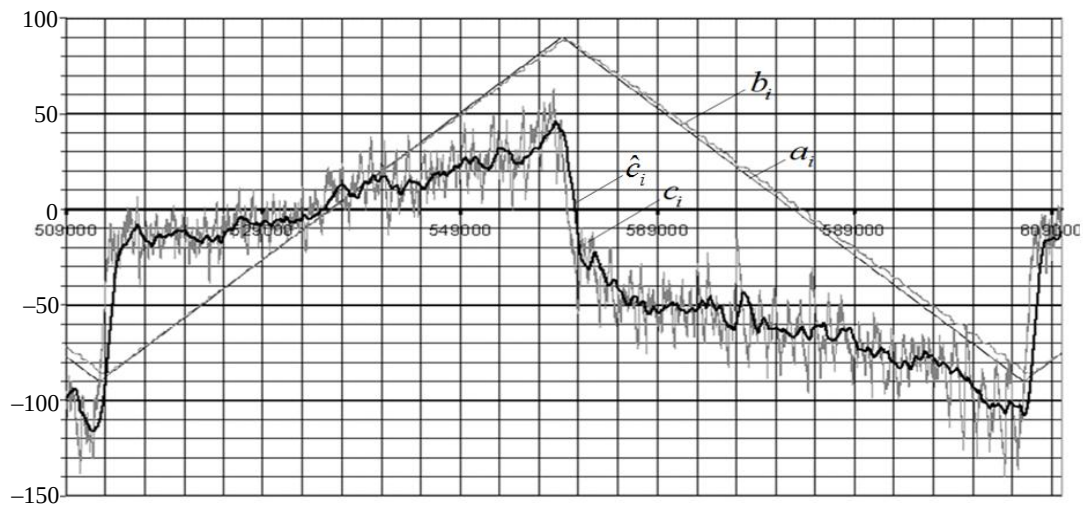


Рис. 4. График изменения сигналов управления a_i , выходного b_i и ошибки c_i

С учетом известных величин ($b_{\min} = -1800$ дел.; $b_{\max} = 1800$ дел.; $c_1 = -26,5$ дел.; $c_2 = 36,2$ дел.; $c_3 = -22,1$ дел.; $c_4 = -110,3$ дел.) и используя рекомендации [4], были получены уравнения (1) и (2) в виде: $c_{i1} = 0,01742b_i + 4,844$; $c_{i2} = 0,0245b_i - 66,2$. Для упрощения расчетов значения c_1, c_2, c_3, c_4 выбраны примерно. Более точно коэффициенты уравнений (1) и (2) можно определить, произведя линейную аппроксимацию с использованием метода наименьших квадратов, или используя полиномиальные уравнения более высокого порядка:

$$c_{i1} = A_{1,1}\varphi_i^n + A_{1,2}\varphi_i^{n-1} + \dots + A_{1,n}\varphi_i + A_{1,n+1};$$

$$c_{i2} = A_{2,1}\varphi_i^m + A_{2,2}\varphi_i^{m-1} + \dots + A_{2,m}\varphi_i + A_{2,m+1},$$

где $A_{1,1}, \dots, A_{1,n+1}; A_{2,1}, \dots, A_{2,m+1}$ – постоянные коэффициенты; n, m – показатели степени, причем $n > 1$ и $m > 1$.

После реализации измененной схемы (рис. 3) и проверки работы привода по проверочному сигналу (рис. 2) наблюдалась неполная компенсация влияний неуравновешенной нагрузки на работу экспериментальной установки. Для лучшей компенсации влияний неуравновешенной нагрузки на работу привода управляющий сигнал вычисляли по формулам (4): $q_1 = c_i + K_1 c_{i1}$, $q_2 = c_i + K_2 c_{i2}$, где K_1, K_2 – постоянные коэффициенты, подобранные при настройке ($K_1 = 0,4, K_2 = 0,2$).

Графики сигналов управления a_i , выходного b_i , ошибок c_i и $\hat{c}_i$ системы после компенсации неуравновешенной нагрузки приведены на рис. 5.

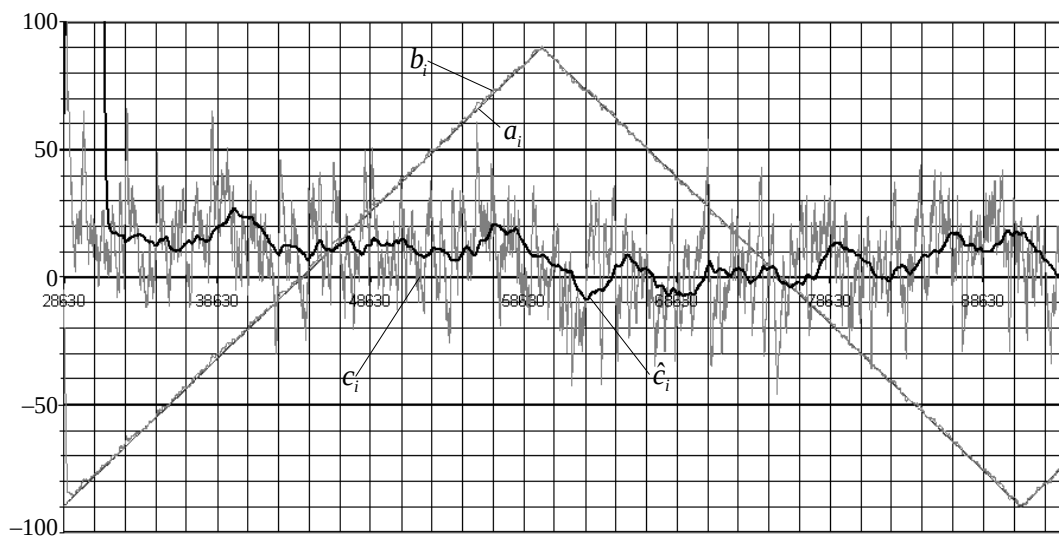


Рис. 5. График изменения после компенсации сигналов управления a_i , выходного b_i и ошибки c_i

После компенсации влияний неуравновешенной нагрузки диапазон изменений сигнала ошибки $\hat{c}_i$ привода составил от -10 до $+25$ дел. Таким образом, произошло уменьшение диапазона изменений сигнала ошибки $\hat{c}_i$ системы более чем в четыре раза.

ВЫВОД

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о целесообразности использования предложенного способа при определении влияний неуравновешенной нагрузки и высокой эффективности метода компенсации влияний неуравновешенной нагрузки на работу цифровой следящей системы. Использование дополнительных элементов (цифрового сумматора и цифрового вычислителя) в составе цифровой следящей системы позволяет существенно скомпенсировать ошибку слежения, вызванную неуравновешенностью нагрузки, и тем самым повысить точность работы системы без применения дополнительных датчиков и механических балансирующих устройств. Эксперимен-

тально подтверждено уменьшение диапазона изменений ошибки системы более чем в четыре раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Следящий** привод: а. с. 2318232 РФ, МПК G 05 В 11/01.
2. **Справочник** по балансировке / М. Е. Левит [и др.]; под общ. ред. М. Е. Левита. – М.: Машиностроение, 1992. – 464 с.
3. **Способ** и цифровая следящая система для определения и компенсации влияний неуравновешенности нагрузки на работу следящих систем и приводов: Евразийский пат. на изобретение 016669, G 05 В 11/00 / А. Г. Стрижнев, Г. В. Ледник, А. А. Шихов, С. Л. Ботеновский, И. А. Гончарук, С. М. Виноградов, Г. В. Кирячок // Дата выдачи 29.06.2012. Патентовладелец: ООО «Техносоюзпроект» (ВУ).
4. **Глинченко, А. С.** Цифровая обработка сигналов: в 2 ч. Ч. 1 / А. С. Глинченко. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2001. – 199 с.
5. **Цифровая** следящая система: Евразийский пат. на изобретение 016668, G 05 В 11/00 / А. Г. Стрижнев, Г. В. Ледник, А. А. Шихов, С. Л. Ботеновский, И. А. Гончарук, С. М. Виноградов, Г. В. Кирячок // Дата выдачи 29.06.2012. Патентовладелец: ООО «Техносоюзпроект» (ВУ).

Поступила 30.01.2013