

Финаев Валерий Иванович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: finaev_val_iv@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Павленко Елена Николаевна – к.т.н.; соискатель.

Кирильчик Светлана Валерьевна – к.т.н.; соискатель.

Finaev Valeri Ivanovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: fin_val_iv@tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Pavlenko Elena Nikolaevna – cand. of eng. sc.; competitor.

Kirilchik Svetlana Valentinovna – cand. of eng. sc.; competitor.

УДК 621.82: 621.397

Л.К. Самойлов, С.А. Киракосян

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ УСТРОЙСТВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматриваются динамические погрешности восстановленного сигнала как сумма частных производных интеграла сигнала на выходе ЦАП за период дискретизации. Показано, что погрешность определяется: изменением разности длительности фронтов импульсов управления ЦАП; изменением разности задержек сигнала в ЦАП; зависимостью разности задержек сигнала в ЦАП от величины восстановленного сигнала; разностью амплитуд переднего и заднего фронтов импульсов на выходе ЦАП. Задержка сигнала в устройстве восстановления является причиной появления дополнительной погрешности, которая зависит от скорости изменения обрабатываемого сигнала. Существует оптимальная величина длительности импульса на выходе ЦАП, когда суммарная динамическая погрешность будет иметь минимальную величину. Уменьшение динамических погрешностей до уровня статических требует обеспечения значения отклонения разности времен задержек переднего и заднего фронтов импульса на выходе ЦАП на 4–6 порядков меньших T , что накладывает дополнительные ограничения на быстродействие устройства восстановления. Передискретизация цифрового сигнала на входе устройства восстановления уменьшает динамические погрешности устройства восстановления, но значительно повышает требования к скорости работы ЦАП и стабильности его временных параметров.

Восстановление сигналов; динамические погрешности восстановления; задержка сигнала; системы управления; передискретизация.

L.K. Samoilov, S.A. Kirakosjan

DYNAMIC ERROR OF DEVICES OF RESTORATION OF SIGNALS IN CONTROL SYSTEMS

Dynamic errors of the restored signal as the sum of private derivatives of integral of a signal on exit DAC during digitization are considered. It is shown, that the error is defined: change of a difference of duration of fronts of impulses of management DAC; change of a difference of delays of a signal in DAC; dependence of a difference of delays of a signal in DAC from size of the restored signal; a difference of amplitudes of forward and back fronts of impulses on exit DAC. The signal delay in the restoration device is the reason of occurrence of an additional error which

depends on speed of change of a processed signal. There is an optimum size of duration of an impulse on exit DAC when the total dynamic error will have the minimum size. Reduction of dynamic errors to level of the static demands maintenance of value of a deviation of a difference of times of delays of forward and back fronts of an impulse on exit DAC on 4–6 usages smaller T , that imposes additional restrictions on speed of the device of restoration. Redigitization of a digital signal on an input of the device of restoration reduces dynamic errors of the device of restoration, but considerably raises requirements to speed of work DAC and stability of its time parameters.

Restoration of signals; dynamic errors of restoration; a signal delay; control systems; redigitization

Введение. Для определения основных проблем, решаемых в статье, рассмотрим параметры устройства восстановления, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

Амплитуда дискретного сигнала на выходе ЦАП ($U_{\text{ЦАП}}^{\text{вых}}$) прямо пропорциональна значению двоичного кода цифрового сигнала.

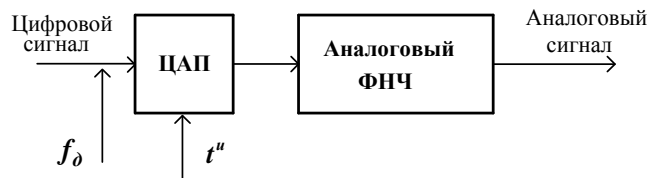


Рис. 1. Функциональная схема устройства восстановления

Время, в течение которого цифровой сигнал держится на входе ЦАП, определяется управляющим тактирующим импульсом $U_{\text{упр}}$ длительностью t^u и постоянной амплитудой U^{num} . Эти импульсы поступают с периодом T , который определяется частотой дискретизации f_d .

Амплитуда восстановленного аналогового сигнала на выходе аналогового ФНЧ ($U_{\text{ФНЧ}}^{\text{вых}}$) прямо пропорциональна двоичному коду цифрового сигнала и длительности импульса на входе ФНЧ.

Выбор величины длительности импульса управления. Устройство восстановления рис. 1 выдает восстановленный сигнал с задержкой ($t_{\text{зад}}$), которая может быть определена как [1]:

$$t^{\text{зад}} = t_{\text{ЦАП}}^{\text{зад}} + 0,5t^u + t_{\text{ФНЧ}}^{\text{зад}}. \quad (1)$$

Время задержки ЦАП ($t_{\text{ЦАП}}^{\text{зад}}$) определяется паспортными характеристиками преобразователя. Составляющая $0,5t^u$ равна задержке сигнала в ЦАП при оценке его работы в частотной области [2]:

Время задержки в ФНЧ ($t_{\text{ФНЧ}}^{\text{зад}}$) определяется частотой среза АЧХ, типом и порядком фильтра.

Среднеквадратическое значение приведенной погрешности устройства восстановления ($\gamma_{\text{вос}}$) может быть определено как

$$\gamma_{\text{вос}}^2 = \gamma_{\text{ЦАП}}^2 + \gamma_{\text{ФНЧ}}^2 + \gamma_{\text{дин}}^2 + \gamma_{\text{зад}}^2, \quad (2)$$

где $\gamma_{\text{ЦАП}}$ – это величина, определяемая половиной младшего разряда ЦАП (q) и погрешностью нелинейности $\gamma_{\text{нел}}$:

$$\gamma_{ЦАП} = 2^{-(q+2)} + \gamma_{НЕЛ};$$

$\gamma_{ФНЧ}$ – приведенная погрешность коэффициента передачи ФНЧ как четырехполюсника; $\gamma_{дин}$ – приведенная динамическая погрешность ЦАП, которая является предметом рассмотрения в настоящей работе; $\gamma_{зад}$ – приведенная погрешность за счет задержки информации в устройстве восстановления системы управления.

Влияние времени задержки проявляется в том, что после взятия отсчетов с датчика, в момент начала воздействия исполнительного механизма на объект управления датчик уже будет в другом состоянии [1].

Максимальная скорость возможного изменения состояния объекта может быть определена максимальным значениям первой производной сигнала датчика (M'_{max}). В этом случае максимальное значение приведенной погрешности за счет задержки информации в контуре управления будет следующим:

$$\gamma_{зад} = \frac{M'_{max} \cdot t^{зад}}{A_0}, \quad (3)$$

где A_0 – максимальное значение амплитуды сигнала датчика.

Традиционно берут $t^u = T$. Но с точки зрения уменьшения погрешности $\gamma_{зад}$ необходимо уменьшать величину $t_{зад}$. Это можно сделать только путем уменьшения t^u . На рис. 2 приведены графики, показывающие поведение динамических погрешностей как функции от t^u . Как видно из этих графиков, в системах управления существует оптимальное значение t^u .

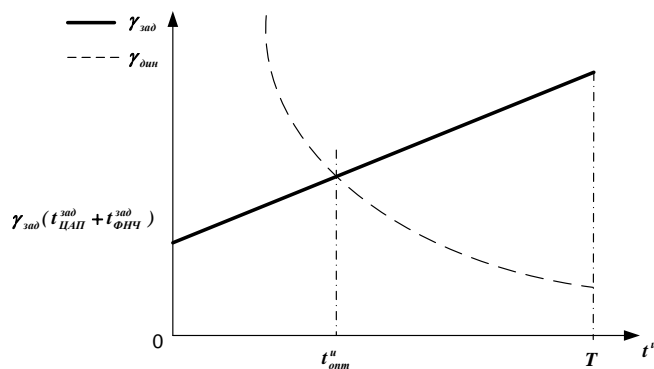


Рис. 2. График изменения динамических погрешностей устройства восстановления

Погрешности, определяемые параметрами импульса на выходе ЦАП. С общих позиций исследование динамических погрешностей в устройствах восстановления сводится к нахождению интеграла S , определяющего вольт-секундную площадь импульса ($U(t)$) на выходе ЦАП и оценке изменения этого интеграла (ΔS) в зависимости от параметров устройства:

$$S = \int_0^T U(t) dt. \quad (4)$$

Значение интеграла (4) зависит от таких параметров, как
 – разница между длительностями переднего и заднего фронта импульса ($\Delta S(t^+ - t^-)$) на выходе ЦАП;

– длительность импульса ($\Delta S(t^u)$);

– амплитуда импульса ($\Delta S(U_{ЦАП}^{вых})$);

– разница между амплитудой переднего и заднего фронта импульса $\Delta S(U_{ЦАП}^{+-})$.

Динамическая погрешность устройства восстановления может быть определена как

$$\gamma_{дин} = \frac{1}{S} \sqrt{\left(\frac{dS}{d(t^+ - t^-)}\right)^2 + \left(\frac{dS}{dt^u}\right)^2 + \left(\frac{dS}{dU_{ЦАП}^{вых}}\right)^2 + \left(\frac{dS}{d(U_{ЦАП}^{+-})}\right)^2} . \quad (5)$$

Рассмотрим отдельные составляющие динамической погрешности (5).

Составляющая $\frac{dS}{dt^u}$ уменьшается с ростом t^u и желательно всегда иметь

$t^u = T$, но при этом растет погрешность за счет увеличения времени задержки.

Переходной процесс установления напряжения на выходе ЦАП до уровня, определяемого $\gamma_{ЦАП}$, существенно зависит от значения выходного напряжения.

Разность $(t^+ - t^-)$ будет иметь большее значение для сигнала с большей амплитудой, что определяет величину $\frac{dS}{dU_{ЦАП}^{вых}}$.

Поясним составляющую $\frac{dS}{d(t^+ - t^-)}$.

Временная диаграмма дискретного восстановленного сигнала на выходе ЦАП с произвольным t^u приведена на рис. 3.

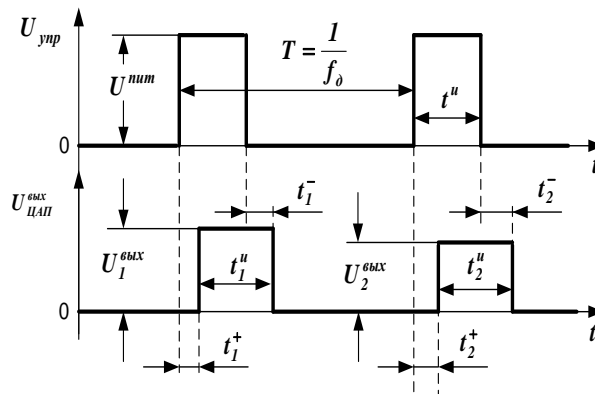


Рис. 3. Временная диаграмма дискретного восстановленного сигнала на выходе ЦАП

Интервалы времени для переднего (t^+) и заднего (t^-) фронтов импульсов на выходе ЦАП имеют две составляющие:

$$t^+ = t_{ynp}^+ + t_{зад}^+; \quad t^- = t_{ynp}^- + t_{зад}^-, \quad (6)$$

где t_{ynp}^+ – время задержки информации во входных регистрах ЦАП при записи входного кода; t_{ynp}^- – время задержки информации во входных регистрах ЦАП при обнулении входного регистра; $t_{зад}^+$ – время задержки информации на выходе ЦАП при изменении цифрового кода от нуля до величины, определяемой амплитудой преобразуемого сигнала; $t_{зад}^-$ – время задержки информации на выходе ЦАП при изменении цифрового кода от величины, определяемой амплитудой преобразуемого сигнала, до нуля.

Для рассматриваемого случая оценки погрешности преобразования амплитуды важно изменение абсолютного значения разности времен задержки:

$$|t^+ - t^-| = |t_{ynp}^+ - t_{ynp}^-| + |t_{зад}^+ - t_{зад}^-|. \quad (7)$$

Значения времен задержки t_{ynp}^+ и t_{ynp}^- различны между собой и зависят:

- ◆ от используемой цифровой элементной базы (однополярной, биполярной);
- ◆ разброса параметров транзисторов (емкости переходов, коэффициентов усиления (β));
- ◆ температуры.

Например, для биполярных транзисторов (элементы типа ТТЛШ) с ростом β и температуры разность $|t_{ynp}^+ - t_{ynp}^-|$ увеличивается.

Разность $|t_{зад}^+ - t_{зад}^-|$ в самом ЦАП имеет существенно большее значение и зависит:

- ◆ от величины преобразуемого сигнала;
- ◆ разности амплитуд переднего и заднего фронтов импульсов.

Возникновение погрешности из-за разности амплитуд фронтов $\frac{dS}{dU_{ЦАП}^{+-}}$ по-

ясняется на рис. 4.

Как видно из временной диаграммы, разность $|t_{зад}^+ - t_{зад}^-|$ для первого и третьего тактов будет незначительной, а на стыке 2-го и 3-го тактов вообще не будет переходного процесса. Максимальная величина $|t_{зад}^+ - t_{зад}^-|$ будет на 4-м такте. Это явление вызывает паразитную модуляцию выходного напряжения, что дает дополнительную динамическую погрешность.

В ряде случаев на входе устройства восстановления рис. 1 производится так называемое цифровое восстановление (передискретизация) цифрового сигнала, приводящее к увеличению частоты дискретизации на 1-2 порядка. При этом происходит снижение большинства динамических погрешностей, но влияние

$\frac{dS}{d(t^+ - t^-)}$ существенно увеличивается и повышаются требования к быстродействию ЦАП.

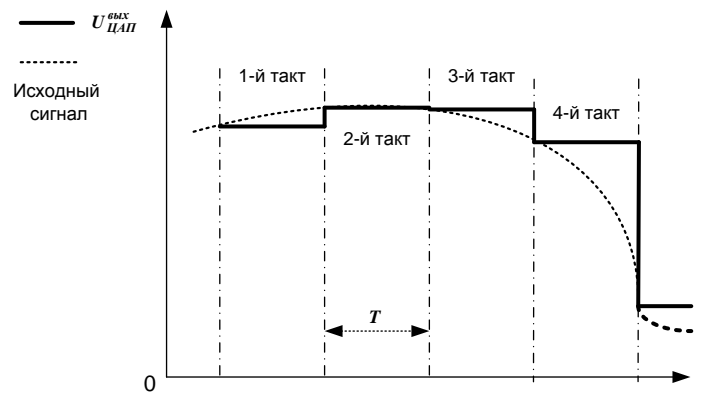


Рис. 4. Временная диаграмма сигнала на выходе ЦАП при $t^u = T$

Заключение. Уменьшение динамических погрешностей до уровня $\gamma_{\text{ЦАП}}$ требует обеспечения значения приращения $(t^+ - t^-)$ на 4–6 порядков меньших T , что накладывает дополнительные ограничения на быстродействие устройства восстановления.

Существует оптимальное значение длительности импульса на выходе ЦАП.

В режиме работы, когда $t^u = T$, наблюдается существенное различие амплитуд переднего и заднего фронта восстановленного импульса, что приводит к росту динамических погрешностей.

Передискретизация уменьшает динамические погрешности устройства восстановления, но значительно повышает требования к скорости работы ЦАП и стабильности его временных параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Самойлов Л.К.* Итерационные алгоритмы выбора частоты дискретизации аналоговых сигналов в цифровых системах управления и контроля // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 2 (127). – С. 43-53.
2. *Maheshwari R., Bharadia M., Gurta M.* Multirate DSP and its technique to reduce the cost of the analog signal conditioning filters // International Journal of Computer Applications. – 2010. – № 10
3. *Emmanuel C. Ifeachor., Barrie W. Jervis.* (2004). Digital signal processing. Prentise Hall. ISBN 0-201-59619-9.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм

Самойлов Леонтий Константинович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: samoilov@fep.tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371638; кафедра информационных измерительных систем и технологий; зав. кафедрой.

Киракосян Степан Айрапетович – e-mail: asni@fep.tti.sfedu.ru; тел.: 89526039071; кафедра информационных измерительных систем и технологий; аспирант.

Samoilov Leonty Konstantinovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: samoilov@fep.tti.sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371638; the department of information measuring systems and technologies; head the department.

Kirakosjan Stepan Ajrapetovich – e-mail: asni@fep.tti.sfedu.ru; phone: +79526039071; the department of information measuring systems and technologies; postgraduate student.