

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

УДК 62-52 + 004.4

**SHAPING-АЛГОРИТМЫ ПОДАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ОБЪЕКТОВ
УПРАВЛЕНИЯ**

А.П. КУЗНЕЦОВ, А.В. МАРКОВ, А.С. ШМАРЛОВСКИЙ, Т.В. ГАВРИЛИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 1 августа 2011*

Рассмотрены основные shaping-алгоритмы подавления колебаний. Приведены выражения для вычисления импульсных последовательностей ZV-, ZVD-, UM-ZV-, EI- и SNA-ZV-shaping-фильтров. Представлены результаты анализа эффективности shaping-алгоритмов на примере системы управления грузом в подъемных кранах. Даны некоторые практические рекомендации.

Ключевые слова: shaping, shaper, подавление колебаний, алгоритмы управления, фильтры.

Введение

Существует большое количество систем управления, во время работы которых возникают нежелательные колебательные процессы. Часто в таких системах осуществляется перемещение объекта управления, для чего на него оказывается силовое воздействие, которое ввиду особенностей механической части и приводит к нежелательной вторичной реакции. Для подавления возникающих колебаний в систему можно ввести дополнительный канал управления, однако это осуществимо при наличии соответствующего датчика обратной связи, что по различным причинам в большинстве случаев невозможно: сложно с технической точки зрения, экономически нецелесообразно и пр. Поэтому в этих условиях необходимо использовать разомкнутую систему управления (фильтр), которая в соответствии с заложенным в нее алгоритмом скорректирует управляющий сигнал таким образом, чтобы наряду с выполнением основной операции полностью нейтрализовать или уменьшить до допустимого уровня нежелательные колебания.

Наибольшее распространение для решения описанной задачи получили shaping-фильтры (input-shaping filter, command shaping, shaper). Алгоритм их работы основан на перераспределении во времени силового воздействия на объект управления при сохранении неизменной величины суммарного воздействия. За счет относительного увеличения времени перехода системы из одного состояния в другое обеспечивается компенсация возникающих колебаний, а сдвиг управляющего воздействия на полпериода (долю периода) вычисленных колебаний объекта управления обеспечивает в идеальном случае полное их подавление.

Одним из важных преимуществ shaping-алгоритмов является простота их реализации в микропроцессорных системах и системах управления на основе программируемых логических контроллеров (ПЛК). Благодаря этому shaping-алгоритмы нашли применение во многих промышленных системах [1]. В литературе описано большое количество систем, в которых использование shaping-алгоритмов позволило значительно улучшить производительность: подъемные краны [1, 2], координатно-измерительные машины [3–5], спутники [6], небольшие фрезерные станки [7], системы дисководов [8], загрузочно-разгрузочные роботы [9], устройства считывания данных [10] и манипуляторы с большим рабочим пространством [11–13].

Описание shaping-алгоритмов

Суть shaping-алгоритмов заключается в формировании управляющего сигнала путем свертки задающего воздействия с последовательностью импульсов (дельта-функций Дирака) [14]. Амплитуды и интервал времени между этими импульсами влияют на степень подавления колебаний, длительность переходных процессов и диапазон частот колебаний, в котором алгоритм (фильтр) эффективен. Shaping-алгоритмы различаются используемыми последовательностями импульсов (методикой расчета амплитуд и интервалов времени между ними).

Чтобы гарантировать, что преобразованное shaping-фильтром входное воздействие приведет к такому же установившемуся значению, что и оригинальный задающий сигнал, в большинстве shaping-алгоритмов амплитуды импульсов принимаются такими, чтобы суммарное воздействие на систему осталось неизменным:

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1, \quad (1)$$

где n – количество импульсов; A_i – амплитуда i -го импульса.

Основным параметром, определяющим качество работы shaping-алгоритма, является степень подавления колебаний. Оценку подавления целесообразно производить в виде отношения амплитуды остаточных колебаний в системе, в которой входной сигнал был сформирован shaping-фильтром, к амплитуде остаточных колебаний, которые возникли бы в той же системе без преобразования входного сигнала. Степень подавления колебаний определяется следующими выражениями [14]:

$$V(\omega, \zeta) = e^{-\zeta\omega t_n} \sqrt{C^2 + S^2}, \quad (2)$$

где

$$C(\omega, \zeta) = \sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega t_i} \cos(\omega\sqrt{1-\zeta^2} t_i),$$

$$S(\omega, \zeta) = \sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega t_i} \sin(\omega\sqrt{1-\zeta^2} t_i),$$

где ω – частота колебаний; ζ – коэффициент демпфирования; t_i – время i -го импульса.

Параметры shaping-фильтра A_i и t_i получают путем решения уравнений (1) и (2), задавая максимально допустимым уровнем колебаний V_{\max} . При этом ω и ζ обычно выбирают равными естественной частоте и коэффициенту демпфирования объекта управления. Однако, ввиду того что в большинстве случаев точные значения этих параметров неизвестны, чаще всего используют их приближительные оценки. А поэтому возникает задача формирования такого входного сигнала, при котором в системе будет обеспечена робастность по отношению к неопределенности частоты возникающих колебаний (собственной частоты) и коэффициента демпфирования объекта управления. Одним из путей решения этой задачи является введение дополнительного условия:

$$\frac{\partial}{\partial \omega} (e^{-\zeta\omega t_n} \sqrt{C^2 + S^2}) = 0. \quad (3)$$

Равенство нулю частной производной выражения (2) по частоте позволяет увеличить диапазон частот, в котором обеспечивается желаемая степень подавления колебаний, и тем самым добиться приемлемой работы shaping-фильтра даже при значительной ошибке в определении собственной частоты объекта управления [14].

Еще одним параметром, характеризующим качество работы shaping-алгоритма, является быстродействие, которое определяется временем последнего импульса t_n . Поэтому при расчете алгоритма обычно вводится условие минимизации t_n . При этом следует вводить ограничения на амплитуду импульсов, поскольку минимизация времени может приводить к необходимости формирования импульсов с бесконечной амплитудой.

Все shaping-алгоритмы можно разделить на два класса: алгоритмы, в которых вводится запрет на изменение знака импульсов при обработке одной входной команды, и алгоритмы, в которых импульсы могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Shaping-фильтры, в которых используются импульсы только одного знака, принято называть позитивными (positive input shapers). Shaping-фильтры, в которых допускается использование импульсов различного знака, называют негативными (negative input shapers) [8]. Ограничение на амплитуду импульсов в случае позитивных алгоритмов обычно определяется выражением $0 \leq A_i \leq 1$. В случае негативных алгоритмов: $-1 \leq A_i \leq 1$.

Первыми стали применяться shaping-фильтры с так называемой нулевой вибрацией (zero-vibration, ZV). Двухимпульсный ZV-shaper [15] можно получить, решая уравнения (1) и (2), приняв нулевым уровень остаточных колебаний $V = 0$. Однако ZV-фильтр работает хорошо только при совпадении фактической частоты и частоты, на которую он настроен. Когда эти частоты не совпадают, в системе возникают остаточные колебания, амплитуда которых может достигать неприемлемого уровня в случае большой ошибки по частоте. Для получения алгоритма, менее чувствительного к отклонению частоты, в дополнение к выражениям для ZV-фильтра вводится условие (3). В этом случае получается трехимпульсный алгоритм, который называют алгоритмом с нулевой вибрацией и производной (zero-vibration and derivative, ZVD). Большей робастности можно достичь, если ввести условие равенства нулю второй производной выражения (2), в этом случае алгоритм называют ZVDD. Увеличивать нечувствительность алгоритма к фактической частоте объекта управления можно, приравнявая к нулю также и следующие производные (ZVDDD, ZVDDDD и т.д.). Равенство нулю каждой последующей производной увеличивает количество импульсов алгоритма на один, а время его работы на полпериода колебаний [14]. Алгоритмы ZV и ZVD являются позитивными. Более быстрый фильтр можно получить, если использовать негативный алгоритм. Принимая нулевым уровень остаточных колебаний $V = 0$ и решая уравнения (1) и (2) с новыми ограничениями $|A_i| \leq 1$, можно получить трехимпульсный алгоритм, названный алгоритмом с нулевой вибрацией и единичной амплитудой (unity-magnitude zero-vibration, UM-ZV) [8].

Выражения для ZV-, ZVD- и UM-ZV-алгоритмов представлены в табл. 1, где приняты следующие обозначения:

$$K = \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right), T = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\zeta^2}}$$

Таблица 1. Выражения для ZV-алгоритмов

Алгоритм	Выражение
ZV-shaper	$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1+K & 1+K \\ 0 & 0,5T \end{bmatrix}$
ZVD-shaper	$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2K & K^2 \\ (1+K)^2 & (1+K)^2 & (1+K)^2 \\ 0 & 0,5T & T \end{bmatrix}$
ZVD ⁽ⁿ⁾ -shaper	$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & K^n \\ (1+K)^n & \dots & (1+K)^n \\ 0 & \dots & n \frac{T}{2} \end{bmatrix}$
UM-ZV-shaper, приближительное решение	$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & T/6 & T/3 \end{bmatrix}$
UM-ZV-shaper, решение для $0 < \zeta \leq 0,3$	$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & t_2 & t_3 \end{bmatrix}, \text{ где } \begin{bmatrix} t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} T/6 \cdot (1+1,63\zeta+1,22\zeta^2) \\ T/3 \cdot (1+0,016\zeta+0,537\zeta^2+0,604\zeta^3) \end{bmatrix}$

Решение для UM-ZV-алгоритма является достаточно сложным. В таблице приводятся два решения: упрощенное (справедливо для систем без демпфирования $\zeta \approx 0$) и полученное аппроксимацией кривой с использованием численных методов (справедливо для систем с не-

большим коэффициентом демпфирования $0 < \zeta \leq 0,3$) [16]. Решения для систем с большим коэффициентом демпфирования приводятся в [17].

Большой робастности можно добиться, отказавшись от условия обеспечения нулевого уровня колебаний при совпадении расчетной и фактической частот. Если задаться допустимым уровнем колебаний V_{\max} объекта управления и обеспечить нулевой уровень не на расчетной частоте, а на двух частотах вблизи, находящихся на равном расстоянии с обеих сторон от нее, то можно получить фильтр с дополнительной нечувствительностью (extra-insensitive shaper, EI) [6]. Такой фильтр также называют одногорбым EI-фильтром (по виду характеристики подавления колебаний). Робастность EI-фильтра определяется значением V_{\max} . Чем больше это значение, тем менее чувствителен фильтр к изменению частоты колебаний объекта управления, но тем большая амплитуда колебаний возникает при совпадении расчетной и фактической частот (рис. 1,а). В связи с этим EI-фильтр иногда называют фильтром с заданной нечувствительностью (specified insensitivity, SI). Если V_{\max} принять равным нулю, то EI-shaper вырождается в ZVD-shaper. Если принять три различные частоты, на которых амплитуда колебаний будет нулевой: на расчетной частоте и на частотах с обеих сторон от нее, – то получится двугорбый (с двумя локальными максимумами, рис. 1,а) EI-shaper (при $V_{\max} = 0$ эквивалентен ZVDD-алгоритму). Выбрав четыре частоты, получится трехгорбый EI-shaper (при $V_{\max} = 0$ эквивалентен ZVDDD-алгоритму) и т.д. Частоты с нулевой амплитудой колебаний по EI-алгоритму выбираются таким образом, чтобы все локальные максимумы характеристики равнялись V_{\max} (рис. 1,б).

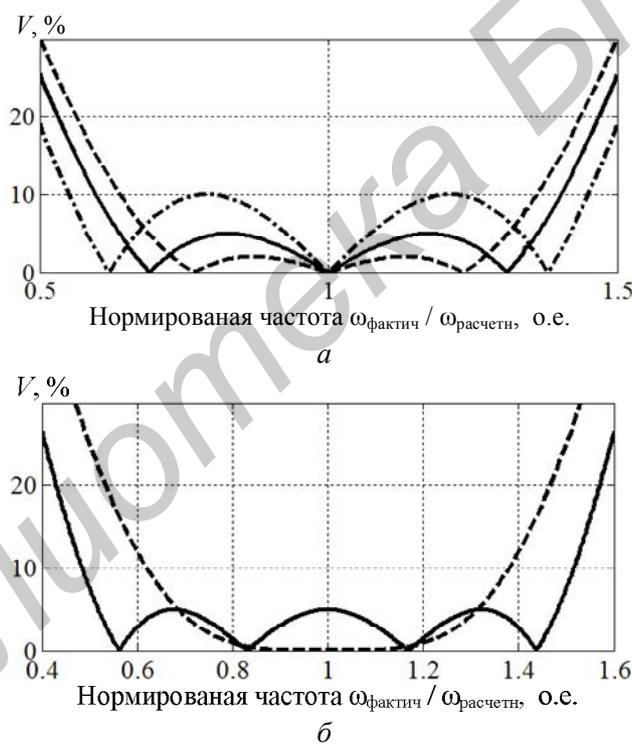


Рис. 1. Подавление колебаний shaping-фильтрами:
 а – EI-shaper с двумя локальными максимумами (— $V_{\max} = 5\%$; - - - $V_{\max} = 2\%$; - · - $V_{\max} = 10\%$);
 б – EI-shaper с тремя локальными максимумами (—) и ZVDDD-shaper (- - -)

Недостатком негативных алгоритмов является то, что в большинстве случаев имеются ограничения на скорость изменения силового воздействия. В реальных системах невозможно достаточно быстро менять амплитуду импульсов, поэтому необходимо вводить соответствующие ограничения. В дополнение к ограничениям на амплитуду отдельных импульсов целесообразно ввести ограничение на сумму модулей амплитуд двух соседних импульсов: $|A_i| + |A_{i-1}| \leq \eta$. Алгоритм, в котором введены такие ограничения и в котором $V = 0$ при совпадении расчетной и фактической частот, называют алгоритмом с заданной колебательностью (specified-swing) [18] или алгоритмом с заданной отрицательной амплитудой (specified-negative-amplitude, SNA). При $\eta = 0,5$ SNA-ZV-shaper вырождается в ZV-shaper. Если $\eta = 2$, SNA-ZV-shaper вырождается в UM-ZV-shaper. Значения η в диапазоне $0,5 < \eta < 2$ позволяют разработчику найти

компромисс между требованиями увеличения быстродействия алгоритма и уменьшения мощности управляющего устройства.

Выражения для EI- и SNA-ZV-алгоритмов, справедливые для недемпфированных систем, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Выражения для EI- и SNA-ZV-алгоритмов

Алгоритм	Выражение
EI-shaper	$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+V_{\max}}{4} & \frac{1-V_{\max}}{2} & \frac{1+V_{\max}}{4} \\ 0 & 0,5T & T \end{bmatrix}$
2-EI-shaper	$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0,5-A_1 & 0,5-A_1 & A_1 \\ 0 & 0,5T & T & 1,5T \end{bmatrix}, \text{ где } \begin{cases} A_1 = \frac{3X^2 + 2X + 3V^2}{16X} \\ X = V^{2/3} \cdot (\sqrt{1-V^2} + 1)^{1/3} \end{cases}$
3-EI-shaper	$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & 1-2(A_1+A_2) & A_2 & A_1 \\ 0 & 0,5T & T & 1,5T & 2T \end{bmatrix}, \text{ где } \begin{cases} A_1 = \frac{1+3V+2\sqrt{2(V^2+V)}}{16} \\ A_2 = \frac{1-V}{4} \end{cases}$
SNA-ZV-shaper	$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+\eta}{3} & \frac{2\eta-1}{3} & \frac{1+\eta}{3} \\ 0 & \frac{1}{\omega} \cos^{-1}\left(\frac{2\eta-1}{2\eta+2}\right) & \frac{1}{\omega} \cos^{-1}\left(\frac{2\eta^2-8\eta-1}{2(\eta+1)^2}\right) \end{bmatrix}, \eta \geq 0,5$

Анализ эффективности shaping-алгоритмов

Анализ эффективности shaping-алгоритмов целесообразно провести на примере реальной промышленной системы. Система управления грузом в подъемных кранах [19] является наиболее частым объектом, используемым на практике для применения shaping-алгоритмов. Основными параметрами, характеризующими качество алгоритмов управления, являются степень подавления колебаний груза, время, в течение которого амплитуда колебаний груза уменьшится до заданного значения, и робастность.

Анализ осуществлялся с использованием нелинейной математической модели портального крана, тележка которого способна перемещаться прямолинейно (с одной степенью свободы) [20], с учетом ограничений скорости и ускорения тележки. Робастность исследовалась по отношению к изменению длины подвеса (собственной частоты колебаний объекта управления) и коэффициента демпфирования. Методика исследований аналогична описанной в [21]. Длина подвеса L состоит из двух частей: расстояния от тележки до точки подвеса груза (обычно измеряется соответствующим датчиком) и расстояния от точки подвеса груза до его центра масс (обычно неизвестно). Коэффициент демпфирования также сильно зависит от характеристик перемещаемого груза. Результаты исследований представлены на рис. 2. На приведенных графиках отображены результаты серии экспериментов, в которых исследовалось влияние вариаций длины подвеса и коэффициента демпфирования на степень подавления колебаний груза V , % и длительность переходного процесса t , о.е. (1 о.е. соответствует собственному периоду колебаний груза). На рисунках изображено семейство линий, каждая из которых соответствует некоторому коэффициенту демпфирования из диапазона 10...500 % от его реальной величины.

По полученным результатам можно сделать вывод, что shaping-алгоритмы могут применяться в системе позиционирования груза в подъемных кранах. Несмотря на нелинейные свойства объекта управления [20], shaping-алгоритмы показывают хорошие результаты в условиях информационной (параметрической) неопределенности. Существенное влияние на качественные показатели в рассматриваемой системе оказывает отклонение фактической длины подвеса от ее расчетной величины, изменение коэффициента демпфирования также влияет на степень подавления колебаний и длительность переходного процесса, однако изменение демпфирования в широких пределах не столь чувствительно для системы. Изменение длительности переходного процесса имеет схожий характер для всех shaping-алгоритмов (рис. 2, жс). Резкое

увеличение длительности переходного процесса с некоторого критического значения $L_{кр}$ (различного для всех shaping-алгоритмов) объясняется выходом контролируемой величины за заданный коридор в условиях слабозатухающего колебательного переходного процесса.

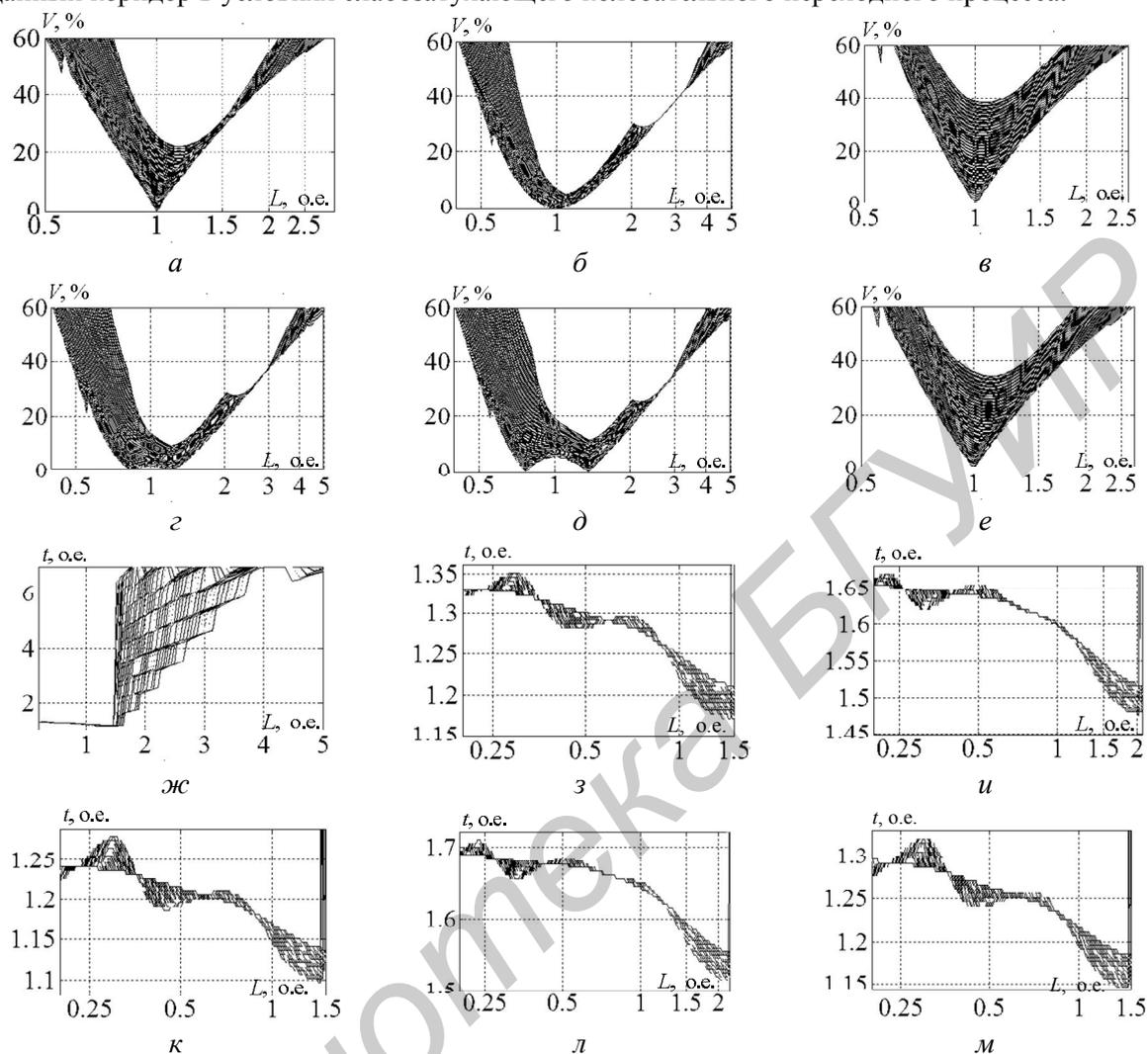


Рис. 2. Характеристики shaping-алгоритмов:

a – ZV-shaper; *б* – ZVD-shaper; *в* – UM-ZV-shaper; *г* – EI-shaper с $V_{max} = 2\%$; *д* – EI-shaper с $V_{max} = 5\%$; *е* – SNA-ZV-shaper, $\eta = 1$; *ж* – ZV-shaper, $L = 0,2 \dots 5,0$ о.е.; *з* – ZV-shaper, $L = 0,2 \dots 1,5$ о.е.; *и* – ZVD-shaper; *к* – UM-ZV-shaper; *л* – EI-shaper с $V_{max} = 5\%$; *м* – SNA-ZV-shaper, $\eta = 1$

Сравнивая позитивные и негативные алгоритмы, можно сделать вывод, что применение импульсов различного знака позволяет увеличить быстродействие (ср. рис. 2,з и к), однако при этом ухудшается робастность алгоритма (ср. рис. 2,а и в, рис. 2,з и к). Настройка коэффициента η в SNA-ZV-фильтре позволяет найти компромисс между быстродействием (ср. рис. 2,м с рис. 2,з и к) и робастностью (ср. рис. 2,е с рис. 2,а и в).

Сравнивая алгоритмы, в которых упор делается на обеспечении робастности, можно сделать вывод, что в условиях небольшого отклонения фактического демпфирования от его расчетной величины лучшие результаты по подавлению колебаний показывает EI-shaper, однако этот алгоритм более чувствителен к вариациям параметров и несколько более медлителен по сравнению с ZVD-фильтром, хотя и не на много (в среднем на 3...5%).

Заключение

Основным преимуществом shaping-алгоритмов является то, что они обладают простой реализацией в микропроцессорных системах и системах управления на основе ПЛК. Выбор конкретного shaping-алгоритма должен производиться с учетом желаемых степени подавления

колебаний, робастности по отношению к неопределенности собственной частоты и коэффициента демпфирования объекта управления, быстродействия, определяемого временем последнего периода t_n , и с учетом ограничения мощности управляющего устройства и возможного запрета движения в обратную сторону. При этом все разновидности shaping-алгоритмов имеют противоречивые свойства: быстродействие / степень подавления / робастность, – выбор оптимального соотношения из которых и является основной задачей разработчика системы управления.

SHAPING ALGORITHMS ENABLING TO REDUCE VIBRATION OF CONTROL OBJECTS

A.P. KUZNETSOV, A.V. MARKOV, A.S. SHMARLOUSKI, T.V. GAVRILIK

Abstract

The basic modifications of an input shaping for reducing the residual vibrations are considered. Expressions for calculation ZV, ZVD, UM-ZV, EI, and SNA-ZV shapers are presented. Performance analysis data of the shaping process on industrial cranes for payload control is presented. Some practical recommendations are given.

Литература

1. *Sorensen K.L.* Operational performance enhancement of human operated flexible systems. Georgia Institute of Technology. 2008.
2. *Sorensen K.L., Singhose W.E., Dickerson S.* // Control Engineering Practice. 2007. Vol. 15, №7. P. 825–837.
3. *Seth N., Rattan K., Brandstetter R.* // IEEE Conf. on Control Applications. 1993. P. 368–373.
4. *Singhose W., Singer N., Seering W.* // Precision Engineering. 1996. Vol. 18, № April. P. 138–146.
5. *Jones S., Ulsoy A.G.* // J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 1999. Vol. 121, № June. P. 242–247.
6. *Singhose W.E., Porter L.J., Tuttle T.D. et al.* // J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 1997. Vol. 119, № June. P. 320–326.
7. *Fortgang J., Singhose W., Marquez J.d.J. et al.* // American Control Conf. 2005. P. 4531–4536.
8. *Singhose W.E., Seering W.P., Singer N.C.* // J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 1997. Vol. 119, № June. P. 198–205.
9. *Rappole B.W., Singer N.C., Seering W.P.* // 23rd Biennial Mechanisms Conf. 1994. Vol. DE-71. P. 11–16.
10. *Cutforth C.F., Pao L.Y.* // IEEE Trans. on Control Systems Technology. 2003. Vol. 11, №1.
11. *Love L.J., Magee D.P., Book W.J.* // IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics. 1994. Vol. 2. P. 1257–1262.
12. *Magee D.P., Book W.J.* // American Control Conf. 1995. P. 924–928.
13. *Grosser K., Singhose W.* // JSME Int. J. 2000. Vol. 43, №3. P. 755–761.
14. *Singer N.C., Seering W.P.* // J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 1990. Vol. 112, № March. P. 76–82.
15. *Smith O.J.M.* // Proceedings of the IRE. 1957. Vol. 45, № September. P. 1249–1255.
16. *Pao L.Y., Singhose W.E.* // Proceedings of the 1996 IFAC World Congress. 1996. P. 385 – 390.
17. *Gurleyuk S.S.* // Archive of Applied Mechanics. 2007. Vol. 77, №1. P. 63–71.
18. *Singhose W., Mills B., Seering W.* // Proceedings of the 1999 IEEE. 1999. P. 533–538.
19. *Кузнецов А.П., Марков А.В., Хаджинов М.К. и др.* // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2011. С. 493–504.
20. *Кузнецов А.П., Марков А.В., Шмарловский А.С.* // Докл. БГУИР. 2009. №8. С. 93–100.
21. *Кузнецов А.П., Марков А.В., Шмарловский А.С.* // Докл. БГУИР. 2008. №4. С. 84–91.