

Б. Т. Будаи, К. А. Снегин

ПОИСК ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ В КОНТУРАХ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Для повышения точности измерения координат наблюдаемого объекта обычно используют замкнутые контуры управления ОЭС (КУ ОЭС). Однако в таких КУ ОЭС могут возникать автоколебания (АК) с большой амплитудой, сопоставимой с амплитудой допустимой ошибки КУ ОЭС, и с частотой, близкой к частоте среза КУ ОЭС. Показано, что к таким АК могут приводить дефекты большинства блоков КУ ОЭС. Выявлено, что в случае исправных блоков КУ ОЭС такие АК могут быть обусловлены квантованием по времени и уровню. Для устранения АК, обусловленных этими дефектами, разработаны рекомендации, применение которых позволяет исключить АК с большой амплитудой.

Ключевые слова: автоколебания, оптико-электронные системы, контур управления, точность измерения координат.

Nowadays it is more and more important the application of optoelectronic systems (OES). To increase the measurement accuracy of the coordinates observed object are commonly used control loops of ECO (CL OES). In such CL OES can arise self-oscillations (SO) with large amplitude, comparable to the amplitude of the permissible error of CL OES and with a frequency close to the cut-off frequency of CL OES. There were found algorithms, ensuring the elimination of AK with large amplitude.

Keywords: self-oscillations, optoelectronic systems, control loop, measurement accuracy of coordinates.

При обнаружении техногенных аварий, затерявшихся судов в море и пр. все более актуально применение ОЭС [1–3]. В ОЭС информация об объекте $\alpha_{ог}(t)$ поступает в приемник (Пр), откуда сигнал с периодом T_0 подается в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а затем поступает в измеритель координат (ИК) (рис. 1а). После измерения сигнал поступает на корректирующий фильтр (КФ), затем на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Привод платформы (ПП) поворачивается на угол $\hat{\alpha}_{ог}(t)$, соответствующий измеренным координатам объекта. Известно, что в Пр проявляется абберрация: начиная от «размытия» изображения до отклонения проекции изображения объекта в плоскости фотомишени Пр [2, с. 94]. Также имеются нелинейные искажения в ПП. Для уменьшения этих искажений вводят отрицательную обратную связь по рассогласованию (рис. 1б) $\Delta\alpha_{ог}(t) = \alpha_{ог}(t) - \hat{\alpha}_{ог}(t)$ [3, с. 11–14]. Координаты в ИК измеряют с шагом $\Delta_{кс}$ в каждом n -м кадре

$\Delta\hat{\alpha}_{об}(n \cdot T_{\delta}) = \hat{i}(n \cdot T_{\delta}) \cdot \Delta_{кв}$ по критерию максимума корреляции между эталонным $U_{эм}(k)$ и текущим $U_m(i(n \cdot T_{\delta}))$ изображениями [2, с. 316; 3, с. 74]

$$\hat{i}(n \cdot T_{\delta}) = \max_i (R(i(n \cdot T_{\delta}))), \quad (1)$$

где $R(i(n \cdot T_{\delta})) = \sum_k U_{эм}(k) \cdot U_m(i(n \cdot T_{\delta}) + k)$. Значение шага измерения $\Delta_{кв}$ соответствует размеру поля зрения $\alpha_{ПЗ}$ и количеству разрешаемых строк $Pr N_{Пр}$: $\Delta_{кв} = \alpha_{ПЗ} / N_{Пр}$. С учетом [1, 4] $\alpha_{ПЗ} \approx (2, 2...3)$ град, $N_{Пр} = 576$. При этом $\Delta_{кв} \approx (1/4...1/3)$ угл. мин. Традиционно к ошибке управления предъявляют требования $|\Delta\alpha_{об}(t)| \leq \Delta_{дон}$ [3, с. 152]. Обычно величина допустимой ошибки $\Delta_{дон} \approx 1$ угл. мин. [1], что соответствует

$$\Delta_{дон} \approx (3...4) \cdot \Delta_{кв}. \quad (2)$$

Как показывает экспериментальное исследование и математическое моделирование, когда нет ни динамической $\Delta\alpha_{\delta}(t)$, ни флюктуационной $\Delta\alpha_{фл}(t)$ ошибок, в КУ ОЭС могут возникать автоколебания (АК) с параметрами:

$$\begin{cases} A_{АК} \approx (2...3) \cdot \Delta_{кв}, \\ f_{АК} \approx f_{ср}, \end{cases} \quad (3)$$

где $A_{АК}$, $\Delta_{кв}$, $f_{АК}$, $f_{ср}$ — амплитуда АК, шаг пространственного квантования в АЦП, частота АК и частота среза КУ ОЭС соответственно.

Амплитуда (3) таких АК сопоставима с величиной допустимой ошибки КУ ОЭС (2), что обуславливает необходимость учета и этой составляющей ошибки

$$\Delta\alpha_{об}(t) = \Delta\alpha_{\delta}(t) + \Delta\alpha_{фл}(t) + \Delta_{АК}(t). \quad (4)$$

Это обуславливает интерес к поиску причин таких АК.

Традиционный путь поиска причин возникновения АК в КУ ОЭС

Обычно квантование сигнала по амплитуде учитывают как дополнительную среднеквадратическую ошибку $\sigma_{кв}$, которая с учетом равномерного распределения ошибки равна $\sigma_{кв} = \Delta_{кв} / \sqrt{12}$. Но это значение намного меньше значений (3). При анализе АК в замкнутых КУ ОЭС обычно анализируют коэффициент передачи разомкнутой цепи КУ [5–7], который в режиме АК должен быть равным

$$K_p(p, A) = -1, \quad (5)$$

где $p = j \cdot \omega$, ω — круговая частота, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, A — амплитуда АК [6, с. 944], при этом (рис. 16) $K_p(p, A) \approx K_{Пр}(p) \cdot K_n(A) \cdot K_{ИК}(p) \cdot K_{КФ}(p) \cdot K_{ЦАП}(p) \cdot K_{ПП}(p)$. Коэффициент передачи приемника при этом [4]

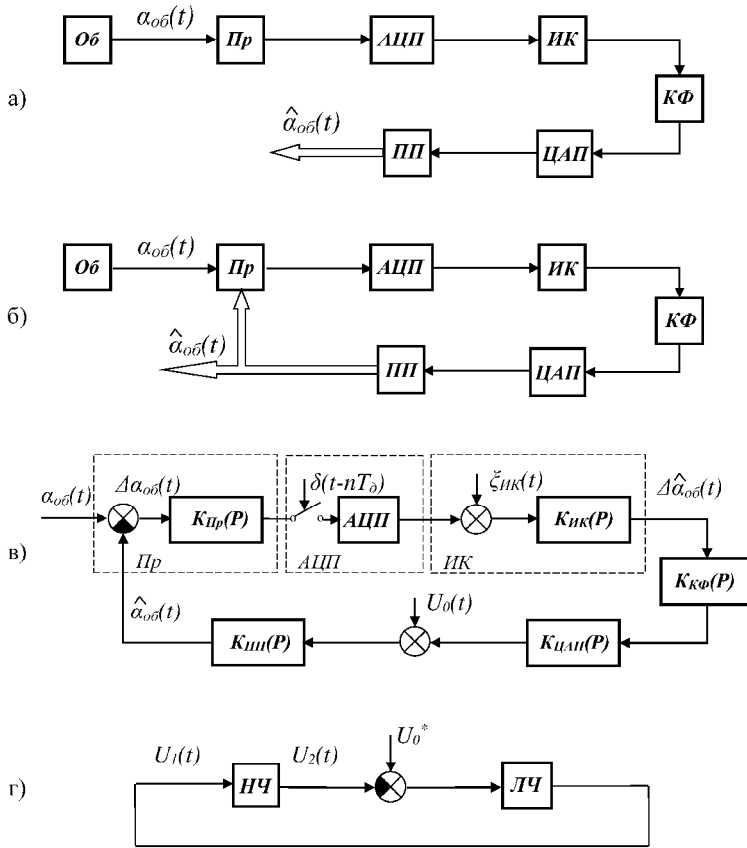


Рис. 1. Преобразования КУ ОЭС для анализа причин возникновения АК

$$K_{Пр}(j \cdot \omega) \approx \frac{1 - \exp(-j \cdot \omega \cdot T_\delta)}{j \cdot \omega \cdot T_\delta} \cdot \exp(-j \cdot \omega \cdot \Delta T(S)), \quad (6)$$

где T_δ — период дискретизации сигнала, $\Delta T(S)$ — эквивалентная межпериодная задержка сигнала в приемнике как функция освещенности S : $\Delta T(S) \approx \begin{cases} 0, & S \geq S_{нор}, \\ > 0, & S < S_{нор}, \end{cases}$ $S_{нор}$ — пороговое значение освещенности. Традиционно АЦП — практически безынерционный нелинейный элемент квантования. Нелинейное преобразование в АЦП описывается статистически усредненным линейризованным коэффициентом передачи [6, с. 946]

$$K_n(A) = \frac{\frac{1}{T_{AK}} \cdot \int_{\frac{T_{AK}}{2}}^{\frac{T_{AK}}{2}} U_2(U_1(t)) \cdot dt}{A}, \quad (7)$$

где T_{AK}, A — период и амплитуда первой гармоники сигнала АК,

$$U_1(t) \approx A \cdot \cos(\omega_{AK} \cdot (t - t_0)) + U_0, \quad (8)$$

$U_2(U_1(t))$ — вид нелинейного преобразования, U_0 — квазипостоянная составляющая ошибки управления.

Измеритель координат (ИК) объекта обычно эквивалентен задержке [3, с. 151]

$$K_{ИК}(j \cdot \omega) \approx \exp(-j \cdot \omega \cdot T_{ИК}), \quad (9)$$

при этом обычно $T_{ИК} \approx T_k$. Коэффициент передачи КФ обычно изменяет фазовую характеристику разомкнутого контура и с учетом [3, с. 155] имеет вид

$$K_{КФ}(j \cdot \omega) \approx K_0 \cdot \frac{1 + j \cdot \omega \cdot T_1}{C_0 + j \cdot \omega \cdot T_2}, \quad (10)$$

где $C_0 = 0 \dots 1$. Коэффициент передачи ЦАП обычно эквивалентен коэффициенту передачи экстраполятора нулевого порядка [3, с. 151]:

$$K_{ЦАП}(j \cdot \omega) \approx \frac{1 - \exp(-j \cdot \omega \cdot T_0)}{j \cdot \omega \cdot T_0}, \quad (11)$$

коэффициент передачи ПП обычно описывается линейным коэффициентом передачи [5, с. 68] $K_{ПП}(j \cdot \omega) = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot T_0} \cdot \frac{1}{1 + 2 \cdot \xi \cdot j \cdot \omega \cdot T_{ПП} - T_{ПП}^2 \cdot \omega^2}$. Обычно $T_{ПП} \approx 10^{-0.5} \cdot T_0$, $2 \cdot \xi \approx 1$. Поэтому на частотах среза $f_{cp} < f_0 / 2$ выражение (11) можно представить:

$$K_{ПП}(j \cdot \omega_{cp}) \approx \frac{\exp(-j \cdot \omega_{cp} \cdot T_{ПП})}{j \cdot \omega_{cp} \cdot T_0}, \quad (12)$$

где $\omega_{cp} = 2 \cdot \pi \cdot f_{cp}$.

Для удобства анализа систем с квантованием по времени и нелинейным амплитудным преобразованием КУ сводят к эквивалентной системе, непрерывной по времени: безынерционной нелинейной части (НЧ) и инерционной линейной части (ЛЧ) (рис. 1г) [6, с. 759; 7]. При этом коэффициент передачи (5) разомкнутого КУ для анализа удобно представить в виде:

$$K_p(j \cdot \omega, A) = K_n(A) \cdot K_n(j \cdot \omega). \quad (13)$$

Вид коэффициента передачи $K_n(A)$ АЦП (7) для релейной нелинейной характеристики (РНХ) в нуле (рис. 2б) и нелинейной характеристики в виде зоны нечувствительности (НХЗН) в нуле (рис. 2в) представлен на рис. 2г и рис. 2д.

Условие существования АК (5) удобно представить как условие баланса фаз и амплитуд. Условие баланс фаз выполняется на частоте f_1 :

$$\arg(K_n(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1)) = \pi. \quad (14)$$

При этом в рассматриваемом КУ ОЭС [3, с. 160] $\begin{cases} f_1 \approx f_\delta/2, \\ K_n(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1) \sim -10^{-0.5}. \end{cases}$

Для того, чтобы выполнялся и баланс амплитуд, необходимо выполнение условия

$$|K_n(A) \cdot K_n(j \cdot \omega)| = 1. \quad (15)$$

С учетом выражений (14), (15) баланс фаз выполняется при $K_n(A) \sim 10^{0.5}$, что достигается при

$$A \sim 10^{-1} \cdot \Delta_{кв}. \quad (16)$$

Таким образом КУ с квантованием по уровню обычно характеризуется дополнительной малой ошибкой либо в виде некоррелированной помехи квантования с $\sigma_{кв} = \Delta_{кв} / \sqrt{12}$, либо в виде АК с амплитудой АК (16). Но в обоих случаях процессы отличаются от процесса с параметрами (3). Это вызывает необходимость поиска причин возникновения таких АК.

Поиск причин возникновения АК с параметрами, соответствующими наличию дефектов в КУ ОЭС

При амплитудах АК (3) с учетом (5) и (14) выполняется баланс амплитуд:

$$\begin{cases} K_n(A) \approx 1, \\ |K_n(j2 \cdot \pi \cdot f_{cp})| = 1. \end{cases} \quad (17)$$

На этих частотах не должен выполняться баланс фаз, т. к. [3, с. 157–160]

$$\phi_3 \approx \pi/6 \dots \pi/4, \quad (18)$$

где $\phi_3 = \arg(K_p(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{cp})) + \pi$.

Вышеизложенные причины говорят о наличии ранее неучитываемых сдвигов фаз в КУ ОЭС, обусловленных квантованием сигнала по времени и по уровню.

При $U_0^* = 0$ на рис. 2д штрихпунктирной линией показана первая гармоника сигнала АК на входе НЧ $U_1(t)$ (8). Сплошной линией показан результат релейного преобразования $U_2(t)$ сигнала АК $U_1(t)$ (8) на выходе НЧ в виде релейного элемента

$$U_2(n \cdot T_\delta) = \frac{\Delta_{кв}}{2} \cdot \text{sign}(U_1(n \cdot T_\delta)). \quad (19)$$

Хотя процесс $U_2(n \cdot T_\delta)$ (19) рассматривается в дискретные моменты времени $t = n \cdot T_\delta$, он считается непрерывным [6]. Первая гармоника сигнала АК,

соответствующая нелинейно преобразованному сигналу $U_2(n \cdot T_\delta)$ (19), показана на рис. 1д штрихом:

$$U_2^*(n \cdot T_\delta) = A_2^* \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot w_{AK} \cdot (n \cdot T_\delta - t_0) + \phi_{c\delta}), \quad (20)$$

где

$$\phi_{c\delta} = 2 \cdot \pi \cdot f_{AK} \cdot \tau_{c\delta}. \quad (21)$$

С учетом [6, с. 942–944], [7]

$$-T_\delta / 2 < \tau_{c\delta} < T_\delta / 2. \quad (22)$$

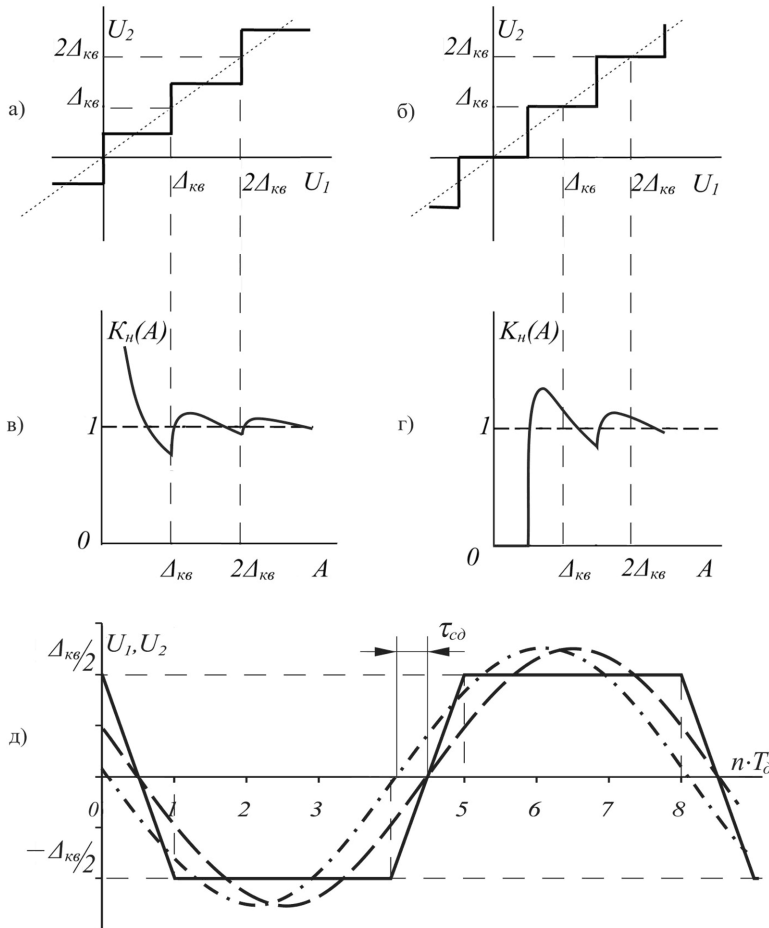


Рис. 2. Определение эквивалентных линейных параметров квантователя по времени и квантователя по уровню

Из выражений (3), (21), (22) следует, во-первых, что в типовом КУ ОЭС с запасами по фазе (18) на частоте среза типового КУ ОЭС $f_{cp} \approx f_\delta / 4$ [3, с. 160] возможны АК с большой амплитудой (3); во-вторых, для того, чтобы квантование по времени

существенно не сказывалось на возникновение АК с большой амплитудой (3), необходимо, чтобы частота среза КУ была много меньше частоты дискретизации

$$f_{cp} \ll f_{\partial}. \quad (23)$$

На частотах $i \cdot f_{cp}$, соответствующих условию (23), возможен ощутимый уровень высших гармоник сигнала АК. Для примера рассмотрим первоначально НЧ с РНХ в нуле (рис. 3а, штриховая линия).

При этом изначально на входе НЧ сигнал АК представлен первой гармоникой и постоянной составляющей: $U_1(t) = A \cdot \cos(\omega_{AK} \cdot (t - t_0)) + U_0$ (8). Для простоты анализа сигнал на выходе НЧ $U_2(U_1(t))$ (рис. 3, толстая линия, τ_1 — длительность импульса сигнала АК) представлен тремя составляющими: первой гармоникой, второй гармоникой и постоянной составляющей

$$U_2(t) \approx A_n(1) \cdot \cos(\omega_{AK} \cdot (t - t_0)) + A_n(2) \cdot \cos(2 \cdot \omega_{AK} \cdot (t - t_0)) + U_0. \quad (24)$$

В следующем периоде АК учитываются и высшие гармоники

$$U_1(t) \approx \sum_{r=1}^{\infty} B_n(r) \cdot \cos(r \cdot \omega_{AK} \cdot (t - t_0) + \Delta\phi(r \cdot \omega_{AK})) + U_0, \quad (25)$$

где

$$B_n(r) = K_p(r \cdot \omega_{AK}) \cdot A_n(r), \quad (26)$$

при этом модуль коэффициента передачи $K_p(r \cdot \omega_{AK}) = |K_p(j \cdot r \cdot \omega_{AK})|$, $r = 1, 2, 3, \dots$, $\Delta\phi(r \cdot \omega_{AK}) = \phi(r \cdot \omega_{AK}) - r \cdot \phi(\omega_{AK})$, $\phi(\omega) = \arg(K_p(j \cdot \omega))$.

Из рис. 3б видно, что если имеется сдвиг фазы второй гармоники $\Delta\phi(2 \cdot \omega_{AK}) \neq 0$, то при нелинейном преобразовании возникает сдвиг фазы первой гармоники второй гармоникой на величину $\tau_n = (\tau_{n1} + \tau_{n2})/2$.

Для аналитической оценки величины τ_n целесообразно понизить степень уравнения (25) [8]. С учетом выражений (5)–(12) амплитуды гармоники убывают

$$K_p(r \cdot \omega_{AK}) \leq 1/r. \quad (27)$$

На рис. 3в представлена амплитуда спектра $\bar{A}_n(r) = A_n(r)/A_n(1)$ (26) как функция длительности импульса $2 \cdot \tau_1/T_{AK}$, где

$$A_n(r) = \frac{\Delta_{кв}}{2} \cdot \frac{2 \cdot \tau_1}{T_{AK}} \cdot \frac{\sin(\pi/2 \cdot r \cdot (2 \cdot \tau_1/T_{AK}))}{\pi/2 \cdot r \cdot (2 \cdot \tau_1/T_{AK})}. \quad (28)$$

Из выражений (27), (28) следует, что гармоники нормированного сигнала АК (26) $\bar{B}_n(r) = B_n(r)/B_n(1)$ обратно пропорциональны квадрату номера гармоники $\bar{B}_n(r) \sim 1/r^2$. При этом наиболее существенны 2-я и 3-я гармоники.

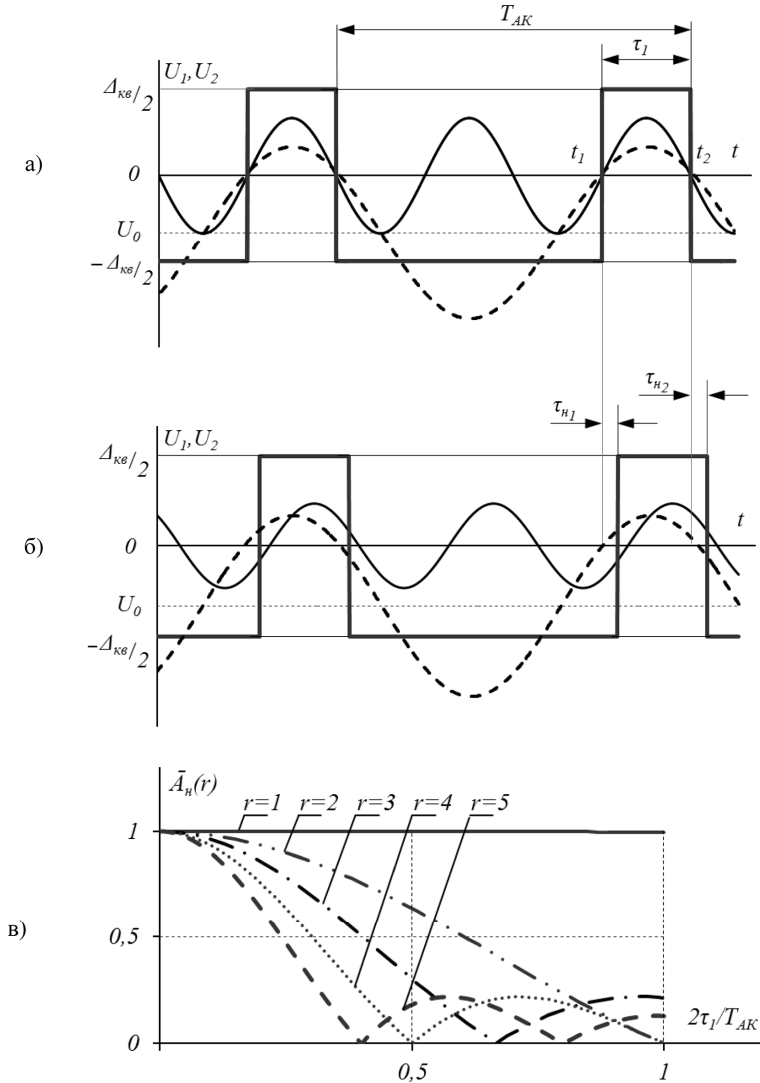


Рис. 3. Учет сдвига фаз первой гармоники высшими гармониками АК

При этом если вид нелинейного преобразования НЧ — РНХ, то наиболее существенна вторая гармоника, если — НХЗН, то наиболее существенна третья гармоника (т. к. вторая отсутствует). Сдвиг фазы первой гармоники высшими гармониками $\phi_n(w) \approx w \cdot (\tau_{н1} + \tau_{н2})/2$ можно представить [8]

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_n(w) \approx \frac{1}{2} \cdot \arctg \left(\frac{4 \cdot \bar{B}_n(2 \cdot w) \cdot \sin(\Delta\phi(2 \cdot w))}{1 + 4 \cdot \bar{B}_n(2 \cdot w) \cdot \cos(\Delta\phi(2 \cdot w))} \right), \text{ РНХ,} \\ \phi_n(w) \approx \frac{1}{3} \cdot \arctg \left(\frac{9 \cdot \bar{B}_n(3 \cdot w) \cdot \sin(\Delta\phi(3 \cdot w))}{1 + 9 \cdot \bar{B}_n(3 \cdot w) \cdot \cos(\Delta\phi(3 \cdot w))} \right), \text{ НХЗН.} \end{array} \right. \quad (30)$$

Можно показать, что в типовых КУ ОЭС с частотой среза $f_{cp} \approx f_{\delta} / 4$ из-за квантования по времени и уровню могут возникать значительные фазовые сдвиги первой гармоники (21), (30), что может приводить к АК с параметрами (3), соответствующими дефектам блоков КУ ОЭС.

Для того чтобы исключить влияние квантования по времени на амплитуду АК, необходимо, чтобы частота среза КУ ОЭС была много меньше частоты повторения кадров (23). Для этого за рубежом на порядок увеличивают частоту повторения телевизионных кадров до $f_{\delta} = 500$ Гц. При этом, во-первых, это уменьшает время накопления изображения в плоскости фотомишени приемника на порядок, что приводит к снижению отношения сигнал/шум на полпорядка; во-вторых, это усложняет обработку видеосигнала, т. к. полоса видеосигнала увеличивается с 8 до 80 мГц [9]. Предлагается другой путь решения этой проблемы: учет не только второй [3], но третьей производной входного возмущения. Это позволит создавать системы с астатизмом третьего порядка с частотой среза $f_{cp} \sim 1$ Гц, что на порядок меньше, чем в типовом КУ ОЭС [3, с.160]. Это приведет не только к уменьшению амплитуды АК, но и уменьшению динамической и флюктуационной ошибки (4).

Чтобы уменьшить влияние квантования по уровню на амплитуду АК (31), можно применять интерполяционные методы поиска максимума корреляционной функции (1).

Другим путем повышения эффективности измерения координат является измерение не максимума корреляционной функции (1), а координаты центра сегментированного изображения и пр. [1, 9, 10]. Для наиболее эффективного решения, например, в [1] размер объекта выбирают не меньше 20 пикселей.

Заключение

Для повышения точности измерения координат наблюдаемого объекта обычно используют замкнутые контуры управления ОЭС (КУ ОЭС). Однако в таких КУ ОЭС могут возникать АК с большой амплитудой, сопоставимой с амплитудой допустимой ошибки КУ ОЭС, и с частотой, близкой к частоте среза КУ ОЭС. Выявлено, что такие АК могут возникать из-за дефектов большинства блоков КУ ОЭС. Но даже в случае отсутствия дефектов большинства блоков КУ ОЭС, в КУ ОЭС существуют АК с параметрами, соответствующими дефектам в блоках КУ ОЭС. Показано, что хотя с точки зрения традиционного подхода квантование по времени и уровню не должны вносить значительных ошибок, в КУ возникают АК с большой амплитудой. Разработаны рекомендации, применение которых позволяет исключить АК с большой амплитудой при одновременном уменьшении других составляющих ошибки КУ ОЭС.

Литература

1. Оптико-электронные приборы разработки НПО КАРАТ // URL: www.npo-karat.ru/catalog/ — от 31.03.2015.
2. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 1999. 480 с.

3. Алпатов Б. А. Системы автоматического обнаружения и сопровождения. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
4. Будаи Б. Т. Определение коэффициентов теле-, тепловизионного приемников как элементов систем слежения // Вестник радиоэлектроники. 1993. № 2. С. 28–32.
5. Смирнова В. И., Разинцев В. И. Проектирование и расчет автоматизированных приводов. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
6. Бесежерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1966. 998 с.
7. Денисов Р. Н. Анализ периодических режимов в импульсных системах с квантованием сигнала по уровню методами Z-преобразования // Автоматика и телемеханика. 1970. С. 88–96.
8. Будаи Б. Т. Новый метод учета высших гармоник для анализа автоколебаний в автоматических системах управления // Деп. в ВИМИ. 1993. № Д08563.
9. Ворновицкий И. Э., Лабунец В. Г., Мальцев А. П. Телевизионная система слежения за целями с плазменным факелом // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 10. С. 69–80.
10. Бакут П. А., Колмогоров Г. С. Сегментация изображений: методы выделения границ изображений // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 10. С. 25–48.