

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ПРИБЛИЖЕННОГО АНАЛИЗА

С.С. Абрамов

*Кафедра радиопередающих устройств и электропитания,
ГОУ ВПО «Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики», г. Новосибирск;
abramov@sibsutis.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: амплитудно-импульсные системы; нелинейные искажения; сложные линейные цепи; широтно-импульсные системы.

Аннотация: Приведены результаты исследования широтно-импульсной системы, охваченной цепью отрицательной обратной связи. На основе асимптотического метода снижения порядка линейной системы предложена методика сведения широтно-импульсной системы к эквивалентной нелинейной амплитудно-импульсной системе, для которой применимы известные методы исследования.

Введение

Усилители мощности класса D с широтно-импульсной модуляцией находят в настоящее время широкое применение при выходной мощности от единиц ватт в интегральном исполнении до сотен кВт в мощных модуляционных устройствах. На малых уровнях мощности проблемы обеспечения линейности и устойчивости усилителя решаются за счет высокой тактовой частоты (до 1 МГц) и простейших выходных фильтров. При больших мощностях существенно увеличиваются габариты усилителей и, как следствие, растут паразитные емкости схемы, что приводит к необходимости использования минимально возможной тактовой частоты (порядка 50...100 кГц) и соответственно сложных демодулирующих фильтров.

Использование отрицательной обратной связи (ООС) для снижения нелинейных искажений в этом случае приводит к необходимости количественной оценки запаса устойчивости усилителя к самовозбуждению. Решение этой проблемы, в виде приемлемого для практического применения, в общем случае для широтно-импульсной системы (ШИС), не существует. Возможность оценки в частных случаях были рассмотрены в [1, 2].

Цель настоящей работы заключается в поиске новых методов анализа устойчивости ШИС, применимых в практических приложениях.

Методы анализа широтно-импульсных систем

Анализ импульсных систем производится, как правило, на базе теории решетчатых функций и дискретного преобразования Лапласа [1]. Теория амплитудно-импульсных систем в настоящее время разработана достаточно подробно как для линейного тракта, так и для систем, содержащих нелинейные безынерционные элементы [1, 2].

В отличие от амплитудно-импульсной системы (АИС), ШИС значительно труднее поддается анализу, поэтому их исследуют путем сведения к эквивалентным нелинейным АИС.

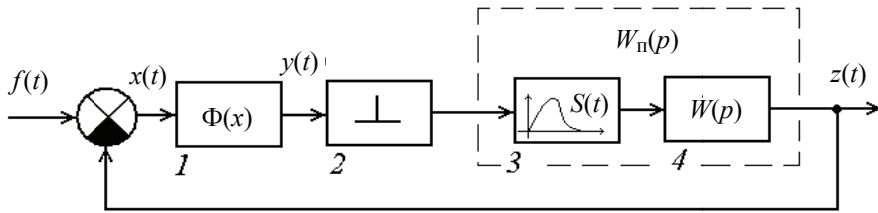


Рис. 1. Структурная схема нелинейной АИС:

$f(t)$, $z(t)$ – входной и выходной сигналы соответственно; $w(t)$ – импульсная характеристика непрерывной (линейной) части ШИС; $x(t)$ – сигнал ошибки; $y(t)$ – нелинейное преобразование $x(t)$; 1 – нелинейные безинерционные преобразователи тракта; 2 – генератор тактовых δ -функций, модулированных по амплитуде сигналом $y(t)$; 3 – генератор импульсов формы $S(t)$; 4 – линейная часть тракта; $W_n(p)$ – изображение импульсной переходной функции

Структурная схема нелинейной АИС представлена на рис. 1.

Согласно [2] уравнение системы (см. рис. 1) в решетчатых функциях имеет вид

$$x(n,0) = f(n,0) - BT \sum_{m=0}^{n-1} \Phi(x) \int_0^{\gamma} S(\bar{\tau}) \omega(n-m-1, 1-\bar{\tau}) d\bar{\tau}, \quad (1)$$

где B – коэффициент линейного усиления $x(t)$ в тракте АИС; $\bar{\tau} = \frac{\tau}{T}$ – дискретное время; γ – длительность импульса; n, m – числа суммирования.

Интеграл в (1) представляет собой свертку функции формирующего элемента и импульсной характеристики $\omega(t)$. В литературе [2] он получил название приведенной импульсной характеристики $\omega_n(t)$.

Если уравнение ШИС удастся свести к (1), то к ней можно применить все известные методы анализа и расчета нелинейных АИС.

Упрощенная структурная схема ШИС (к которой, в частности, может быть сведен усилитель мощности класса D) представлена на рис. 2.

Для ШИС функция формирующего элемента $S(t)$ имеет вид, представленный на рис. 3, где T – период тактовой частоты.

Согласно рис. 3, $S(\bar{\tau})$ соответствует двусторонней широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

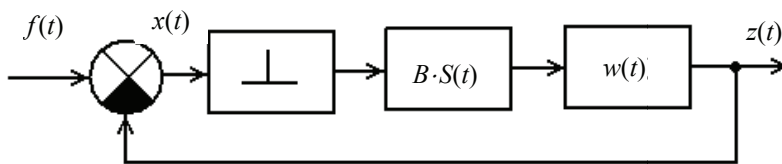


Рис. 2. Структурная схема ШИС

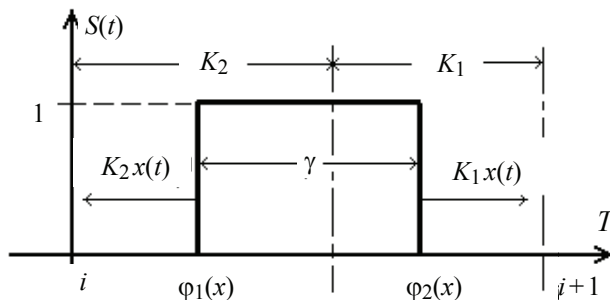


Рис. 3. Формирующий элемент ШИС

При $K_1 = 0$ или $K_2 = 0$ имеет место односторонняя ШИМ.
По аналогии с (1), для ШИС можно записать следующее выражение

$$x(n,0) = f(n,0) - BT \sum_{m=0}^{n-1} \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} S(\bar{\tau}) \omega(n-m-1, 1-\bar{\tau}) d\bar{\tau}. \quad (2)$$

В отличие от (1) интеграл в (2) является функцией $x(t)$, что и определяет особенность анализа ШИС.

Согласно рис. 3,

$$\varphi_1(x) = K_2(1-x); \quad \varphi_2(x) = K_2 + K_1x; \quad K_1 + K_2 = 1. \quad (3)$$

где $\varphi_1(x)$ – фазовый сдвиг переднего фронта; $\varphi_2(x)$ – фазовый сдвиг заднего фронта; x – сигнал ошибки; K_1 – коэффициент модуляции переднего фронта; K_2 – коэффициент модуляции заднего фронта.

Введем понятие коэффициента асимметрии ШИМ:

$$A = \frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2};$$

$$K_1 = \frac{1+A}{2}; \quad K_2 = \frac{1-A}{2}. \quad (4)$$

На интервале интегрирования в (2) $s(\bar{\tau}) = 1$, а $\omega(n-m-1, 1-\bar{\tau})$ можно представить рядом элементарных импульсных характеристик

$$\omega(n-m-1, 1-\bar{\tau}) = \sum_{v=0}^o \sum_{\mu=0}^{r_v-1} C'_{v\mu} \frac{(n-m-\bar{\tau})^\mu}{\mu!} \exp[q_v(n-m-\bar{\tau})], \quad (5)$$

где o – число разных полюсов; r_v – кратность v -го полюса; μ – число суммирования;

$$C'_{v\mu} = \frac{1}{(r_v - \mu - 1)!} \frac{d^{(r_v - \mu - 1)}}{dq^{(r_v - \mu - 1)}} \left[\frac{P_H(q)}{TQ_H(q)} (q - q_v)^{r_v} \right]_{q=q_v},$$

где d, q – переменные; $P_H(q), Q_H(q)$ – полиномы в числителе и знаменателе передаточной функции непрерывной части ШИС $W(q)$.

Предположим, что все полюса простые и не равны нулю (наличие нулевых или кратных полюсов не усложняют и не упрощают задачи сведения ШИС к АИС).

Для случая простых полюсов:

$$C'_{v\mu} = C'_v = \frac{1}{T} |W(q)(q - q_v)|_{q=q_v};$$

$$\omega(n-m-1, 1-\bar{\tau}) = \sum_{v=1}^s C'_v \exp[q_v(n-m-\bar{\tau})]. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (2), получим

$$x(n,0) = f(n,0) - BT \sum_{m=0}^{n-1} \sum_{v=1}^s \left[\int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} \exp[-q_v \bar{\tau}] d\bar{\tau} \right] C'_v \exp[q_v(n-m)] =$$

$$= f(n,0) - BT \sum_{m=0}^{n-1} \left\{ \sum_{v=1}^s \Phi_v[x(m,0)] \varpi_{mv}(n-m) \right\}, \quad (7)$$

где s – число суммирования;

$$\Phi_v[x(m,0)] = \frac{\varphi_2[x(m,0)]}{\varphi_1[x(m,0)]} \int \exp[-q_v \bar{\tau}] d\bar{\tau}; \quad (8)$$

$$\varpi_{nv} = C'_v \exp[q_v(n-m)]. \quad (9)$$

Сравнивая (7) и (1) можно сделать вывод, что ШИС сводится к эквивалентной многомерной нелинейной АИС. Число параллельных ветвей эквивалентной АИС равно числу корней характеристического уравнения.

Анализ многомерных нелинейных АИС позволяет определить в общем виде лишь абсолютную устойчивость системы, причем приемлемые для практики результаты удается получить лишь для двумерных систем, или для систем, сводящихся к двумерным при анализе устойчивости [3].

В связи с этим, при анализе устойчивости ШИС прибегают к приближенным методам, позволяющим снизить порядок эквивалентной АИС. В работе [4], например, предлагается представить $\Phi_v(x)$ степенным полиномом вида

$$\Phi_v(x) = \sum_{k=1}^N r_k^{(v)} x^k, \quad (10)$$

где k – число суммирования.

В этом случае (7) принимает вид

$$\begin{aligned} x(n,0) &= f(n,0) - BT \sum_{m=0}^{n-1} \sum_{v=1}^s \sum_{k=1}^N C'_v \exp[q_v(n-m)] x^k(m,0) = \\ &= f(n,0) - BT \sum_{m=0}^{n-1} \sum_{k=1}^N x^k(m,0) \varpi'_{nk}(n-m), \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\varpi'_{nv}(n-m) = \sum_{v=1}^N r_k^{(v)} C'_v \exp[q_v(n-m)]. \quad (12)$$

Сопоставляя (7) и (11), нетрудно заметить, что в (11) число ветвей определяется числом членов полинома (10), из которых одна ветвь – линейная.

Если эквивалентная нелинейность $\Phi_v(x)$ относительно мала, в полиноме (10) можно оставить лишь два-три слагаемых. При этом эквивалентная АИС будет двух-трехмерной даже в случае высоких порядков линейной части ШИС.

Если

$$\Phi_v(x) = r_1^{(v)} x + r_2^{(v)} x^2,$$

то, как показано в [4], структурная схема ШИС может быть сведена к одномерной нелинейной АИС.

Выводы

Метод приближенного анализа устойчивости особенно эффективен, когда нелинейность эквивалентной АИС выражена слабо. Таким образом, широтно-импульсная система оказалась сведенной к одновременной нелинейной амплитудно-импульсной системе, задача анализа устойчивости которой решается относительно просто с помощью известных критериев устойчивости.

Список литературы

1. Ципкин, Я.З. Теория линейных импульсных систем / Я.З. Ципкин. – М. : Физматгиз, 1963. – 968 с.

2. Ципкин, Я.З. Теория нелинейных импульсных систем / Я.З. Ципкин, Ю.С. Попков. – М. : Наука, 1973. – 416 с.
 3. Полов, К.П. Условия устойчивости усилителя в режиме «D» с обратной связью / К.П. Полов // Радиотехника. – 1971. – № 6. – С. 24–26.
 4. Полов, К.П. К исследованию устойчивости усилителя в режиме «D» с обратной связью / К.П. Полов // Радиотехника. – 1974. – № 1. – С. 31–33.
 5. Иццоки, Я.С. Приближенный метод анализа переходных процессов в сложных линейных цепях / Я.С. Иццоки. – М. : Совет. радио, 1969. – 176 с.
-

Evaluation of Pulse-Duration System Stability through Approximation Analysis

S.S. Abramov

*Department of Radio-Transmitting Devices and Electrical Power Supply,
Siberian State University of Telecommunication and Computing, Novosibirsk;
abramov@sibsutis.ru*

Key words and phrases: amplitude-pulse systems; complex linear chain; nonlinear distortion; pulse-duration systems.

Abstract: The paper presents the results of the study of the pulse-duration system encompassed with the chain of negative feedback. On the basis of asymptotic method of the reduction in the linear system order it offers the techniques of bringing pulse-duration system to the equivalent nonlinear amplitude-pulsed system, for which the established research methods can be applied.

Einschätzung der Standfestigkeit des Breitimpulssystems durch die Methode der Annäherungsanalyse

Zusammenfassung: Es werden die Resultate der Untersuchung des Breitimpulssystems (BIS), das mit der Kette der negativen Rückverbindung umgefasst ist, angeführt. Auf Grund der asymptotischen Methode der Senkung der Ordnung des linearischen Systems ist die Methodik der BIS-Reduzierung zum equivalenten nichtlinearen Amplitudenimpulssystem vorgeschlagen.

Estimation de la stabilité du système de large impulsion par la method de l'analyse approchée

Résumé: Sont cités les résultats de l'étude du système de large impulsion, saisi par un réseau de la liaison rétroactive négative. A la base de la méthode asymptotique de la diminution de l'ordre du système linéaire est proposée la méthode de la réduction de système de large impulsion au système d'impulsion en amplitude équivalent et non linéaire, pour lequel de différentes méthodes peuvent être appliquées.

Автор: *Абрамов Сергей Степанович* – кандидат технических наук, доцент кафедры радиопередающих устройств и электропитания, ГОУ ВПО «СибГУТИ».

Рецензент: *Малинкин Виталий Борисович* – доктор технических наук, академик РАЕ, профессор кафедры многоканальной электросвязи и оптических систем, ГОУ ВПО «СибГУТИ».
