

УДК 621.391.1

# Совершенствование методики построения оптимального ограничителя-корректора для борьбы с нелинейными явлениями в радиоприемных устройствах

Представлена усовершенствованная методика построения оптимального ограничителя-корректора с кусочно-линейной мгновенной динамической характеристикой, позволяющая осуществлять коррекцию нелинейных явлений, возникающих в радиоприемных трактах.

**А. А. РОМАШ,**  
слушатель адъюнктуры,  
старший лейтенант

**А. А. ПИЛЮШКО,**  
доцент кафедры связи, к. т. н., доцент

Военная академия Республики Беларусь

**Введение.** В статье описывается методика построения оптимального кусочно-линейного ограничителя-корректора (О-К), в которой, в отличие от [1], исследования проводились для несимметричной относительно начала координат мгновенной динамической характеристики (МДХ) радиоприемного устройства (РПУ). При этом в основе методики по-прежнему лежит использование универсального метода определения нелинейных искажений и помех в трактах передачи электрических сигналов, а также принятый в [1] понятийный аппарат.

**Основная часть.** На рис. 1–5 представлены результаты расчета затухания нелинейности по 2-й ( $a_{2r} = -20 \lg K_{2r} = 20 \lg U_{m1r} / U_{m2r}$ ) и 3-й ( $a_{3r} = -20 \lg K_{3r} = 20 \lg U_{m1r} / U_{m3r}$ ) гармоникам для различных вариантов построения О-К при условии подачи на вход РПУ сигнала  $U_{вх} = U_m \sin \omega t$ :

- с «отсечкой» (рис. 1), где узлы излома выбраны в точках  $x_- = -0,3; -0,5; -0,8$  соответственно;
- несимметричного О-К (рис. 2), где узлы излома выбраны в точках  $x_+ = 0,3; 0,6; 0,8$  и  $x_- = -0,8$  соответственно;

- симметричного О-К (рис. 3), где узлы излома выбраны в точках  $x_+ = 0,4; 0,6; 0,8$  и  $x_- = -0,4; -0,6; -0,8$  соответственно;
- симметричного О-К с различной крутизной МДХ (рис. 4);
- симметричного О-К с различными углами наклона участков ограничения (рис. 5);

Кривые синего цвета на рис. 1–9 показывают значения затуханий нелинейности по соответствующим гармоникам до введения О-К в тракт прохождения сигнала.

Проанализировав возможные варианты построения кусочно-линейного О-К

с «отсечкой», можно сделать выводы, что варианты построения О-К с «отсечкой» (использование одного узла излома О-К только для положительных либо только для отрицательных значений входного сигнала) приводят:

- к незначительному увеличению затухания по 3-й гармонике (не более 3–4 дБ в рамках ограниченного участка (смотри рис. 1));
- появлению 2-й гармоники ( $a_{2r}$  по сравнению с вариантом, когда О-К отсутствует,

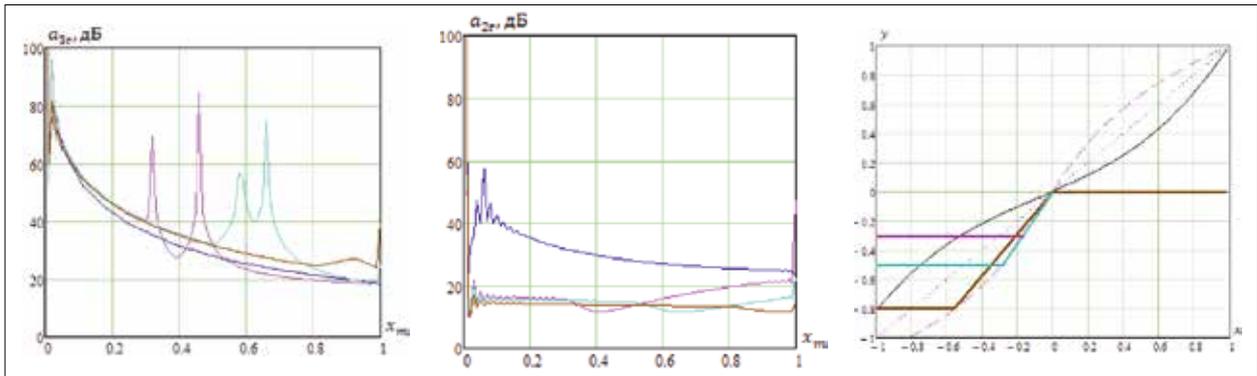


Рисунок 1 – Результаты расчета  $\alpha_{2r}$  и  $\alpha_{3r}$  для МДХ О-К с «отсечкой»

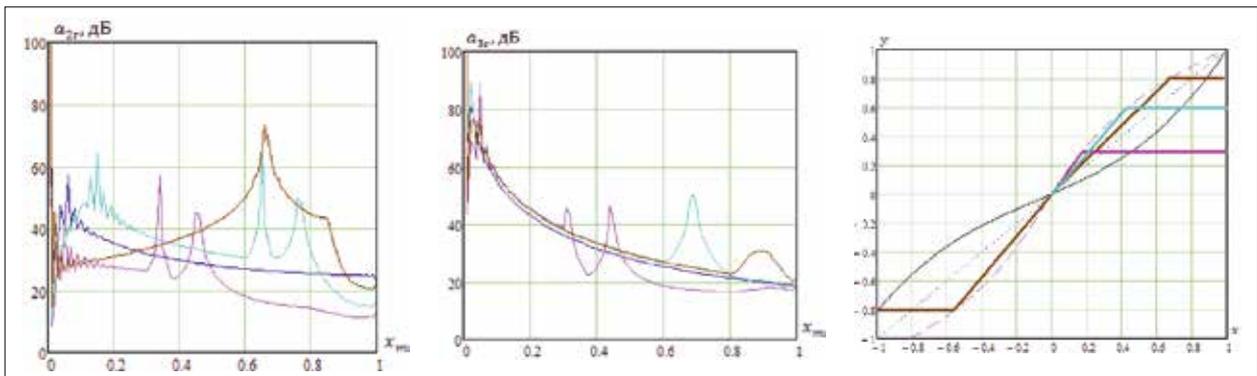


Рисунок 2 – Результаты расчета  $\alpha_{2r}$  и  $\alpha_{3r}$  для МДХ несимметричного О-К

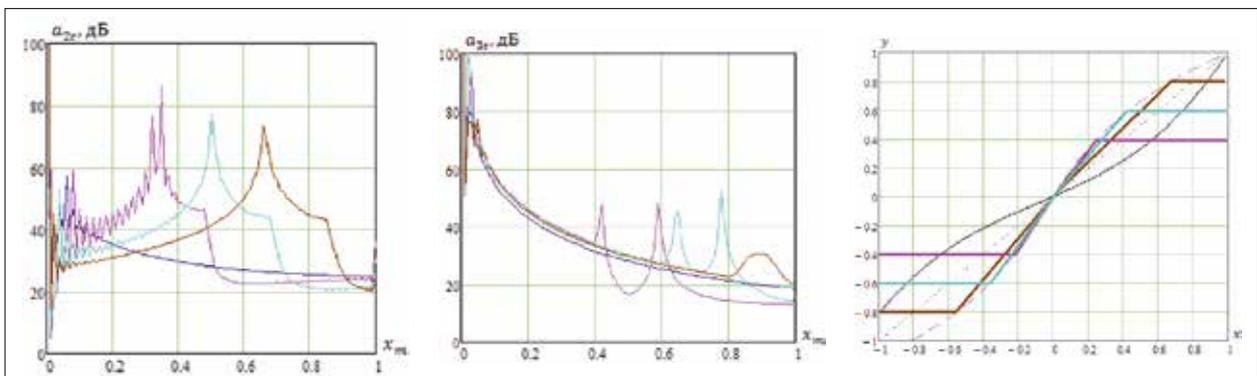


Рисунок 3 – Результаты расчета  $\alpha_{2r}$  и  $\alpha_{3r}$  для МДХ симметричного О-К

уменьшается на 10–15 дБ во всем динамическом диапазоне значений входного сигнала). При этом изменение крутизны рабочего участка МДХ О-К и угла наклона участков ограничения очень слабо влияют на величину затухания по 2-й и 3-й гармоникам.

Проанализировав возможные варианты построения кусочно-линейного О-К с двумя узлами излома (О-К выполняет только функцию ограничения, коррекция отсутствует), можно сделать следующие выводы:

1. Использование двух узлов излома приводит к незначительному увеличению затухания по 3-й гармонике (не более 5 дБ (см. рис. 2–5)).

2. Наилучшего результата в затухании по 2-й гармонике удается достичь при симметричном относительно начала координат расположении узлов излома О-К (далее – симметричном расположении узлов излома О-К) (смотри рис. 2–3).

3. Изменение крутизны рабочего участка МДХ О-К незначительно влияет на затухание нелинейности по 2-й гармонике (либо приводит к его уменьшению по сравнению с вариантом, когда узел излома МДХ О-К располагается на МДХ идеального корректора примерно на 10–20 дБ (смотри рис. 4)).

4. Изменение угла наклона участков ограничения незначительно влияет на затухание нелинейности по 2-й и 3-й гармоникам (смотри рис. 5).

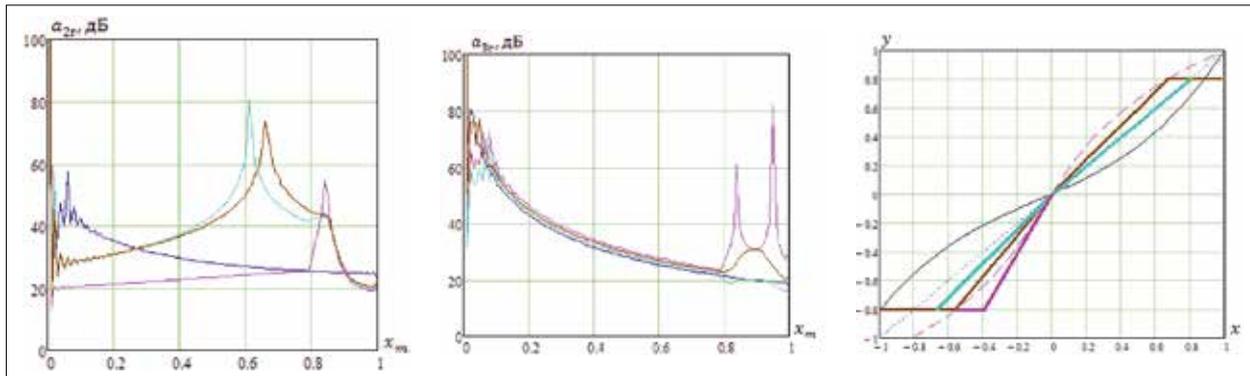


Рисунок 4 – Результаты расчета  $\alpha_{2r}$  и  $\alpha_{3r}$  для МДХ с различной крутизной симметричного О-К

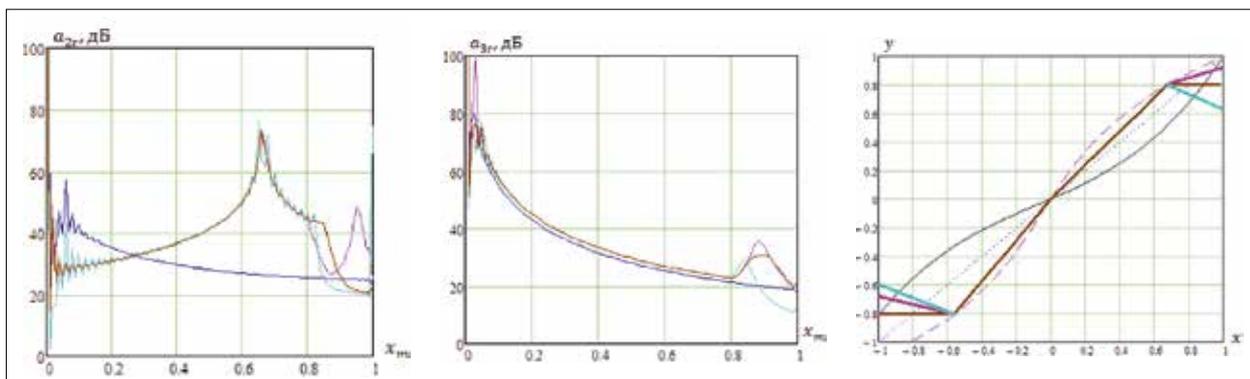


Рисунок 5 – Результаты расчета  $\alpha_{2r}$  и  $\alpha_{3r}$  для МДХ с различными углами наклона участков ограничения симметричного О-К

5. В целом использование двух узлов излома О-К не приводит к обеспечению существенного (20 дБ и более) подавления 2-й и 3-й гармоник. Поэтому дальнейший анализ целесообразно проводить с использованием 4, 6, 8 и т.д. узлов излома.

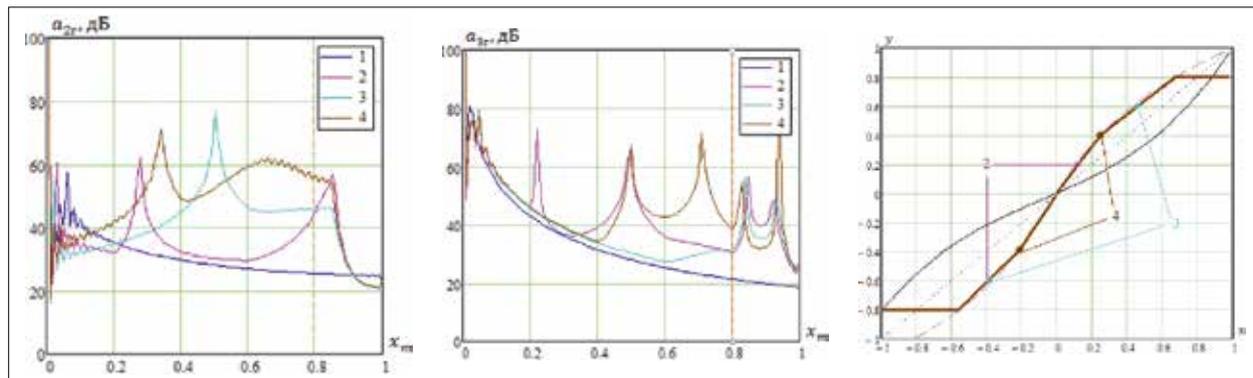
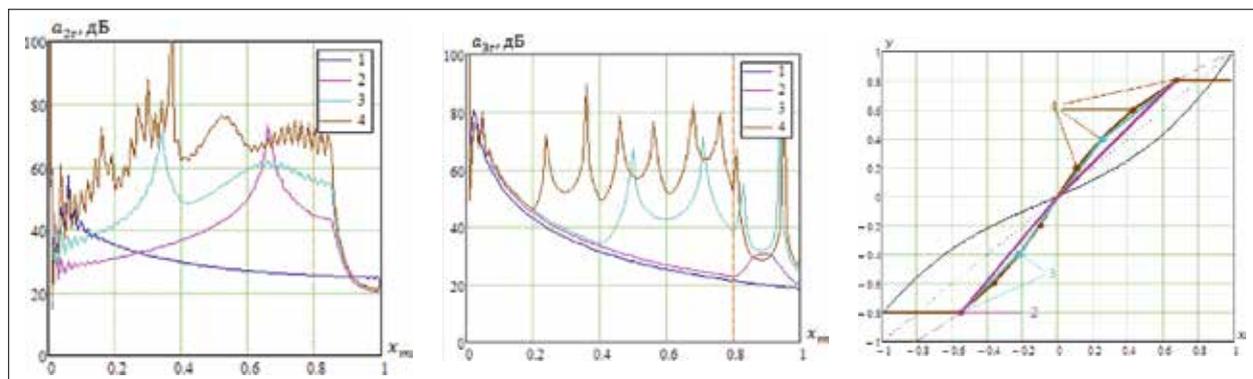
На рис. 6–7 представлены результаты расчета затухания нелинейности по 2-й и 3-й гармоникам при построении О-К с 4 и 8 узлами излома (О-К выполняет не только функцию ограничения, но и коррекции). Результаты имитационного моделирования представлены для варианта, когда крайние узлы излома расположены в точках  $x_+ = 0,8$  и  $x_- = -0,8$ . На рис. 6 кривые 2 относятся к варианту выбора узлов излома в точках  $x_+ = 0,2; 0,8$  и  $x_- = -0,6; -0,8$ ; кривые 3 – в точках  $x_+ = 0,6; 0,8$  и  $x_- = -0,6; -0,8$ ; кривые 4 – в точках  $x_+ = 0,4; 0,8$

и  $x_- = -0,4; -0,8$ . На рис. 7 кривые 2 относятся к варианту использования 2 узлов излома в точках  $x_+ = 0,8$  и  $x_- = -0,8$ ; кривые 3 – 4 узла излома в точках  $x_+ = 0,4; 0,8$  и  $x_- = -0,4; -0,8$ ; кривые 4 – 8 узлов излома в точках  $x_+ = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  и  $x_- = -0,2; -0,4; -0,6; -0,8$ .

Из анализа рис. 6–7 (а также других возможных вариантов построения О-К с 4, 6 и 8 узлами излома) следует, что выводы 2, 3 и 4

по исследованию двух узлов излома в полной мере справедливы для 4, 6 и 8 узлов излома. Кроме этого, использование 2, 4, 6, 8 узлов излома О-К дает довольно существенный прирост в затухании по 2-й и 3-й гармоникам в рамках ограниченного участка. Так, например, использование двух узлов излома по отношению к варианту до введения О-К в тракт прохождения сигнала обеспечивает прирост только  $\alpha_{2r}$  не менее 18 дБ в диапазоне значений  $x_m = 0,55...0,8$ . Использование четырех узлов излома обеспечивает прирост  $\alpha_{2r}$  не менее 22 дБ в диапазоне значений  $x_m = 0,3...0,8$ , а также  $\alpha_{3r}$  не менее 16 дБ в диапазоне значений  $x_m = 0,45...0,8$ ; использование шести узлов излома обеспечивает прирост  $\alpha_{2r}$  не менее 30 дБ в диапазоне значений  $x_m = 0,2...0,8$ , а также  $\alpha_{3r}$  не менее 22 дБ в диапазоне значений  $x_m = 0,3...0,8$ ; использование восьми узлов излома обеспечивает прирост  $\alpha_{2r}$  не менее 34 дБ в диапазоне значений  $x_m = 0,17...0,8$ , а также  $\alpha_{3r}$  не менее 25 дБ в диапазоне значений  $x_m = 0,27...0,8$ .

Узлы излома необходимо располагать на МДХ идеального корректора. При этом в отличие от [1], где при симметричном расположении узлов излома указывалось на строгое соблюдение

Рисунок 6 – Результаты расчета  $\alpha_{2r}$  и  $\alpha_{3r}$  при построении О-К с 4 узлами изломаРисунок 7 – Результаты расчета  $\alpha_{2r}$  и  $\alpha_{3r}$  при построении О-К с 2, 4 и 8 узлами излома

равных расстояний между узлами, для несимметричной МДХ РПУ по данному пункту жестких требований не предъявляется: узлы излома можно выбирать с отклонением ординаты 0,01–0,06 от идеальных значений без существенных потерь в затухании  $\alpha_{2r}$  и  $\alpha_{3r}$ , значения которых остаются при этом постоянными с точностью 2–5 дБ на фоне прироста в 16–34 дБ. Величина отклонения, очевидно, зависит от многих факторов, прежде всего от формы исходной МДХ РПУ, выбранных параметров О-К и исследуемых сигналов. Это серьезно затрудняет поиск оптимального решения при построении О-К (увеличиваются временные затраты и программная сложность вычислений ради 2–3 дБ). Так, например, при условии построения О-К с шестью узлами излома в точках  $x_+ = 0,266; 0,533; 0,8$  и  $x_- = -0,266; -0,533; -0,8$  (соблюдается строгое равенство расстояний между узлами по оси  $x$ ) и в точках  $x_+ = 0,2; 0,5; 0,8$  и  $x_- = -0,2; -0,5; -0,8$  (нестрогое равенство) затухание  $\alpha_{2r}$  уменьшается на 2 дБ в диапазоне  $x_m = 0,1 \dots 0,8$ , а затухание  $\alpha_{3r}$  увеличивается на 3 дБ в диапазоне  $x_m = 0,28 \dots 0,8$ .

На рис. 8 представлены результаты расчета затухания нелинейности по комбинационной гармонике

вида  $\omega_1 + \Omega$  при условии подачи на вход РПУ сигнала  $U_{вх} = U_{m1} \sin(\omega_1 t) + U_{m2} [1 + m \sin(\Omega t)] \sin(\omega_2 t)$  с различными значениями индекса модуляции  $m$  и амплитудами составляющих сигнала  $U_{m1} = 0,05$  и  $U_{m2}$  равной 0,86 (при  $m = 0,1$ ), 0,63 (при  $m = 0,5$ ) и 0,52 (при  $m = 0,8$ ). На рис. 9 представлены результаты расчета затухания нелинейности по комбинационным гармоникам вида  $\omega_1 \pm \omega_2$  и  $2\omega_1 \pm \omega_2$  при условии подачи на вход РПУ сигнала  $U_{вх} = U_{m1} \sin(\omega_1 t) + U_{m2} \sin(\omega_2 t)$ , где  $U_{m1} = 0,05$  и  $U_{m2} = 0,95$ . На рис. 8–9 кривые 1 относятся к варианту до введения О-К в тракт прохождения сигнала; кривые 2 – к варианту использования двух узлов излома в точках  $x_+ = 0,8$  и  $x_- = -0,8$ ; кривые 3 – восьми узлов излома в точках  $x_+ = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  и  $x_- = -0,2; -0,4; -0,6; -0,8$ .

Выводы, полученные по результатам имитационного моделирования различных вариантов построения О-К, при условии подачи на вход РПУ различного типа сигналов (одночастотного; одночастотного с постоянной составляющей; двухчастотного; двухчастотного, когда один (оба) из них модулированы по амплитуде; трехчастотного) в полной мере справедливы для широкого класса МДХ РПУ: как для «сильно», так и для «слабо» нелинейных.

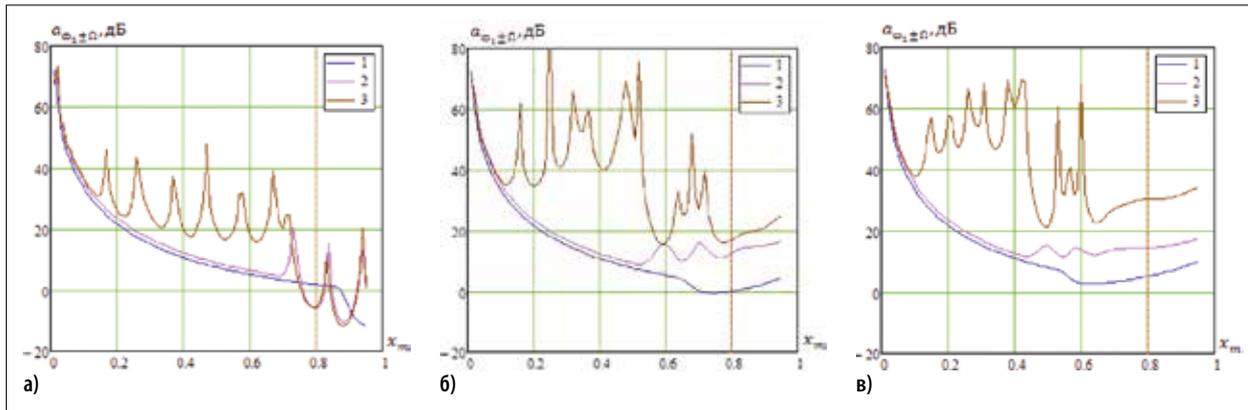


Рисунок 8 – Результаты расчета  $a_{\omega_1 \pm \omega_2}$  при построении О-К с 2 и 8 узлами излома, где а)  $m=0,1$ ; б)  $m=0,5$ ; в)  $m=0,8$

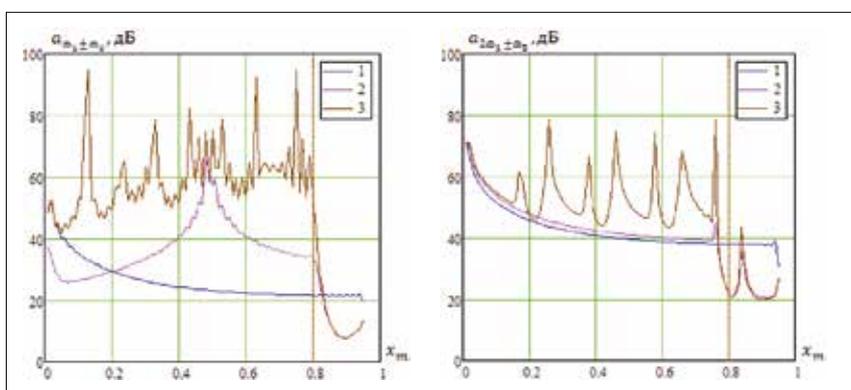


Рисунок 9 – Результаты расчета  $a_{\omega_1 \pm \omega_2}$  и  $a_{2\omega_1 \pm 2\omega_2}$  при построении О-К с 2 и 8 узлами излома

**Заключение.** Таким образом, на основании выводов, сделанных в [1] и в данной статье по результатам имитационного моделирования различных МДХ РПУ и типов сигналов, можно сформулировать уточненную методику построения оптимального кусочно-линейного О-К:

1. Выбор варианта построения О-К зависит от поведения функции, описывающей МДХ РПУ: для симметричной относительно начала координат характеристики О-К должен быть симметричным, а для несимметричной – несимметричным.

2. Чтобы добиться наилучшего прироста в величине затухания нелинейности по гармоникам при меньшем количестве узлов излома (что упрощает техническую реализацию и снижает конечную стоимость О-К), следует учитывать следующие закономерности:

- необходимо использовать только четное количество узлов излома О-К (2, 4, 6 и т. д.);
- если МДХ РПУ симметрична, то:
  - а) узлы излома О-К необходимо располагать на МДХ идеального корректора симметрично относительно начала координат, чтобы обеспечить наибольшее подавление нелинейных продуктов 2-го порядка;

б) при использовании двух узлов излома О-К для обеспечения наибольшего прироста в величине затухания нелинейности по 3-й гармонике узлы необходимо выбирать в диапазоне  $x_+ = 0,5 \dots 0,7$  и  $x_- = -0,5 \dots -0,7$ ;

в) при использовании 4, 6, 8 и т. д. узлов излома необходимо соблюдать строгое равенство расстояний между узлами по оси  $x$  независимо от степени ограничения (под степенью ограничения понимается расположение узлов излома, с которых начинаются участки ограничения для положительных и отрицательных значений входного сигнала);

- если МДХ РПУ несимметрична:
  - а) то узлы излома О-К необходимо располагать на МДХ идеального корректора;
  - б) при использовании двух узлов излома для обеспечения максимального отношения сигнал/собственный шум на выходе исследуемого тракта прохождения сигнала первый узел излома для отрицательных (или для положительных в зависимости от способа нормировки МДХ РПУ) значений

- входного сигнала необходимо выбирать в точке, которая является взаимнообратной точке, где МДХ РПУ покидает область своего определения по оси  $x$ . Второй узел излома излома для положительных (или для отрицательных в зависимости от способа нормировки МДХ РПУ) необходимо выбирать в точке с такой же по модулю ординатой как у первого узла излома;
- в) при использовании 4, 6, 8 и т. д. узлов излома жестких требований по строгому соблюдению равенства расстояний между узлами по оси  $y$  в отличие от симметричной МДХ РПУ не предъявляется. В зависимости от формы исходной МДХ РПУ узлы можно выбирать с отклонением ординаты 0,01–0,06 от идеальных (с точки зрения равенства расстояний) значений без существенных потерь в затухании гармоник, которое остается при этом постоянными с точностью 2–5 дБ на фоне прироста в 16–34 дБ;
- изменение угла наклона участков ограничения, а также изменение крутизны рабочего участка МДХ О-К приводит к несущественному изменению затухания по 2-й, 3-й и комбинационным гармоникам либо к его уменьшению;
  - прирост в величине затухания нелинейности по гармоникам нелинейно зависит от количества узлов излома О-К. Так использование двух узлов излома по отношению к варианту до введения О-К в тракт прохождения сигнала обеспечивает прирост в затухании на 18 дБ и более, четырех узлов излома по отношению к двум – на 9 дБ и более, шести узлов излома по отношению к четырем – на 7–8 дБ и более, восьми узлов излома по отношению к шести – на 4–5 дБ и более. При этом увеличение количества узлов излома приводит не только к уменьшению продуктов нелинейности, но и расширению диапазона значений  $x_m$ , в котором этот прирост наблюдается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ромаш, А. А. Методика построения оптимального ограничителя-корректора для борьбы с нелинейными явлениями в радиоприемных устройствах /А. А. Ромаш, Е. К. Карпук, А. А. Пилюшко // Веснік сувязі. – 2022. – № 2. – С. 56–59.

---

*The article presents an improved technique for constructing an optimal limiter-corrector with piecewise linear instantaneous dynamic characteristic, which allows correction of nonlinear phenomena occurring in radio receiving paths.*

Получено: 14.02.2022.