



ДИСКУССИЯ

УДК 550.834.04

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АМПЛИТУДНОЙ НЕИДЕНТИЧНОСТИ ИМПУЛЬСОВ  
В РАЗВЕРТКАХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОДОИМПУЛЬСНОГО НАКАПЛИВАНИЯ  
СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ**

**Ю.П. Кострыгин, Д.А. Колесников**

*ООО “Новоросморгео”, 350089, Краснодар, просп. Чекистов, 16, офис 237, Россия,  
e-mail: [kostr\\_p@mail.ru](mailto:kostr_p@mail.ru), [spirit\\_defh@mail.ru](mailto:spirit_defh@mail.ru)*

Исследовано влияние амплитудной неидентичности импульсов в однополярных последовательностях ЛИЧ и ЛИП, а также в двухполярных дополнительных последовательностях, используемых для кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний, на динамику соответствующих им корреляционных функций и на помехоустойчивость кодоимпульсного метода. Показано, что динамика корреляционных функций практически не искажается для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ ( $F_{\max} \approx 80$  Гц) при двукратном уменьшении амплитуды импульсов в частотном диапазоне развертки 10–80 Гц, а для эффективных сигналов ЛИП ( $F_{\max} = 30 \div 40$  Гц) при двукратном уменьшении амплитуды импульсов в частотном диапазоне развертки 10–30 Гц. Вместе с тем отмечается, что для сохранения необходимой помехоустойчивости кодоимпульсного метода по отношению к некогерентным помехам амплитуда импульсов в эффективных развертках ЛИЧ не должна меняться более чем в  $\approx 1,4$  раза в полосе частот развертки 10–80 Гц, а в эффективных развертках ЛИП более чем в  $\approx 1,4$  раза в интервале частот развертки 10–30 Гц. Показано также, что для двухполярных дополнительных последовательностей при раздельной обработке импульсов с положительной и отрицательной полярностью качественную динамику корреляционных функций можно сохранить при уменьшении амплитуды импульсов в полосе частот развертки 10–30 Гц не более, чем в 1,15–1,2 раза.

*Однополярные коды, двухполярные коды, амплитудная неидентичность импульсов, динамика корреляционных функций*

**VALUATION OF IMPACT OF AMPLITUDE NONIDENTITY OF PULSES IN SCANNING  
ON EFFICIENCY OF CODE PULSE ACCUMULATION OF SEISMIC VIBRATIONS**

**Yu.P. Kostrygin, D.A. Kolesnikov**

*“Novorosmorgeo” Ltd., Chekistov av., 16, Office 237, Krasnodar, 350089, Russia,  
e-mail: [kostr\\_p@mail.ru](mailto:kostr_p@mail.ru), [spirit\\_defh@mail.ru](mailto:spirit_defh@mail.ru)*

In this article we study impact of amplitude nonidentity of pulses in single-polarity linearly varying period sequences and linearly varying period and additional bi-polarity sequences used for code pulse seismic accumulation of vibrations on dynamics of corresponding functions correlation and on interference immunity of code pulse method. It is shown that dynamics of correlation functions is practically not distorted for the most efficient code pulse linearity varying period signals ( $F_{\max} \approx 80$  Hz) in the case of double decreasing the pulse amplitude in the scanning frequency range of 10–80 Hz, and for efficient signals of linearly varying period sequences ( $F_{\max} = 30\text{--}40$  Hz) in the case of double decreasing the pulse amplitude in the scanning frequency range of 10–30 Hz. Along with it, it should be noted that to preserve necessary interference immunity of code pulse method in relation to noncoherent interference the pulse amplitude in efficient scanning of linearly varying period shall not alter by more than  $\approx 1,4$  times within the scanning frequency band of 10–80 Hz and in efficient scanning of linearly varying period sequences by more than  $\approx 1,4$  times within the frequency interval range of 10–30 Hz. It is also shown that there is possibility to preserve qualitative dynamics of correlation functions for additional bi-polarity linearly varying period sequences when impulses with positive and negative polarity are processed separately in the case of decreasing the pulse amplitude in the scanning frequency band of 10–30 Hz by not more than 1,15–1,2 times.

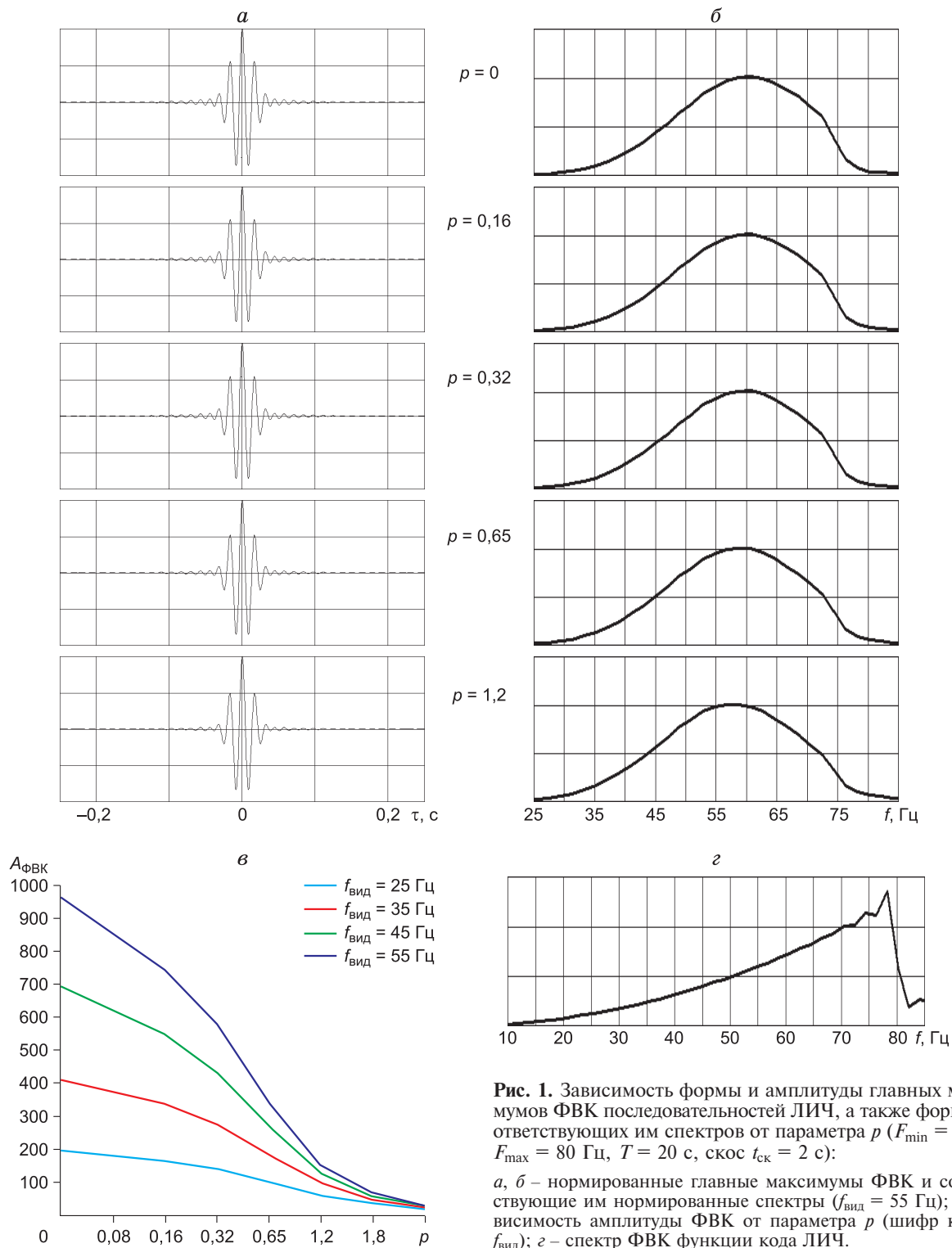
*Single-phase codes, bi-phase codes, amplitude nonidentity of pulses, dynamics of correlation functions*

В работах [1, 2] показано, что при кодоимпульсном накоплении колебаний с использованием однополярных кодов ЛИЧ наиболее эффективные для нефтегазовой сейсморазведки импульсные последовательности формируются при  $F_{\max} \approx 80$  Гц и  $T = 20 \div 30$  с, где  $F_{\max}$  и  $T$  – соответственно мак-

симальная частота следования импульсов и длительность разверток. При использовании же однополярных кодов с линейным изменением периода следования импульсов (коды ЛИП) наиболее эффективные последовательности формируются при  $F_{\max} = 30 \div 40$  Гц и  $T = 20 \div 30$  с. Реализация указан-

ных режимов создает принципиальные возможности для повышения временной разрешающей способности кодоимпульсного метода до уровня разрешающей способности вибросейсмического метода. В этом случае форма главных максимумов функций взаимной корреляции (ФВК) для “идеальных” последовательностей ЛИЧ и ЛИП практически не отличается от собственного процесса совокупной колебательной системы “излучатель–грунт” и геологическая среда.

В отличие от “идеальных” кодоимпульсных сигналов, характеризующихся постоянной амплитудой единичных импульсов, последовательности, формируемые реальными сейсмическими источниками, обладают некоторой амплитудной неидентичностью импульсов в развертке. Так, например, для ранее разработанных излучателей индукционно-динамического типа, использованных с целью возбуждения кодоимпульсных последовательностей, амплитуда импульсов



**Рис. 1.** Зависимость формы и амплитуды главных максимумов ФВК последовательностей ЛИЧ, а также формы соответствующих им спектров от параметра  $p$  ( $F_{мин} = 10$  Гц,  $F_{max} = 80$  Гц,  $T = 20$  с, скос  $t_{ск} = 2$  с):

$a, б$  – нормированные главные максимумы ФВК и соответствующие им нормированные спектры ( $f_{вид} = 55$  Гц);  $в$  – зависимость амплитуды ФВК от параметра  $p$  (шифр кривых  $f_{вид}$ );  $z$  – спектр ФВК функции кода ЛИЧ.

Значения динамического диапазона корреляционного преобразования импульсных последовательностей ЛИЧ в децибелах на временах, кратных 0,5 с, в зависимости от параметра  $p$  ( $F_{\min} = 10$  Гц,  $F_{\max} = 80$  Гц,  $T = 20$  с,  $t_{\text{ск}} = 2$  с,  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц)

$p$	$\tau = 0,5$ с	1,0 с	1,5 с	2,0 с	2,5 с	3,0 с	3,5 с	4,0 с	4,5 с	5,0 с
0	54,5	53,3	50,1	52,3	44,5	43,3	47,6	49,6	50,1	47,5
0,08	54,6	53,3	49,8	52,0	44,1	43,1	47,5	49,4	49,8	47,4
0,16	54,7	53,3	49,4	51,7	43,7	42,8	47,3	49,3	49,6	47,2
0,32	54,8	53,2	48,6	51,2	42,9	42,2	47,0	49,0	49,1	46,9
0,65	55,0	52,7	46,9	49,7	41,4	41,1	46,4	48,3	48,1	46,4
1,2	54,9	50,6	43,8	47,1	39,0	39,6	45,5	47,1	46,6	45,6
1,8	54,1	47,4	40,7	44,4	37,0	38,4	45,1	45,9	45,4	45,2
2,4	52,8	44,1	38,1	42,2	35,7	38,0	45,2	45,3	44,9	45,5

$A_{\text{имп}}$  непрерывно уменьшалась по мере увеличения частоты следования  $F$ . Физически это связано с тем, что при уменьшении периода следования происходит снижение накопленной энергии конденсаторных батарей, используемой для формирования импульсов тока в обмотках излучателя. Более того, на участках развертки с высокими частотами следования импульсов, в моменты очередного воздействия тока в обмотках двигателя, связанные с предыдущими воздействиями, не успевают затухать, что дополнительно снижает эффективность работы излучателя. Экспериментальная зависимость  $A_{\text{имп}}(F)$ , полученная для серийного кодоимпульсного источника ИКИ-10/40, удовлетворительно аппроксимируется при  $F \geq 5$  Гц степенной функцией [3]

$$A_{\text{имп}} = k \cdot F^{-p}. \quad (1)$$

Временную функцию, определяющую закон изменения относительной амплитуды кодоимпульсного сигнала ЛИЧ в соответствии с условием (1), можно представить следующим образом:

$$A_{\text{имп}}(t) \sim [F_{\min} + (\Delta F/T)t]^{-p}, \quad (2)$$

где  $\Delta F$  – ширина частотного диапазона развертки.

Заменив в выражении (2) аргумент  $t$  на аргумент  $t_n$ , соответствующий временному положению импульсов функции кода в зависимости от их порядкового номера  $n$ , можно задать относительную амплитуду произвольного импульса в развертке.

Временное положение импульсов  $t_n$  в развертке ЛИЧ, характеризующейся возрастанием частоты следования, определяется, как известно, следующим образом [1]:

$$t_n = (T/\Delta F) \left( \sqrt{F_{\min}^2 + 2n\Delta F/T} - F_{\min} \right), \quad (3)$$

где  $F_{\min}$  – начальная (минимальная) частота следования импульсов. В формуле (3) начальному импульсу присвоен номер “0”.

Заменив в выражении (2) аргумент  $t$  на  $t_n$  и принимая во внимание выражение (3), несложно представить зависимость, определяющую относительную амплитуду импульсов функции кода ЛИЧ при различных значениях порядкового номера:

$$A_{\text{имп}}(n) \sim \left[ \sqrt{F_{\min}^2 + 2n\Delta F/T} \right]^{-p}. \quad (4)$$

При моделировании амплитудная неидентичность импульсов в формируемой последовательности

ЛИЧ задавалась с использованием выражения (4), в качестве же опорного сигнала использовалась функция кода, состоящая из импульсов Кронекера с постоянной амплитудой, равной единице.

На рис. 1 сопоставлены нормированные главные максимумы ФВК импульсных последовательностей ЛИЧ (а) и соответствующие им спектры (б), рассчитанные при значениях  $p$ , изменяющихся от 0 до 1,2. Минимальная частота следования импульсов равнялась  $F_{\min} = 10$  Гц, максимальная  $F_{\max} = 80$  Гц, длительность разверток  $T = 20$  с, скос  $t_{\text{ск}} = 2$  с. Кодоимпульсные последовательности были составлены из импульсов с колокольной огибающей; при этом соблюдалось условие  $\beta/f_{\text{вид}} = 1$ , где  $\beta$  – коэффициент затухания импульса;  $f_{\text{вид}}$  – видимая частота импульсов, равная в данном случае 55 Гц.

Из рис. 1 следует, что при использовании наиболее эффективной для нефтегазовой сейсморазведки кодоимпульсной последовательности ЛИЧ ( $F_{\max} = 80$  Гц,  $T = 20 \div 30$  с) неидентичность импульсов в развертке, определяемая степенной функцией (1), практически не влияет на форму главного максимума ФВК и форму соответствующего ему спектра даже при повышенных значениях параметра  $p$ , равных 0,32–0,65. Выполненные расчеты показали, что при значениях параметра  $p \leq 0,32$  неидентичность импульсов в развертке также весьма незначительно влияет на уровень помех преобразования в дальней зоне корреляционной функции (табл. 1). Динамический диапазон преобразования рассчитывался в данном случае по формуле

$$D(\tau) = 20 \lg A_{\text{max}}/\sigma(\tau), \quad (5)$$

где  $A_{\text{max}}$  – пиковая амплитуда главного максимума ФВК;  $\sigma(\tau)$  – среднеквадратичная амплитуда корреляционного фона во временном окне 0,5 с.

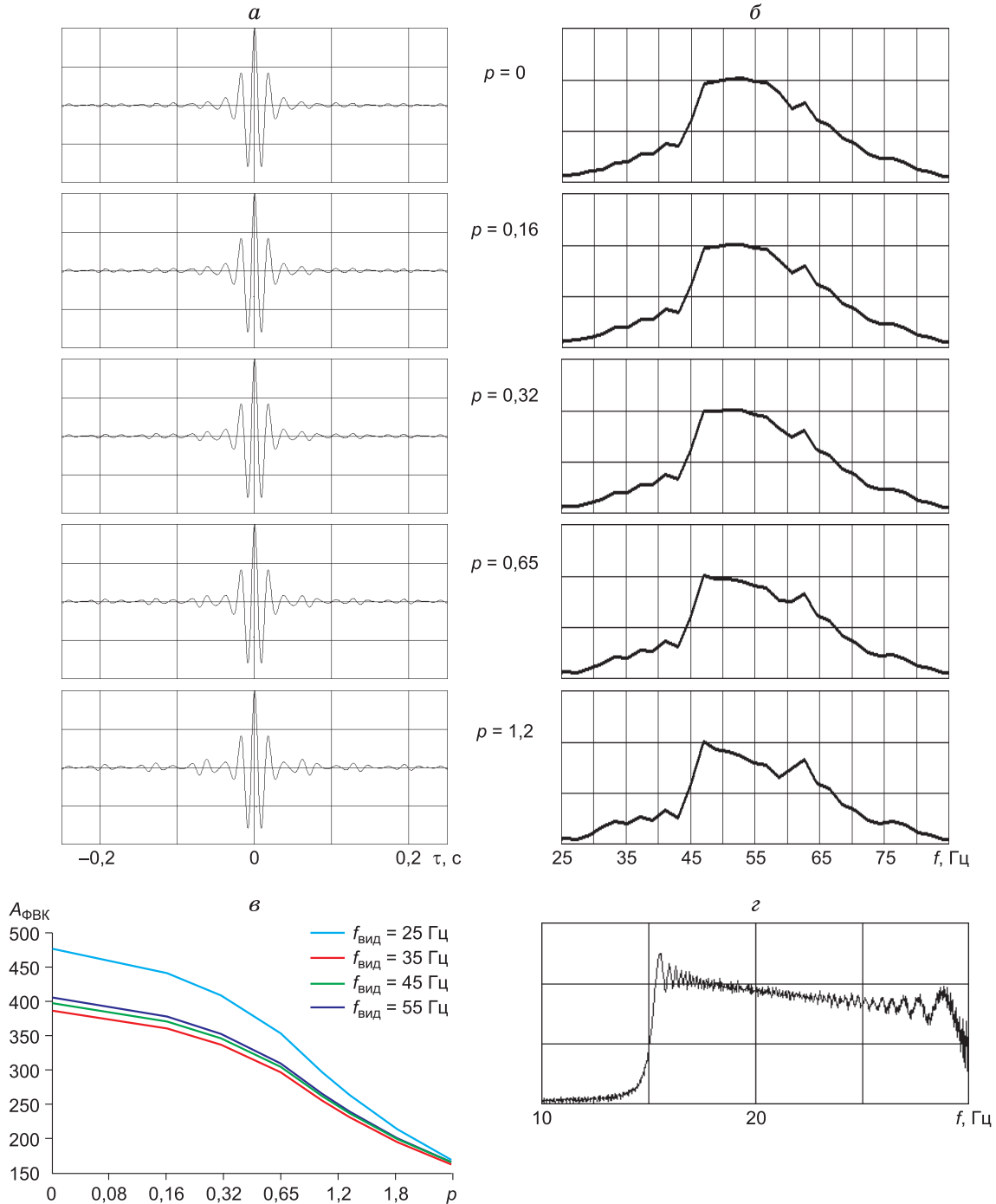
Следовательно, динамика корреляционных функций для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ ( $F_{\max} \approx 80$  Гц и  $T = 20 \div 30$  с) практически не искажается при амплитудной неидентичности импульсов в развертке, определяемой степенной функцией (1), при условии  $p \leq 0,32$ , т. е. при двукратном уменьшении амплитуды импульсов в частотном диапазоне 10–80 Гц. Очевидно, что уменьшение амплитуды возбуждаемых импульсов по мере увеличения частоты следования приведет к снижению помехоустойчивости метода по отношению к некогерентным помехам.

\* Для ИКИ-10/40 параметр  $p \approx 0,65$ .

Так, на рис. 1, в представлены графики пиковой амплитуды главного максимума ФВК эффективной импульсной последовательности ЛИЧ в зависимости от параметра  $p$ , рассчитанные для импульсов с различной преобладающей частотой  $f_{\text{вид}}$ . Видно, что при двукратном уменьшении амплитуды импульсов по мере увеличения частоты следования от 10 до 80 Гц, т. е. при  $p = 0,32$ , амплитуда ФВК, а значит, и помехоустойчивость метода, уменьшается в  $\approx 1,78$  раза для  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц, в  $\approx 1,63$  раза для  $f_{\text{вид}} = 45$  Гц, в  $\approx 1,46$  раза для  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц и в  $\approx 1,43$  раза для  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц. Ском-

пенсировать указанное снижение помехоустойчивости метода представляется возможным либо путем увеличения числа излучателей в группе в  $\approx 1,5$  раза, либо за счет  $\approx 2$ -кратного увеличения числа воздействий, что приведет к существенным экономическим потерям при проведении полевых работ.

В качестве приемлемого компромисса при формулировании технического задания на излучатель, используемый для формирования кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, следует, по-видимому, рассматривать амплитудную неидентичность импульсов в развертке,



**Рис. 2.** Зависимость формы и амплитуды главных максимумов ФВК последовательностей ЛИП, а также формы соответствующих им спектров от параметра  $p$  ( $F_{\text{max}} = 30$  Гц,  $T = 20$  с,  $N = 401$ ):

$a, б$  – нормированные главные максимумы ФВК и соответствующие им нормированные спектры ( $f_{\text{вид}} = 55$  Гц);  $в$  – зависимость амплитуды ФВК от параметра  $p$  (шифр кривых  $f_{\text{вид}}$ );  $г$  – спектр ФВК функции кода ЛИП.

соответствующую значениям параметра  $p \leq 0,16$ . При  $p = 0,16$  амплитуда импульсов в диапазоне частот от 10 до 80 Гц изменяется в  $\approx 1,4$  раза. В этом случае помехоустойчивость метода может снижаться в  $\approx 1,34$  раза для  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц, в  $\approx 1,25$  раза для  $f_{\text{вид}} = 45$  Гц, в  $\approx 1,22$  раза для  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц и в  $\approx 1,18$  раза для  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц.

Анализируя графики, приведенные на рис. 1, *в*, следует обратить внимание на то, что амплитуда главного максимума ФВК при использовании кодоимпульсных сигналов ЛИЧ может существенно возрастать по мере увеличения преобладающей частоты импульсов  $f_{\text{вид}}$ . Физически это связано с тем, что спектр функции кода ЛИЧ имеет наклон, обуславливающий равномерное увеличение спектральной плотности с ростом частоты (см. рис. 1, *з*).

Для последовательностей ЛИП временную функцию, определяющую закон изменения относительной амплитуды кодоимпульсного сигнала в соответствии с условием (1), можно представить следующим образом:

$$A_{\text{имп}}(t) \sim [T_0 + [(T_{N-1} - T_0)/T]t]^p, \quad (6)$$

где  $T_0$  и  $T_{N-1}$  – начальный и конечный периоды следования импульсов.

Заменяя в выражении (6) аргумент  $t$  на аргумент  $t_n$ , соответствующий временному положению импульсов функции кода ЛИП в зависимости от их порядкового номера  $n$ , можно задать относительную амплитуду произвольного импульса в развертке.

Временное положение импульсов  $t_n$  в развертке ЛИП, характеризующейся уменьшением периода следования, определяется, как известно, следующим образом [1]:

$$t_n = nT_0 - n(n-1)\Delta T/2, \quad (7)$$

где  $\Delta T$  – приращение периода следования импульсов. В формуле (7) начальному импульсу присвоен номер “0”.

Заменяя в выражении (6) аргумент  $t$  на  $t_n$  и принимая во внимание выражение (7), можно представить зависимость, определяющую относительную амплитуду импульсов функции кода ЛИП при различных значениях порядкового номера:

$$A_{\text{имп}}(n) \sim [T_0 + [(T_{N-1} - T_0)/T] \times [nT_0 - n(n-1)\Delta T/2]]^p. \quad (8)$$

При моделировании амплитудная неидентичность импульсов формируемой последовательности ЛИП задавалась с использованием выражения (8).

На рис. 2 сопоставлены нормированные главные максимумы ФВК импульсных последовательностей ЛИП (*а*) и соответствующие им спектры (*б*), рассчитанные с учетом амплитудной неидентичности импульсов, определяемой степенной функцией (1). Значения параметра  $p$  при моделировании, так же как и для разверток ЛИЧ, принимались равными 0; 0,16; 0,32, 0,65 и 1,2. Максимальная частота следования импульсов составляла 30 Гц, количество импульсов в развертке – 401, длительность разверток –  $T = 20$  с,  $t_{\text{ск}} = 0$ .

Из рис. 2 видно, что при использовании наиболее эффективной для нефтегазовой сейсморазведки кодоимпульсной последовательности ЛИП ( $F_{\text{max}} = 30 \div 40$  Гц,  $T = 20 \div 30$  с) неидентичность импульсов в развертке, определяемая степенной функцией (1), так же как и для последовательностей ЛИЧ, практически не влияет на форму главного максимума ФВК и соответствующего ей спектра даже при повышенных значениях параметра  $p$ , равных 0,32–0,65. Выполненные расчеты показали, что при значениях параметра  $p \leq 0,65$  неидентичность импульсов в развертке весьма незначительно влияет на уровень помех преобразования и в дальней зоне корреляционной функции (табл. 2).

Следовательно, динамика корреляционных функций для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИП ( $F_{\text{max}} \approx 30$  Гц и  $T = 20 \div 30$  с) практически не искажается при амплитудной неидентичности импульсов в развертке, определяемой степенной функцией (1), при условии  $p \leq 0,65$ , т. е. при  $\approx 2$ -кратном уменьшении амплитуды импульсов в частотном диапазоне 10–30 Гц. Вместе с тем очевидно, что для последовательностей ЛИП, так же как и для кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, уменьшение амплитуды воздействий по мере увеличения частоты следования приведет к снижению помехоустойчивости метода по отношению к некогерентным помехам.

Так, на рис. 2, *в* представлены графики пиковой амплитуды главного максимума ФВК эффективной импульсной последовательности ЛИП в зависимости от параметра  $p$ , рассчитанные для импульсов с различной преобладающей частотой  $f_{\text{вид}}$ . Видно, что при двукратном уменьшении амплитуды импульсов по мере увеличения частоты следования от 10 до 30 Гц, т. е. при  $p = 0,65$ , амплитуда ФВК, а значит, и помехоустойчивость метода, уменьшается в  $\approx 1,36$  раза для  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц, и в  $\approx 1,33$  раза для  $f_{\text{вид}} = 35$ –55 Гц. Скомпенсировать указанное снижение помехоустойчивости метода представляется возможным путем увеличения кратности накопления колебаний на  $\approx 80$  %, что, безусловно, неприемлемо при проведении производственных сейсмических наблюдений.

Таблица 2

Значения динамического диапазона корреляционного преобразования импульсных последовательностей ЛИП в децибелах на временах, кратных 0,5 с, в зависимости от параметра  $p$  ( $F_{\text{max}} = 30$  Гц,  $T = 20$  с,  $N = 401$ ,  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц)

$p$	$\tau = 0,5$ с	1,0 с	1,5 с	2,0 с	2,5 с	3,0 с	3,5 с	4,0 с	4,5 с	5,0 с
0	42,0	50,0	53,0	53,6	52,5	55,8	53,8	54,3	55,3	56,6
0,08	41,9	49,9	52,9	53,6	52,5	55,8	53,8	54,4	55,4	56,7
0,16	41,8	49,8	52,8	53,5	52,5	55,7	53,9	54,5	55,4	56,8
0,32	41,5	49,5	52,6	53,3	52,4	55,7	54,0	54,6	55,5	56,9
0,65	40,8	48,9	52,1	52,9	52,3	55,5	54,1	54,9	55,6	57,2
1,2	39,6	47,7	51,1	52,2	52,0	55,1	54,3	55,3	55,7	57,5
1,8	38,2	46,3	49,9	51,2	51,6	54,6	54,4	55,7	55,8	57,7
2,4	36,8	44,9	48,6	50,3	51,2	54,1	54,4	55,9	55,8	57,8

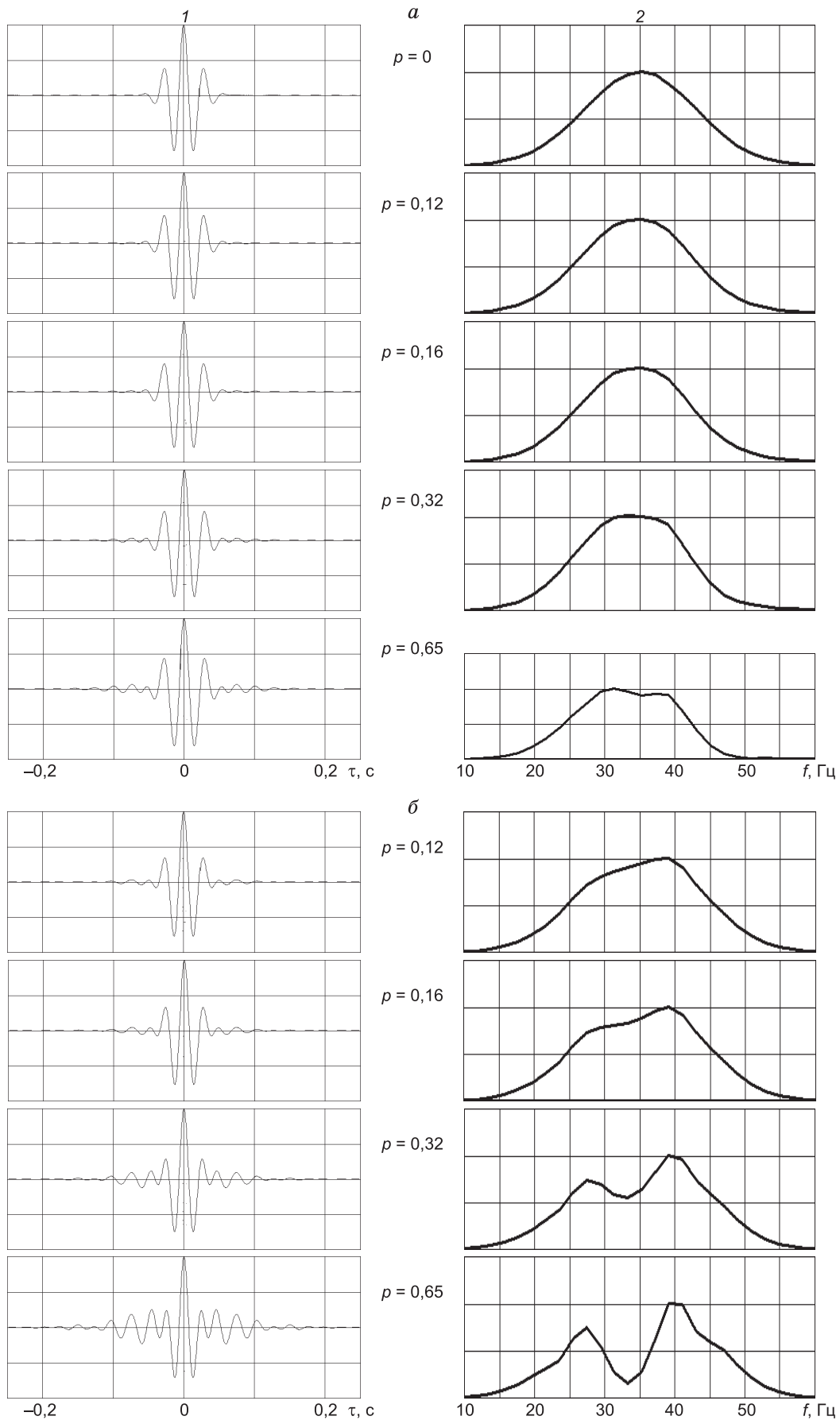
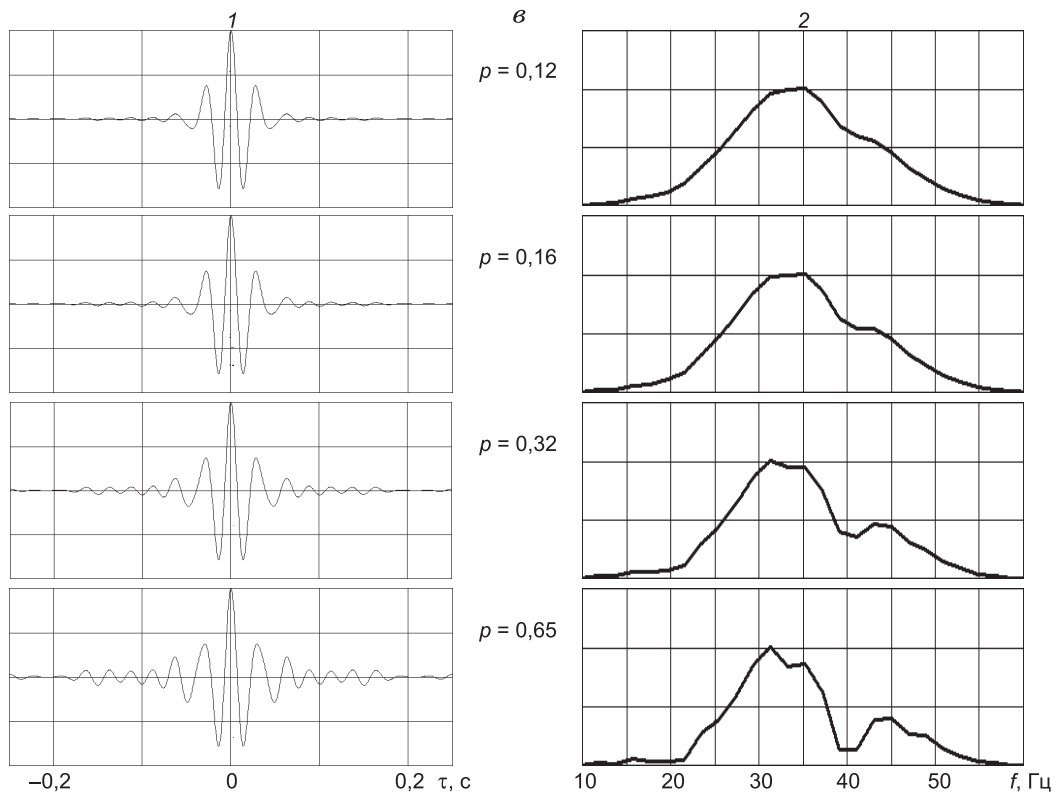


Рис. 3 (начало).



**Рис. 3 (окончание).** Функция взаимной корреляции (1) и амплитудные спектры главных максимумов ФВК (2) двухполярных импульсных дополнительных последовательностей, сформированных путем поочередной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью ( $f_{\text{вид}} = 35$  Гц,  $N = 256$ ):

$a - \tau_0 = 20$  мс;  $b - \tau_0 = 30$  мс;  $в - \tau_0 = 50$  мс.

В качестве приемлемого компромисса для кодоимпульсного излучателя, используемого для формирования последовательностей ЛИП, следует, по-видимому, рассматривать амплитудную неидентичность импульсов в развертке, соответствующую значениям параметра  $p \leq 0,32$ . При  $p = 0,32$  амплитуда импульсов в диапазоне частот от 10 до 30 Гц изменяется в  $\approx 1,4$  раза. В этом случае помехоустойчивость метода может снижаться в  $\approx 1,14$  раза для  $f_{\text{вид}} = 25 \div 55$  Гц.

При сопоставлении графиков, приведенных на рис. 1, в и 2, в, следует отметить, что если амплитуда главного максимума ФВК при использовании кодоимпульсных сигналов ЛИЧ может существенно возрастать по мере увеличения преобладающей частоты импульсов  $f_{\text{вид}}$ , то при использовании разверток ЛИП более высокоамплитудный максимум ФВК формируется для низкочастотного 25-герцового импульса. Физически это связано с тем, что значения спектральной плотности функции кода при увеличении частоты существенно возрастают для разверток ЛИЧ и несколько уменьшаются при использовании последовательностей ЛИП (см. рис. 1, г и 2, г).

Повысить эффективность кодоимпульсного метода можно путем применения двухполярных импульсных последовательностей, позволяющих существенно уменьшить интенсивность корреляционного фона при кодоимпульсном накоплении. Наибольший интерес для сейсморазведки представляют двухполярные дополнительные последовательности, при использовании которых корреляционный фон в идеальной ситуации полностью обнуляется [4].

Импульсные последовательности  $F_n(t)$  и  $'F_n(t)$  называются дополнительными, если им соответствуют функции кода  $K(t)$  и  $'K(t)$ , для которых выполняется условие

$$U_0(\tau) + 'U_0(\tau) = \begin{cases} 2 & \text{при } \tau = 0, \\ 0 & \text{при } \tau = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm (N - 1), \end{cases}$$

где  $U_0(\tau)$  и  $'U_0(\tau)$  – нормированные ФАК функций  $K(t)$  и  $'K(t)$ .

Иными словами, для таких последовательностей сумма ФАК функций кода равна нулю везде, кроме  $\tau = 0$ . При этом каждая функция кода дополнительных последовательностей состоит из одинакового четного числа импульсов Кронекера, следующих через равные интервалы и имеющих амплитуды +1 или -1.

Выше отмечалось, что дополнительные последовательности относятся к классу так называемых двухполярных последовательностей. Вместе с тем используемые в сейсморазведке импульсные излучатели являются излучателями одностороннего действия. Украинскими геофизиками был предложен весьма оригинальный способ, позволяющий формировать двухполярные последовательности излучателями одностороннего действия [5]. В предложенном способе разнополярную последовательность импульсов реализуют односторонними воздействиями за два сеанса. Сначала возбуждается развертка, соответствующая временному закону следования импульсов с положительной полярностью, затем развертка, соответствующая закону следования импульсов с отрицательной полярностью. Вычитая вторую запись из первой, по-

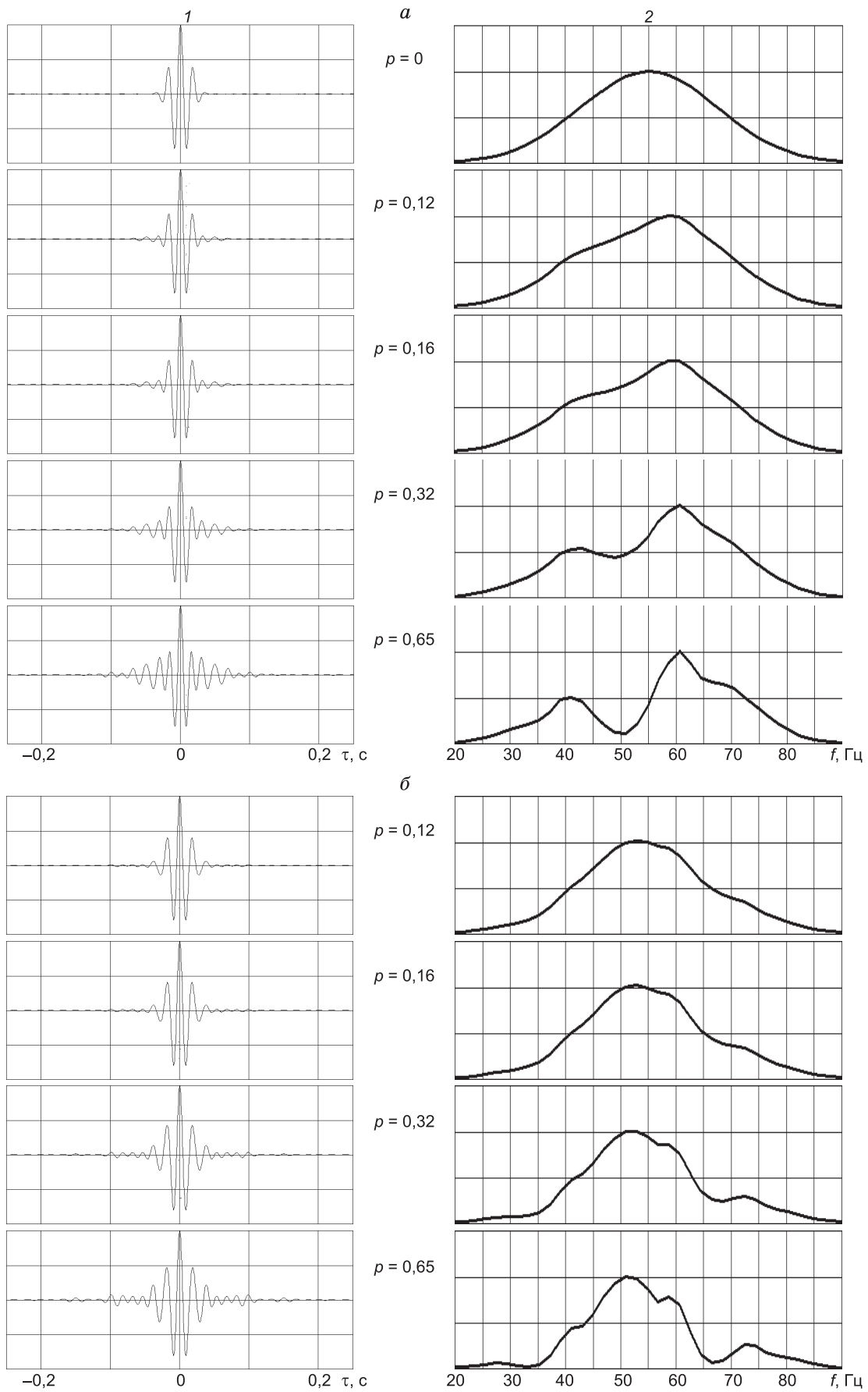
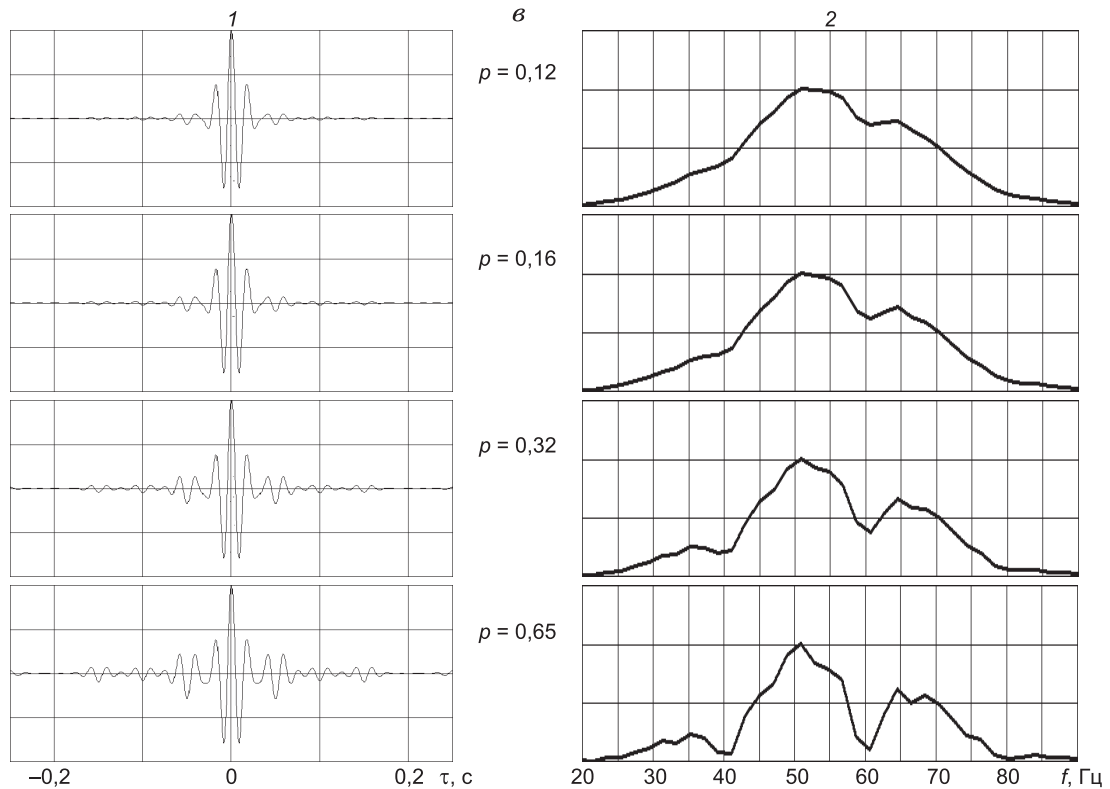


Рис. 4 (начало).





**Рис. 4 (окончание).** Функция взаимной корреляции (1) и амплитудные спектры главных максимумов ФВК (2) двухполярных импульсных дополнительных последовательностей, сформированных путем поочередной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью ( $f_{\text{вид}} = 55$  Гц,  $N = 256$ ):

$a - \tau_0 = 20$  мс;  $b - \tau_0 = 30$  мс;  $c - \tau_0 = 50$  мс.

лучают аналог виброграммы, которая бы регистрировалась при использовании кодоимпульсных излучателей двухстороннего действия силы.

Вместе с тем при отдельной обработке импульсов с положительной и отрицательной полярностью частота следования не остается постоянной, что приводит к амплитудной неидентичности, определяемой зависимостью (1). Так, для дополнительных последовательностей  $\approx 48,8\%$  импульсов следует с частотой  $F = 1/\tau_0$ ;  $\approx 25,2\%$  – с  $F = 1/2\tau_0$ ;  $\approx 12,6\%$  – с  $F = 1/3\tau_0$ ;  $\approx 6,3\%$  – с  $F = 1/4\tau_0$ ;  $\approx 3,1\%$  – с  $F = 1/5\tau_0$ ;  $\approx 1,6\%$  – с  $F = 1/6\tau_0$ ;  $\approx 0,8\%$  – с  $F = 1/7\tau_0$  и 4 импульса имеют нулевую частоту следования. Здесь  $1/\tau_0$  – тактовая частота следования импульсов для двухполярной последовательности. При такой технологии формирования дополнительных последовательностей амплитуда единичных импульсов при моделировании также задавалась в соответствии со степенной функцией (1), т. е.  $A_n \sim [1/(t_n - t_{n-1})]^p$ , где  $n$  – номер импульсов для однополярных разверток, получаемых вследствие отдельной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью.

В случае повышенных значений параметра  $p$  амплитудная неидентичность в двухполярных последовательностях, формируемых путем отдельной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью, может приводить к ухудшению формы ФВК. Анализ возможных искажений корреляционных функций двухполярных последовательностей, связанных с влиянием амплитудной неидентичности импульсов в развертках, выполнен с использованием дополнительных последовательностей  $K(t)$  и  $'K(t)$ ,

каждая из которых включала в себя по 256 импульсов. Функции кода дополнительных последовательностей, выбранных для анализа, приведены ниже:

$K(t) = 111-1111-111111-1-1-111-1111$   
 $1-1111-11-1-1-11111-11111-111-111$   
 $1111-1-1-111-1-1-1-1-11-1-1-11-111$   
 $1-1-1-1-11-11111-1111-111111-1-1-1$   
 $1-11111-1111-11-1-1-11111-11-1-1-1$   
 $1-1-111-1-1-1-1-11111-111111-1111-1$   
 $1-1-1111-11111-11111-111111-11111-1$   
 $11-111111-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1$   
 $1-111111-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1$   
 $11-1-1-1-11111-111-1-1-11-1-11-11$   
 $11-1-1-1-11-11111-1111-111111-1-1-1$   
 $1-1-1-1-11-1-1-11-1-1111-1-1-11-1$

$'K(t) = 111-1111-111111-1-1-111-1111$   
 $1-1111-11-1-1-11111-11111-111-111$   
 $1111-1-1-111-1-1-1-1-11-1-1-11-111$   
 $1-1-1-1-11-11111-1111-111111-1-1-1$   
 $1-11111-1111-11-1-1-11111-11-1-1-1$   
 $1-1-111-1-1-1-1-11111-111111-1111-1$   
 $1-1-1-11111-11111-11111-111111-11111-1$   
 $11-111111-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1$   
 $1111-111111-1111-11-1-1-11111-11111$   
 $1-1111-111111-1-1-1-11-11111-1111-1$   
 $1-1-1-11111-11111-11111-111111-1111-1$   
 $1-1-1-11111-111111-1111-11-1-1-1$   
 $1111-111$

На рис. 3 и 4 представлены главные максимумы ФВК дополнительных последовательностей, фор-

мируемых путем отдельной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью, и соответствующие им амплитудные спектры, рассчитанные при различных значениях параметра  $p$ . При моделировании значения параметра  $p$  изменялись от 0 до 0,65, тактовый период следования импульсов  $\tau_0$  равнялся 20, 30 и 50 мс. Видимая частота импульсов в развертках принималась равной 35 и 55 Гц.

Анализ графиков, представленных на рис. 3 и 4, свидетельствует о том, что с ростом значений параметра  $p$  для дополнительных последовательностей, формируемых путем отдельной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью, наблюдается заметное усиление боковых пульсаций главных максимумов ФВК, что, в свою очередь, обуславливает заметные изменения формы амплитудных спектров корреляционных импульсов. Следует отметить, что при равных значениях параметра  $p$  корреляционные импульсы в большей степени искажаются по мере увеличения тактового периода  $\tau_0$  и с увеличением видимой частоты импульсов  $f_{\text{вид}}$ . Так, если при  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц и  $\tau_0 = 20$  мс диапазон значений  $p$ , при котором главный максимум ФВК дополнительных последовательностей практически не искажается, соответствует условию  $p \leq 0,32$ , то при  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц и  $\tau_0 = 30 \div 50$  мс главный максимум ФВК в основном сохраняет свою форму при условии  $p \leq 0,16$  (см.

рис. 3). Для более высокочастотного единичного импульса с преобладающей частотой 55 Гц главный максимум ФВК практически не искажается при  $\tau_0 = 20 \div 30$  мс, если  $p \leq 0,16$  и при  $\tau_0 = 50$  мс, если  $p \leq 0,12$  (см. рис. 4).

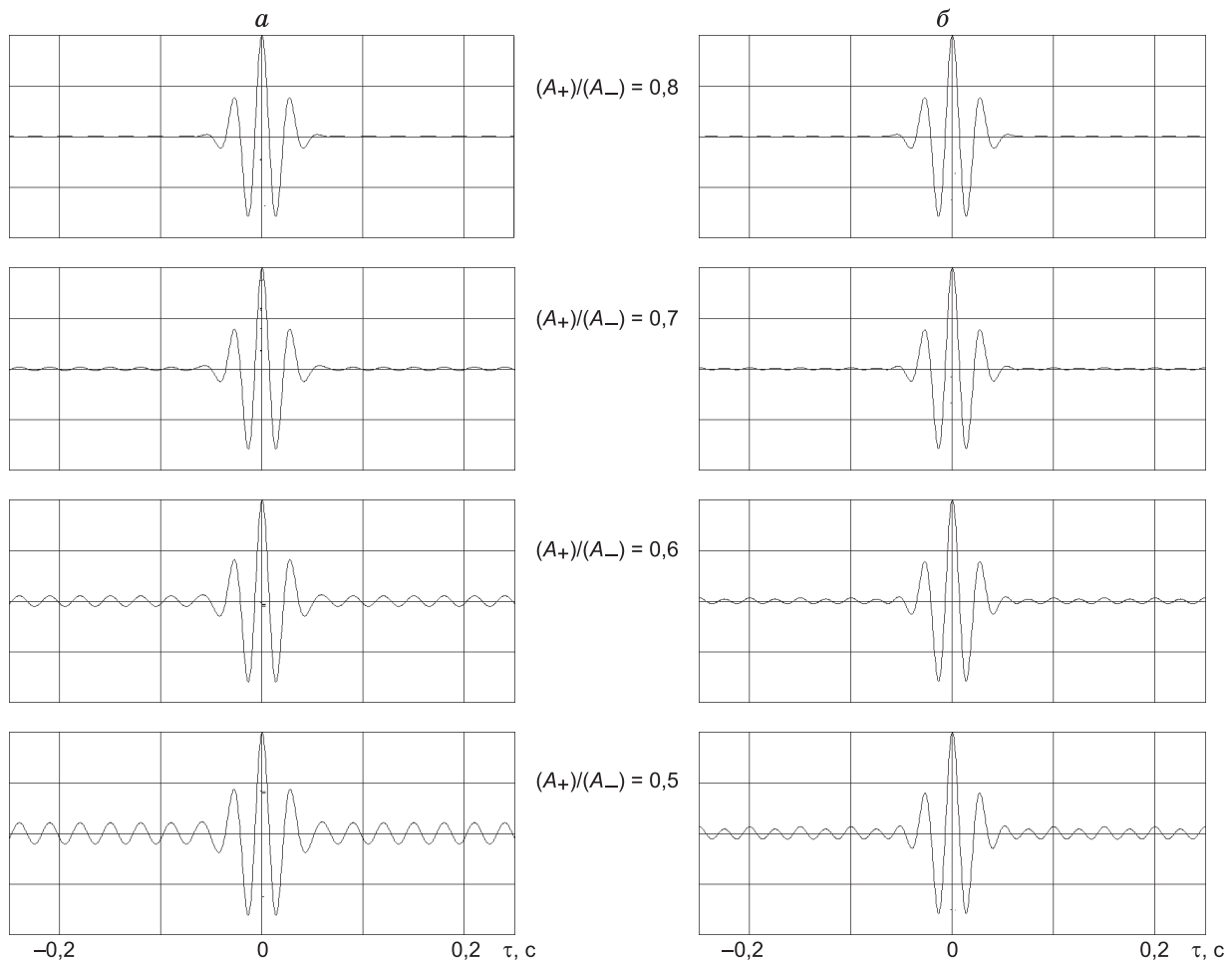
Таким образом, дополнительные последовательности, формируемые путем отдельной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью, отличаются качественной динамикой корреляционных импульсов при  $p \leq 0,12-0,16$ , т. е. при условии, если в частотном диапазоне развертки 10–80 Гц амплитуда импульсов изменяется не более чем в 1,3–1,4 раза или же в частотном диапазоне развертки 10–30 Гц – не более чем в 1,15–1,2 раза. Динамический диапазон корреляционного преобразования в этом случае составляет для указанных разверток в интервале  $\tau = 0,5-5,0$  с не менее 59,41–67,66 дБ (см. табл. 3).

При кодированном накоплении колебаний с использованием дополнительных последовательностей не следует также полностью исключать принципиальную возможность некоторого различия между амплитудами импульсов с положительной и отрицательной полярностью. Подобная модель амплитудной неидентичности импульсов в двухполярных развертках будет в свою очередь приводить к некоторым искажениям корреляционных функций используемых сигналов. Так, на рис. 5 показаны главные максимумы

Таблица 3

Значения динамического диапазона корреляционного преобразования  $D(\tau)$  в децибелах на временах ( $\tau$ ), кратных 0,5 с, для двухполярных дополнительных последовательностей при отдельной обработке импульсов с положительной и отрицательной полярностью

$f_{\text{вид}}$ , Гц	$\tau_0$ , мс	$p$	$\tau = 0,5$ с	1,0 с	1,5 с	2,0 с	2,5 с	3,0 с	3,5 с	4,0 с	4,5 с	5,0 с
35	20	0	303,2	301,3	302,4	301,5	296,0	308,9	307,7	311,9	313,7	–
		0,12	64,1	64,5	64,4	64,6	66,4	308,9	308,0	311,9	313,4	–
		0,16	61,5	62,0	61,8	62,0	63,8	308,8	307,2	312,7	314,4	–
		0,32	55,3	55,6	55,6	55,8	57,5	308,3	307,9	311,8	313,7	–
		0,65	49,0	49,2	49,3	49,4	51,1	308,1	307,7	312,2	314,8	–
	30	0,12	65,7	66,0	66,1	66,1	65,7	66,0	66,0	79,6	330,2	323,5
		0,16	63,1	63,4	63,5	63,5	63,1	63,3	63,4	76,8	329,9	324,1
		0,32	56,7	57,0	57,0	57,1	56,7	56,9	57,0	69,5	330,3	324,0
		0,65	50,3	50,4	50,2	50,5	50,3	50,2	50,6	61,1	328,1	324,3
		50	0,12	62,1	67,8	68,9	68,5	68,2	67,7	68,7	68,0	67,7
	0,16		59,4	65,3	66,3	65,9	65,5	65,1	66,1	65,4	65,1	65,8
	0,32		52,7	59,1	59,9	59,4	59,1	58,8	59,8	59,0	58,7	59,6
0,65	45,7		53,3	53,0	52,5	52,4	52,5	53,3	52,5	52,3	53,7	
50	20		0	319,1	323,5	319,8	326,2	329,0	330,2	328,9	332,5	335,9
		0,12	66,3	66,3	66,4	65,9	68,7	331,4	328,8	332,4	335,6	–
		0,16	63,7	63,6	63,8	63,3	66,0	331,2	328,8	332,8	336,2	–
		0,32	57,4	57,1	57,4	56,9	59,7	330,5	328,1	333,1	334,6	–
		0,65	51,1	50,3	51,1	50,3	53,2	328,5	327,4	330,8	335,6	–
	30	0,12	67,7	68,4	68,0	68,1	67,7	68,1	67,9	74,2	317,3	297,6
		0,16	65,0	65,8	65,3	65,4	65,0	65,5	65,3	71,6	317,2	297,6
		0,32	58,6	59,3	58,8	59,0	58,6	59,1	58,9	64,9	316,5	297,4
		0,65	52,2	52,7	52,1	52,3	52,1	52,5	52,3	58,2	316,8	296,9
		50	0,12	64,0	69,8	70,9	70,5	70,1	69,7	70,7	70,0	69,7
	0,16		61,3	67,2	68,3	67,9	67,5	67,1	68,1	67,4	67,1	67,8
	0,32		54,6	61,1	61,8	61,4	61,0	60,8	61,8	61,0	60,7	61,6
0,65	47,6		55,3	55,0	54,5	54,3	54,5	55,3	54,4	54,2	55,6	



**Рис. 5.** Главные максимумы ФVK дополнительных последовательностей, сформированных при различных соотношениях между амплитудами импульсов с положительной ( $A_+$ ) и отрицательной ( $A_-$ ) полярностью ( $f_{\text{вид}} = 35$  Гц,  $N = 256$ ):  
 $a - \tau_0 = 30$  мс;  $b - \tau_0 = 50$  мс.

мы ФVK дополнительных последовательностей, рассчитанные при различных соотношениях амплитуд импульсов с положительной ( $A_+$ ) и отрицательной ( $A_-$ ) полярностью. Анализируя рис. 5, видно, что даже при условии  $(A_+)/ (A_-) = 0,7$  искажения главного максимума ФVK дополнительной последовательности крайне незначительны. Однако в этом случае значения динамического диапазона корреляционного преобразования сигнала становятся существенно меньшими по сравнению с аналогичными значениями для

эффективных однополярных кодов ЛИЧ и ЛИП [2], что по существу исключает одно из основных преимуществ двухполярных дополнительных последовательностей. Высокую эффективность применения дополнительных последовательностей можно обеспечить уже при условии  $(A_+)/ (A_-) = 0,8$ . В этом случае динамический диапазон  $D(\tau)$  для дополнительных последовательностей на 10–26 дБ превышает аналогичные значения для однополярных последовательностей ЛИЧ (табл. 4).

Таблица 4

**Значения динамического диапазона корреляционного преобразования в децибелах на временах ( $\tau$ ), кратных 0,5 с, для двухполярных дополнительных последовательностей при различных соотношениях между амплитудами импульсов с положительной ( $A_+$ ) и отрицательной ( $A_-$ ) полярностью ( $f_{\text{вид}} = 35$  Гц,  $N = 256$ )**

$\tau_0$ , мс	$(A_+)/ (A_-)$	$\tau = 0,5$ с	1,0 с	1,5 с	2,0 с	2,5 с	3,0 с	3,5 с	4,0 с	4,5 с	5,0 с
30	0,80	65,6	57,4	55,9	63,2	62,2	56,6	56,2	61,2	61,8	52,0
	0,70	37,8	37,6	38,2	40,3	40,0	42,9	45,8	45,7	45,2	59,4
	0,60	28,7	29,0	29,6	31,0	31,2	33,2	34,9	35,5	36,0	41,6
	0,50	22,7	23,1	23,8	24,9	25,3	26,9	28,3	29,1	29,9	33,7
50	0,80	70,9	70,4	68,3	58,5	64,2	67,9	69,6	68,5	67,0	65,5
	0,70	43,6	43,7	44,0	42,4	44,2	46,4	45,9	45,8	46,0	48,5
	0,60	34,2	34,5	34,8	34,2	35,4	36,6	36,6	36,8	37,2	38,7
	0,50	28,0	28,3	28,6	28,4	29,3	30,2	30,4	30,7	31,1	32,2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Динамика корреляционных функций для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ ( $F_{\max} \approx 80$  Гц и  $T = 20 \div 30$  с) практически не искажается при амплитудной неидентичности импульсов в развертке, определяемой степенной функцией (1), при условии  $p \leq 0,32$ , т. е. при двукратном уменьшении амплитуды импульсов в частотном диапазоне 10–80 Гц. Вместе с тем уменьшение амплитуды возбуждаемых импульсов по мере увеличения частоты следования приводит к снижению помехоустойчивости метода по отношению к некогерентным помехам. Так, при  $p = 0,32$  амплитуда ФВК для эффективных последовательностей ЛИЧ, а значит, и помехоустойчивость метода, уменьшается в 1,43–1,78 раза в зависимости от преобладающей частоты импульсов  $f_{\text{вид}}$ . Скомпенсировать указанное снижение помехоустойчивости метода представляется возможным либо путем увеличения числа излучателей в группе в  $\approx 1,5$  раза либо за счет  $\approx 2$ -кратного увеличения числа воздействий, что приведет к существенным экономическим потерям при проведении полевых работ.

2. В качестве приемлемого компромисса при формулировании технического задания на излучатель, используемый для формирования кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, следует, по-видимому, рассматривать амплитудную неидентичность импульсов в развертке, соответствующую значениям параметра  $p \leq 0,16$ . При  $p = 0,16$  амплитуда импульсов в диапазоне частот от 10 до 80 Гц изменяется в  $\approx 1,4$  раза. В этом случае помехоустойчивость метода может снижаться в  $\approx 1,34$  раза для  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц, в  $\approx 1,25$  раза для  $f_{\text{вид}} = 45$  Гц, в  $\approx 1,22$  раза для  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц и в  $\approx 1,18$  раза для  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц.

3. Динамика корреляционных функций для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИП ( $F_{\max} \approx 30$  Гц и  $T = 20 \div 30$  с) практически не искажается при амплитудной неидентичности импульсов в развертке, определяемой степенной функцией (1), при условии  $p \leq 0,65$ , т. е. при  $\approx 2$ -кратном уменьшении амплитуды импульсов в частотном диапазоне 10–30 Гц. Вместе с тем при  $p = 0,65$  уменьшение амплитуды воздействий по мере увеличения частоты следования приведет при использовании эффективных последовательностей ЛИП к снижению помехоустойчивости метода по отношению к некогерентным помехам в  $\approx 1,36$  раза для  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц и в  $\approx 1,33$  раза для  $f_{\text{вид}} = 35$ –55 Гц. Скомпенсировать указанное снижение помехоустойчивости метода представляется возможным путем увеличения кратности накопления колебаний на  $\approx 80$  %, что заметно ухудшит экономические показатели выполняемых наблюдений.

4. В качестве более приемлемого требования к кодоимпульсному излучателю, используемому для формирования последовательностей ЛИП, следует, по-видимому, рассматривать амплитудную неидентичность импульсов в развертке, соответствующую значениям параметра  $p \leq 0,32$ . При  $p = 0,32$  амплитуда импульсов в диапазоне частот от 10 до 30 Гц изменяется в  $\approx 1,4$  раза. В этом случае помехоустойчивость метода может снижаться в  $\approx 1,14$  раза для  $f_{\text{вид}} = 25$ –55 Гц.

5. Дополнительные последовательности, формируемые путем отдельной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью, отличаются качественной динамикой корреляционных импульсов при  $p \leq 0,12$ –0,16, т. е. при условии, если в частотном диапазоне развертки 10–80 Гц амплитуда импульсов изменяется не более чем в 1,3–1,4 раза, или же в частотном диапазоне развертки 10–30 Гц – не более чем в 1,15–1,2 раза. Динамический диапазон корреляционного преобразования в этом случае составляет для указанных разверток в интервале  $\tau = 0,5$ –5,0 с не менее 59,41–67,66 дБ.

6. Для дополнительных последовательностей при соотношении амплитуд импульсов с положительной и отрицательной полярностью  $(A_+)/(-A_-) = 0,7$  искажения главного максимума ФВК крайне незначительны. Однако значения динамического диапазона корреляционного преобразования сигнала становятся существенно меньшими по сравнению с аналогичными значениями для эффективных однополярных кодов ЛИЧ и ЛИП. Высокую эффективность применения дополнительных последовательностей можно обеспечить уже при условии  $(A_+)/(-A_-) = 0,8$ . В этом случае динамический диапазон  $D(\tau)$  для дополнительных последовательностей на 10–26 дБ превышает аналогичные значения для однополярных последовательностей ЛИЧ.

## Литература

1. Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А. Оценка возможности повышения эффективности кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний с использованием однополярных кодов ЛИЧ путем увеличения длительности и максимальной частоты разверток // Технологии сейсморазведки. 2010. № 3. С. 110–114.
2. Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А. Сравнительный анализ эффективности кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний при использовании однополярных кодов ЛИЧ и ЛИП // Технологии сейсморазведки. 2010. № 4. С. 46–52.
3. Кострыгин Ю.П. Сейсморазведка на сложных сигналах. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2002. 416 с.
4. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. М.: Сов. радио, 1970. 376 с.
5. Роман В.И., Шпортюк Г.А., Михайличенко О.Г., Королук П.А. Перспективы применения дополнительных последовательностей импульсов в невзрывных методах сейсморазведки, ГСЗ и сейсмологии // Современные геодинамические процессы и их изучение в связи с проблемой прогноза землетрясений. Киев: Наук. думка, 1986. С. 22–26.

## РЕЦЕНЗИЯ НА СТАТЬЮ Ю.П. КОСТРЫГИНА И Д.А. КОЛЕСНИКОВА “ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АМПЛИТУДНОЙ НЕИДЕНТИЧНОСТИ ИМПУЛЬСОВ В РАЗВЕРТКАХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОДОИМПУЛЬСНОГО НАКАПЛИВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ”

Работа посвящена исследованию корреляционных шумов кодоимпульсного метода, чему уже было посвящено множество предыдущих статей авторов.

Как следует из преамбулы статьи, все, что до сих пор исследовалось авторами по кодоимпульсным источникам, сводилось к идеальному варианту, т. е. весьма отдаленно относящемуся к реальным источникам. Единственная ссылка на реальный источник касается степенного закона убывания амплитуды с уменьшением периода. И теперь с учетом этого факта исследование повторяется. Но кроме амплитуды, должна, очевидно, меняться еще и частотная характеристика импульса. По-видимому, это будет следующим этапом работы. Пока что в качестве импульсной характеристики источника авторы берут искусственно построенный импульс в виде косинусоиды фиксированной частоты с гауссовой огибающей.

Название статьи вводит в заблуждение, поскольку к помехоустойчивости в общепринятом понимании (по отношению к внешним помехам) задача статьи никакого отношения не имеет.

Теперь о некоторых деталях. Рассмотрим одно из утверждений авторов (цитата):

**“Из рис. 1 следует, что при использовании наиболее эффективной для нефтегазовой сейсморазведки кодоимпульсной последовательности ЛИЧ ( $F_{\max} = 80$  Гц,  $T = 20 \div 30$  с) неидентичность импульсов в развертке, определяемая степенной функцией (1), практически не влияет на форму главного максимума ФВК и форму соответствующего ему спектра даже при повышенных значениях параметра  $p$ , равных 0,32–0,65.”**

Для того чтобы обосновать этот вывод, авторы приводят обширный рисунок с пятью коррелограммами и спектрами, тогда как для такого вывода вообще не нужно даже было проводить вычисления. Достаточно было написать и посмотреть на формулы вычисления коррелограмм через комплексные спектры. Опорный сигнал, по словам авторов, состоит из импульсов Кронекера, что для непрерывного случая является эквивалентом дельта-функций. Спектр дельта-функции по модулю неограниченно плоский. Следовательно, спектр произведения спектров виброграммы и комплексно-сопряженной опоры полностью сохраняет все частотные компоненты виброграммы. Поэтому этот вывод справедлив не только для “**кодоимпульсной последовательности ЛИЧ ( $F_{\max} = 80$  Гц,  $T = 20 \div 30$  с)**”, но и вообще для всех физически осуществимых разверток такого типа.

Совершенно то же самое можно сказать и про рис. 2 и соответствующий ему вывод.

Теперь обратимся ко второй части работы с псевдослучайным кодированием.

Из текста и ссылок статьи можно решить, что дополнительные последовательности открыты цитируемой работой Романа и др. Вероятно, это не так. Упомянутые авторы первыми предложили их применить, а кто открыл их свойства? Было бы полезно сослаться на первоисточник. Спасибо авторам статьи, что они привели полную запись одной из пар таких последовательностей. Это позволило рецензенту независимо проверить выводы авторов.

Действительно, суммарная автокорреляция таких последовательностей в виде любых импульсов идентичной формы идеальна: корреляционный шум равен нулю. Но ведь на практике корреляция выполняется между реальной виброграммой и некоторым опорным сигналом. Их спектры всегда различаются. В виброграмме участвует еще и фильтр источника, неизвестный фильтр среды, сейсмоприемника и аппаратурного тракта. Как показали вычисления рецензента, даже весьма шадящая фильтрация виброграммы сразу повышает корреляционный шум до  $-27$  дБ. И это без учета зависимости  $F^p$ .

Далее, если при непрерывном изменении периода или частоты эту экспериментальную зависимость  $F^p$  достаточно просто учесть, то при псевдослучайной (кодоимпульсной) развертке такая задача нетривиальна. Из текста же статьи неясно, каким образом учтен этот закон при “прыгающем” периоде разделенных на плюс/минус последовательностей. А что касается результирующих оценок корреляционного шума хотя бы до  $-60$  дБ (авторы указывают значения 59,41–67,66 дБ), то это очень сильно не подтверждается вышеупомянутым нашим расчетом по исходным данным авторов статьи.

Общий вывод по работе такой. Если авторы не могут выявить общие закономерности, которые можно рассматривать как значимый научный результат, а углубляются в перечисление “если..., то...”, то такую работу следует рассматривать лишь как рабочий журнал численного эксперимента с комментариями на полях.

Статья требует значительной доработки и не может быть опубликована в журнале в настоящем виде.

*Доктор технических наук В.И. Юшин*

## ОТВЕТЫ АВТОРОВ НА РЕЦЕНЗИЮ В.И. ЮШИНА

1. Можно согласиться с высказыванием В.И. Юшина о том, что “спектр произведения спектров виброграммы и опорного сигнала, состоящего из последовательности импульсов Кронекера, полностью сохранит все частотные компоненты виброграммы”. Однако здесь надо иметь в виду, что спектр самой виброграммы может в определенной степени изменяться в зависимости от характера амплитудной неидентичности импульсов в развертке, так как комплексный спектр виброграммы определяется произведением комплексных спектров единичного импульса последовательности и функции кода, регистрируемой импульсной последовательности, зависящей от амплитудной неидентичности. В этой связи, вследствие амплитудной неидентичности, может меняться и динамика корреляционных функций кодоимпульсных сигналов. Так, из рис. 2 данной статьи можно видеть, что по мере увеличения неидентичности в соответствии со степенной функцией  $A_{\text{имп}} = k \cdot F^{-p}$  для импульсных последовательностей с линейным изменением периода следования в ближней зоне ФВК происходит заметное усиление побочных пульсаций, т. е. динамика корреляционных функций импульсных последовательностей, безусловно, зависит от амплитудной неидентичности импульсов в развертке. В этой связи нельзя согласиться с мнением рецензента о том, что спектр главного максимума ФВК импульсной последовательности не зависит от степени неидентичности импульсов в развертке.

2. В.И. Юшин в своей рецензии делает следующее замечание: “Из текста и ссылок статьи можно решить, что дополнительные последовательности открыты цитируемой работой [5]”. На самом деле в статье приведено следующее предложение: “Украинскими геофизиками был предложен весьма оригинальный способ, позволяющий формировать двухполярные последовательности излучателями одностороннего действия [5].” Т. е. украинские специалисты не открыли дополнительные последовательности, а предложили и использовали на практике весьма оригинальный способ, позволяющий реализовывать разнополярные последовательности излучателями одностороннего действия.

3. В.И. Юшин отмечает, что «из текста статьи неясно, каким образом учтена амплитудная неидентичность при “прыгающем” периоде разделенных на плюс/минус дополнительных последовательностей». Для уточнения этого вопроса авторы дополнили статью следующим предложением: “При такой технологии формирования дополнительных последовательностей амплитуда единичных импульсов при моделировании также задавалась в соответствии со степенной функцией (1), т. е.  $A_n \sim [1/(t_n - t_{n-1})]^{-p}$ , где  $n$  – номер импульсов для однополярных разверток, получаемых

вследствие отдельной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью”.

4. В.И. Юшин соглашается с тем, что суммарная автокорреляция дополнительных последовательностей в виде любых импульсов идентичной формы обнуляет корреляционный фон и является поэтому идеальной. Однако, как отмечает рецензент, на практике на спектральный состав единичных импульсов оказывают влияние фильтр источника, неизвестный фильтр среды, сейсмоприемника и аппаратного тракта. В связи с указанным замечанием следует отметить, что каждый из перечисленных рецензентом фильтров оказывает строго одинаковое влияние на любой импульс в развертке. Поэтому все импульсы в изначально идеальной развертке так и остаются строго одинаковыми друг другу по форме и по амплитуде. Следует также отметить, что силовой импульс, формируемый импульсным индукционно-динамическим излучателем, приближается к единичному импульсу, поэтому модельный импульс, использованный для моделирования импульсной последовательности, аппроксимирует по существу совокупную импульсную реакцию системы излучатель–грунт, геологической среды и регистрирующей аппаратуры. Т. е. в данном случае модельный импульс априорно включает в себя все те искажения, о которых рассуждал рецензент.

И единственным обстоятельством, которое и обуславливает неидентичность динамики импульсов в развертке, является лишь то, что амплитуда возбуждаемых излучателем импульсов уменьшается по мере увеличения частоты следования. Поэтому исследованию именно этого весьма важного вопроса и посвящена данная статья.

5. Основной вывод, который рецензент делает по статье, сводится к следующему: «Если авторы не могут выявить общие закономерности, которые можно рассматривать как значимый научный результат, а углубляются в перечисление “если..., то...” , то такую работу следует рассматривать лишь как рабочий журнал численного эксперимента с комментариями на полях». В связи с этим следует отметить, что наиболее сложная и трудно решаемая техническая проблема при разработке кодоимпульсных излучателей связана именно с уменьшением амплитуды воздействия по мере увеличения частоты следования импульсов. Указанное явление по существу ограничивает максимальную частоту разверток, снижая реальные возможности метода. Поэтому с точки зрения разработчиков кодоимпульсных излучателей оценка влияния неидентичности импульсов в развертках на фактическую эффективность метода представляется чрезвычайно важной и позволяет, как минимум, грамотно сформулировать техническое задание на разработку кодоимпульсных излучателей.

*Доктор технических наук Ю.П. Кострыгин,  
Д.А. Колесников*

## ОТВЕТ РЕЦЕНЗЕНТА НА ВОЗРАЖЕНИЯ АВТОРОВ СТАТЬИ (КОСТРЫГИН Ю.П., КОЛЕСНИКОВ Д.А. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АМПЛИТУДНОЙ НЕИДЕНТИЧНОСТИ ИМПУЛЬСОВ В РАЗВЕРТКАХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОДОИМПУЛЬСНОГО НАКАПЛИВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ)

1. Согласно словесной модели авторов, “Кодоимпульсные последовательности были составлены из импульсов с колокольной огибающей; при этом соблюдалось условие  $\beta/f_{\text{вид}} = 1$ , где  $\beta$  – коэффициент затухания импульса;  $f_{\text{вид}}$  – видимая частота импульсов, равная в данном случае 55 Гц.” Из этого авторского пояснения следует, что форма каждого импульса в одном эксперименте не зависела от мгновенной частоты или периода “стуков”. Вдоль последовательности менялась только амплитуда этих “колокольных” импульсов. Поскольку каждый удар авторы моделируют дельта-функцией, то спектр виброграммы заведомо представляет собой суперпозицию идентичных по форме, но разных лишь по амплитуде и задержке спектров, т. е. должен повторять по форме спектр этой самой колокольной функции. Если у авторов статьи вычисления показали нечто иное, то это означает, что в действительности они исследовали не ту модель сигнала, которую описывают в статье, а какую-то другую. Именно поэтому рецензент настаивает на том, что постановка задачи должна быть исчерпывающей, допускающей независимую проверку результата. В представленной же постановке исследовать просто нечего, а полученный результат, если он отличается от тривиального (выход равен входу), заведомо ошибочен.

Можно, конечно, высказать догадку, что авторы, сами того не подозревая, исследовали влияние частоты дискретизации на результат корреляции (поскольку здесь лежит разница между дельта-функцией и импульсом Кронекера), но это уже тема совсем другой статьи.

2. К замечанию авторов (п. 4).

То, что все импульсы в виброграмме получают одинаковые искажения в среде, очевидно. Обратного рецензент и не утверждал. Речь шла о том, что опорный сигнал перед корреляцией не сможет получить точно таких же искажений, поскольку они неизвестны, что сводит на нет замечательные свойства дополнительных последовательностей. Повторю фразу из рецензии: “Как показали вычисления рецензента,

даже весьма щадящая фильтрация виброграммы (то есть, не трогая опорных сигналов) сразу повышает корреляционный шум до  $-27$  дБ”.

3. Термин “эффективность” еще менее конкретен, чем “помехоустойчивость”. Он обязательно потребует расшифровки, в результате чего выяснится, что речь идет, как и в предыдущих статьях, о корреляционных шумах.

Я согласен с тем, что кодоимпульсные источники могут оказаться экономически эффективными. Я могу согласиться с тем, что в реальной ситуации спектр коррелограмм будет сильно зависеть от динамических характеристик реального источника. Но я решительно не могу понять, как авторы смогли получить свои результаты именно в той постановке задачи, которую они изложили в статье. В этой постановке я просто не вижу того звена, которое ответственно за спектр коррелограммы. Для меня это эквивалентно опровержению теории невозможности вечного двигателя.

Я утверждаю, что свертка любой последовательности дельта-функций (независимо от того, каких они амплитуд, знаков и расположений на оси времени) с весовой функцией стационарного линейного фильтра будет иметь амплитудный спектр (после сглаживания по частоте от интерференционных провалов-выбросов), пропорциональный амплитудно-частотной характеристике этого самого фильтра. Коррелограмма естественным образом устраняет интерференцию, и ее спектру такое сглаживание не требуется. Ее спектр просто идентичен АЧХ фильтра!

Предвижу возможный встречный вопрос: “Почему же при обычном (синусном) свипе наблюдается частотная зависимость?” Потому что там каждое колебание имеет свой собственный спектр. Но возьмите этот свип-сигнал, клиппируйте, а затем продифференцируйте его. Проведите спектральный анализ. От исходного красивого прямоугольного спектра вашего свипа не останется и следа. Он протянется до частоты Найквиста.

Доктор технических наук В.И. Юшин