



Столыпинский  
вестник

Научная статья

Original article

УДК 62

**МЕТОДЫ ПРИЕМА И СИНХРОНИЗАЦИИ СИГНАЛОВ  
АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ  
METHODS OF RECEIVING AND SYNCHRONIZING SIGNALS  
AUTOMATIC LOCOMOTIVE SIGNALLING**

**Ван Саньюй**, магистрант, Российский университет транспорта (МИИТ),  
г.Москва

**Wang Qingyu**, Master's student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow

**Аннотация:** Необходимость решения проблем обусловлена требованием качественного улучшения надежности приема кодов, а как следствие и пропускной способности существующих линий. В первую очередь это относится к существенному повышению качества приема и обработки информационных потоков из рельсовых линий. Сегодня сложно представить организацию движения подвижного состава без опоры на системы автоблокировки со вторичным уплотнением тональных рельсовых цепей сигналами частотной модуляции или автоматическую локомотивную сигнализацию без использования многозначной автоматический локомотивной сигнализации с фазоразностной модуляцией. С учетом объективного факта помехоэмиссии от работы энергоемкого железнодорожного оборудования и современных локомотивов вопросы

надежности и помехоустойчивости приема дискретной информации (в т. ч. сигналов традиционной автоматической локомотивной сигнализации) становятся все более актуальными. Анализ причин снижения надежности и помехоустойчивости систем железнодорожной автоматики и телемеханики (а следовательно, безопасности движения) также выходит на передний план.

**Abstract:** The need to solve problems is due to the requirement of qualitative improvement of the reliability of receiving codes, and as a consequence, the capacity of existing lines. First of all, this refers to a significant improvement in the quality of receiving and processing information flows from rail lines. Today it is difficult to imagine the organization of rolling stock movement without relying on auto-locking systems with secondary sealing of tone rail circuits with frequency modulation signals or automatic locomotive signaling without the use of multi-valued automatic locomotive signaling with phase difference modulation. Taking into account the objective fact of interference emission from the operation of energy-intensive railway equipment and modern locomotives, issues of reliability and noise immunity of receiving discrete information (including signals of traditional automatic locomotive signaling) are becoming more and more relevant. The analysis of the reasons for the decrease in reliability and noise immunity of railway automation and telemechanics systems (and, consequently, traffic safety) also comes to the fore.

**Ключевые слова:** Безопасность движения, перевозочный процесс, информационные системы, бортовые и напольные устройства безопасности, микропроцессорные устройства, управление рисками.

**Keywords:** Traffic safety, transportation process, information systems, on-board and floor safety devices, microprocessor devices, risk management.

Традиционные рельсовые каналы передачи сигналов автоматической локомотивной сигнализации, которые эксплуатируются уже более 70 лет, занимают диапазон частот до 100 Гц. Каждый из них используется для передачи трех кодов АЛСН методом амплитудной манипуляции на несущих

частотах 25, 50 или 75 Гц в зависимости от рода тяги. Последующие информационные каналы размещаются между гармониками промышленной сети выше по частоте и имеют присвоенные значения частот, численно равные:

$$f_n = 50n + 25, \quad (1)$$

где  $n = 2, 3 \dots N$  — номер гармоники промышленной сети 50 Гц.

Опыт применения на Октябрьской железной дороге многочастотной АЛСЧ с передачей 10 команд по числу сочетаний двух из пяти непрерывных тональных частот в диапазоне 125–425 Гц не решил проблему увеличения значности и помехоустойчивости АЛС. Переход к угловым методам модуляции во многом изменил ситуацию. Сейчас в полосе канала с присвоенной частотой 175 Гц передается до 256 кодовых комбинаций АЛС-ЕН с помощью двукратной фазоразностной манипуляции (QPSK — Quadrature Phase Shift Keying) со скоростью около 10,9 Бод. Остальные частотные каналы пока используются для нужд контроля состояния рельсовых линий в системах автоблокировки различного поколения. В ЦАБ-АЛСО (ТРЦ-3) — пять каналов с амплитудной манипуляцией на частотах 420, 480, 580, 720 и 780 Гц. В системе АБТЦ-МШ — 10 каналов диапазона 425–875 Гц, но с возможностью параллельной передачи на поезд дополнительной информации методом частотной манипуляции (FSK — Frequency Shift Keying) без разрыва фазы сигнала. Таким образом, повышение помехоустойчивости приема сигналов по рельсовым каналам остается актуальной задачей. В этой связи следует признать, что технические решения, ранее реализованные при создании действующей каналобразующей аппаратуры АЛС-ЕН, требуют обстоятельного анализа и коррекции с учетом перспективы дальнейшего развития и совершенствования подобных низкоскоростных железнодорожных систем передачи информации на движущийся поезд.

## 1. Особенности условий работы рельсовых каналов связи на примере передачи сигналов АЛС-ЕН

Расчетная ширина полосы рельсовых каналов ограничена интервалом следования гармоник сети, она уменьшается по мере увеличения номера гармоники и в пределе составляет

$$\Delta f_n = |50 - \delta(1 + 2n)| \cdot K_{\text{ПР}}^{-1}, \quad (2)$$

где  $\delta$  — нестабильность частоты сети электроснабжения, Гц;  $K_{\text{ПР}}$  — коэффициент прямоугольности избирательного тракта.

В общем случае реальная рабочая ширина полосы будет несколько уже [EN 50160:2010]. Это связано с необходимостью обеспечить дополнительный запас селекции от воздействия гармоник сети, располагаемых непосредственно на границах рабочей полосы. Еще одна причина — технические трудности при реализации стабильных амплитудно-частотных (АЧХ) и фазово-частотных (ФЧХ) характеристик избирательных систем станционных передающих и главным образом локомотивных приемных устройств, особенно при коэффициентах прямоугольности  $K_{\text{ПР}} \leq 2$ . Следует учитывать и меры по исключению комбинационных частот и интергармоник, которые могут возникнуть при одновременной работе нескольких каналов передачи и нелинейных преобразований тягового тока [ГОСТ 32144–2013] [1].

Для рационального использования рабочей полосы границы частотной характеристики приемо-передающего тракта должны располагаться симметрично относительно несущей частоты сигнала, которая при расчете и реализации избирательной системы должна соответствовать среднегеометрической величине произведения крайних значений частот канала или соседних гармоник [2]. Это позволяет передать и принять без искажения обе боковые частоты манипуляции и минимизировать паразитные переходные процессы, возникающие из-за отличия резонанса избирательной системы и несущей частоты сигнала. Схема построения и параметры элементов  $L$ ,  $C$ ,  $r$  избирательной системы определяют ее коэффициент затухания  $a = r/2L$ , длительность процессов установления выходного сигнала и собственную резонансную частоту, в общем случае отличающуюся от расчетной величины [1]:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{(LC)^{-1} - a^2} = \omega_0 \sqrt{1 - (2Q)^{-2}}. \quad (3)$$

В качестве примера в таблице приведены расчетные значения рабочей полосы и средней частоты некоторых рельсовых каналов связи из ряда (1), селективные свойства которых на приеме могут быть реализованы, по меньшей мере, эллиптическими системами Золотарёва-Кауэра не ниже пятого порядка с необходимым подавлением ближайших гармоник сети на 50–60 дБ [2–7].

**Таблица.** Расчетные значения рабочей полосы и средней частоты рельсовых каналов связи

Номер канала по гармонике сети, Гц	3	5	7	9	11	13	15	17
Частота канала присвоенная, Гц	175	275	375	475	575	675	775	875
Частота канала средняя $f_0$ , Гц	173,2	273,8	374,1	474,3	574,4	674,5	774,6	874,6
Полоса канала расчетная $\Delta f$ , Гц $n$	23,6	22,8	22,0	21,2	20,4	19,6	18,8	18,0

Сужение полосы ставит эти каналы в неравные условия по уровню потерь сигнала до 2–3 дБ, и в случае построения универсальной многочастотной аппаратуры локомотивной сигнализации канал с меньшим номером всегда будет иметь худшее отношение сигнал/помеха на приеме по сравнению с последующим, который будет определять предельную скорость передачи в системе. Расширение полосы по сравнению с данными таблицы может быть достигнуто за счет уменьшения коэффициента прямоугольности,

усложнения схемы фильтра на приемной стороне и снижения требований к избирательности на 15–20 дБ. Но это возможно лишь для каналов с номерами более 9–11, для которых уровень ближайших гармоник сети снижается с 25–30 % до 3–5 % от величины тягового тока [4, 7–9].

Дополнительным фактором снижения отношения сигнал/помеха будет наличие многочисленных помех, генерируемых энергооборудованием самого локомотива непосредственно на частотах рабочей полосы [ГОСТ Р 55364–2012, ГОСТ 33436.3-2–2015] и действующих одновременно с гармониками сети. Исследования [4] показывают, что при реальных случаях отклонения коэффициента асимметрии рельсовых линий до 12–20 % уровни суммарных помех могут практически перекрывать пороговые характеристики полезных сигналов в каналах, в том числе для АЛС-ЕН, нормированная полоса приемного тракта которого почти в 1,5 раза шире полосы, занимаемой боковыми частотами сигнала QPSK [ГОСТ Р 55364–2012, ГОСТ 33436.3-2–2015] [10, 11].

При данных показателях затруднительно обеспечить отношение сигнал/помеха выше 7–9 дБ, что объективно ограничивает возможность длительного непрерывного режима приема сигналов АЛС-ЕН даже при идеальной синхронизации [12, 13]. Заметим, что качество работы реальной системы тактовой синхронизации определяется статистикой потока символов логических единиц

«1» и нулей «0» в принятом сообщении и в случае ее нестабильности ведет к нарушению условий приема.

## 2. Процессы установления информационных параметров сигнала с фазовой манипуляцией при передаче по рельсовому каналу

Выполним оценку процессов установления информационных параметров сигнала в узкополосном рельсовом канале при передаче АЛС-ЕН, воспользовавшись выражением (6.56) [14], которое описывает реакцию упрощенной резонансной системы типа одиночного контура на воздействие входного радиоимпульса прямоугольной формы. С учетом введенных обозначений, получим

$$u_{\text{вых}}(t) = A_0 \sqrt{1 - 2e^{-at} \cdot \cos \omega t + e^{-2at}} \cos(\omega t + \xi(t) - \varphi + \psi), \quad (4)$$

где  $\varphi = \arctg(\Delta\omega / a)$  — фазовый сдвиг напряжения из-за частотной расстройки;  $\xi(t) = -\arctg((\exp(at) - 1) \cdot \tg \omega t)$  — процесс компенсации фазового сдвига при установлении напряжения на выходе контура;  $\psi$  — фаза напряжения радиоимпульса на момент включения.

Можно видеть, что при отсутствии начальной расстройки ( $\Delta\omega = 0$ ) амплитуда и фаза выходного колебания резонансной системы будут устанавливаться в соответствии с выражением

$$A_1(t) = A_0 \cdot (1 - e^{-at}) \cdot \cos(\omega_{\text{рез}} t + \psi), \quad (5)$$

причем амплитуда не зависит от фазы напряжения входного радиоимпульса, а по истечению времени переходного процесса  $t \geq t_{\text{ПЕР}}$  будет численно равна  $A_0$ . При выключении возбуждающего колебания амплитуда выходного напряжения будет снижаться до нуля от достигнутого ранее установившегося значения, сохраняя неизменной фазу собственных свободных колебаний по закону

$$A_2(t) = A_0 \cdot e^{-at} \cdot \cos(\omega_{\text{св}} t + \psi). \quad (6)$$

Из этого следует, что уже при добротности  $Q \geq 10$  коэффициент затухания контура в рассматриваемом диапазоне частот будет меньше единицы и частота



свободных колебаний будет близка к расчетной величине

$$\omega_{св} = \omega_{рез} = \omega_0 \sqrt{1 - a^2 / \omega_0^2} \approx \omega_0. \quad (7)$$

Согласно принципу суперпозиции, сигнал на выходе резонансной системы представим [14–16] суммой двух независимых процессов: затухающих колебаний с амплитудой  $A_2(t)$ , которая устанавливается в системе после прекращения действия возбуждающего сигнала, и нарастающего колебания  $A_1(t)$ , обусловленного включением нового сигнала с фазой, смещенной на заданный угол. Данное условие при установке фазы скачком представим в следующем виде:

$$u_{вых}(t) = A_2(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 - \psi) + A_1(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \psi), \quad (8)$$

где  $\varphi_0$  — текущая фаза сигнала на момент переключения информационного параметра.

Исследуем (8), полагая отсутствие переходных процессов в резонансной системе до момента скачкообразного изменения фазы входного сигнала на угол  $\theta = 2\psi$ , а также равенство амплитуд огибающих до и после завершения этих процессов [15, 16].

Учитывая известные тригонометрические соотношения, найдем напряжение на выходе контура при условии отсутствия начальной расстройки:

$$(A_1(t) - A_2(t)) \cdot \sin \psi \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \theta(t)), \quad (9)$$

где

$$A(t) = \sqrt{(A_1(t) + A_2(t))^2 \cos^2 \psi + (A_1(t) - A_2(t))^2 \sin^2 \psi}, \quad (10)$$

$$\theta(t) = \operatorname{arctg}\left(\frac{A_1(t) - A_2(t)}{A_1(t) + A_2(t)} \cdot \operatorname{tg}\psi\right). \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) описывают характер модуля огибающей и медленно меняющейся фазы выходного процесса, которые после подстановки (5) и (6) примут вид:

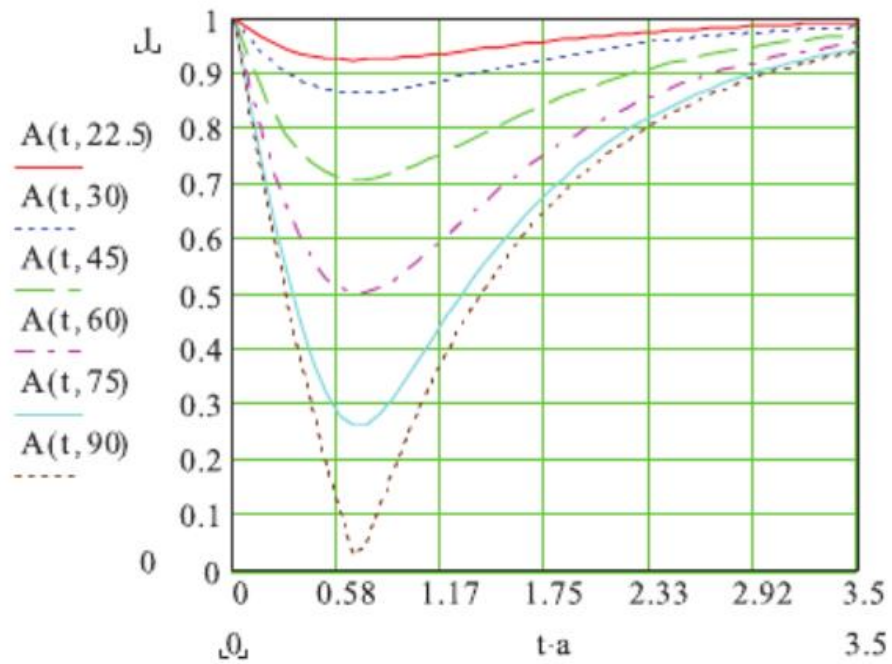
$$A(t) = A_0 \sqrt{1 - 4 \cdot e^{-at} \cdot (1 - e^{-at}) \sin^2 \psi}, \quad (12)$$

$$\theta(t) = \operatorname{arctg}((1 - 2 \cdot e^{-at}) \cdot \operatorname{tg}\psi), \quad (13)$$

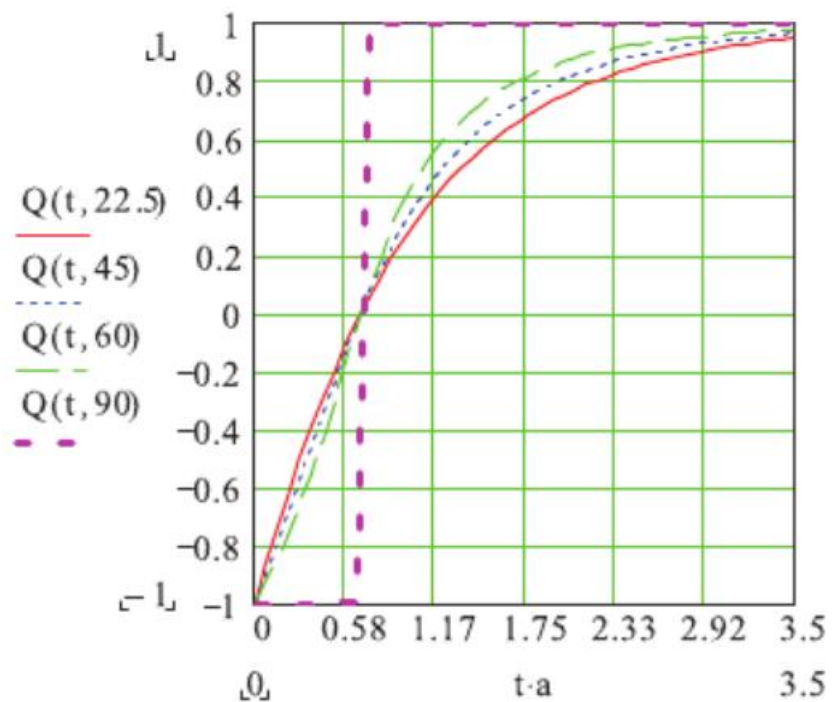
а производные этих выражений получим в следующей записи [17]:

$$\frac{dA(t)}{dt} = \frac{2 \cdot (\alpha \cdot e^{-at} - 2 \cdot \alpha \cdot e^{-2at}) \cdot \sin^2 \psi}{\sqrt{1 - 4 \cdot e^{-at} \cdot (1 - e^{-at}) \sin^2 \psi}}, \quad (14)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{\alpha \cdot \sin 2\psi \cdot e^{-at}}{1 - 4 \cdot e^{-at} \cdot (1 - e^{-at}) \sin^2 \psi}. \quad (15)$$



**Рис. 1.** Изменение амплитуды огибающей результирующего колебания при скачке фазы входного сигнала на угол  $Q = 2\psi$



**Рис. 2.** Процесс установки фазы результирующего колебания при скачке фазы входного сигнала на угол  $Q = 2\psi$

## 1. Математическое моделирование в среде Matlab

Проведем моделирование в среде Simulink (Matlab) на базе реальных сигналов записанных блоком БРС-АЛСН на электропоезде «Сапсан» (ЭВС1-9,

№ 766, поездка 8 марта 2019 года, время 15:14), где наблюдался сбой приема сигналов АЛС-ЕН. Фрагмент потерянной посылки представлен на рис. 3 и 4.

- В верхнем окне показан исходный сигнал с локомотивных катушек, отфильтрованный полосным фильтром на 175 Гц.
- Во втором окне отображается фаза сигнала.
- В третьем — продифференцированный сигнал.
- В четвертом — продифференцированный сигнал с детектором амплитуды, для отображения синхроимпульсов момента выбега частоты.

Проблема надежного приема сигналов АЛС-ЕН существующим алгоритмом обработки заключается в потере синхронизации во время приема кодов обрабатывающим процессором.

После определения величины угла фазы текущего передаваемого сигнала управляющий контроллер осуществляет поиск значения после 16 периодов несущей частоты. Таким образом, при воздействии помехи в момент выборки или при некорректном определении предыдущего значения весь блок данных может быть потерян. Однако, рассмотрев выбег частоты при скачке фазы входного сигнала (рис. 4), можно сделать следующий вывод: применение дифференциатора позволяет определять момент перескока фазы без учета контроля амплитуды сигнала.

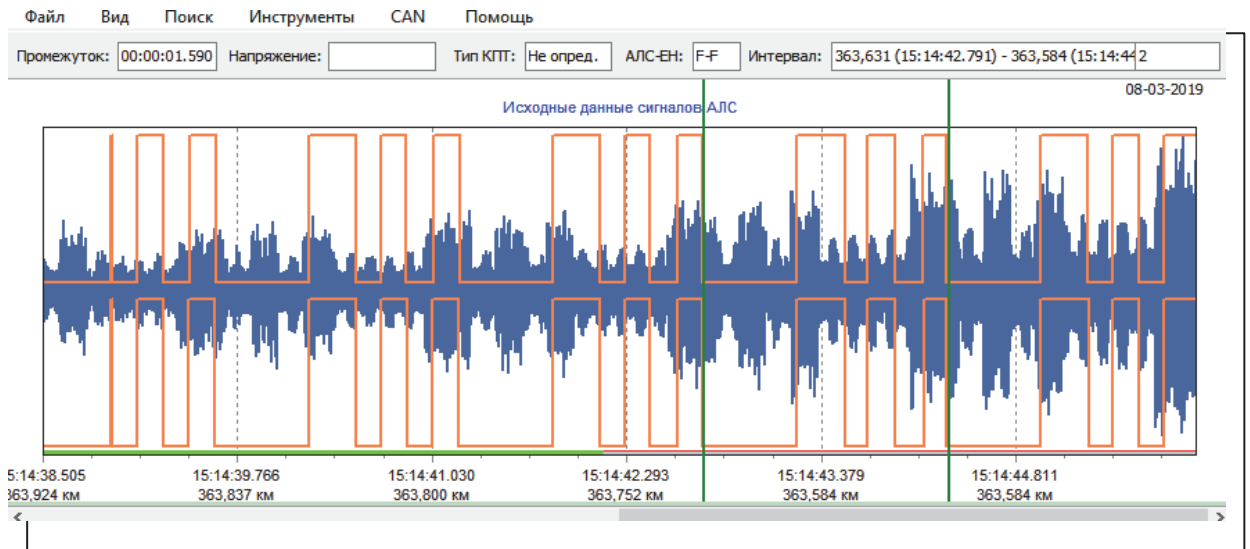


Рис. 3. Зарегистрированный сбой приема АЛС-ЕН

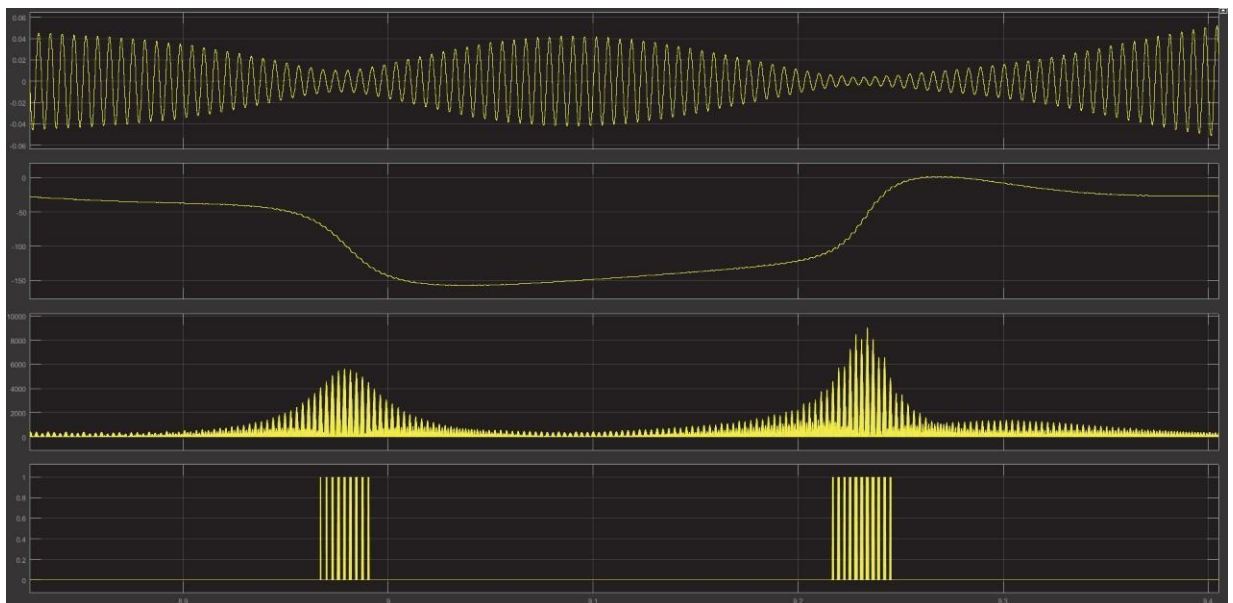


Рис. 4. Переходный процесс сбойного сигнала АЛС-ЕН в среде Matlab с применением методов синхронизации

## Заключение

По результатам проведенного анализа видно, что при любом скачке фазы на выходе будет отмечаться снижение амплитуды выходного сигнала и при углах

менее  $180^\circ$  оба процесса, начинаясь одновременно, в основном завершаются к безразмерному времени  $at \approx 3$ . Практическую оценку времени установления информационных параметров на выходе контура получим на основании (3) в виде

$$T_{уст} = 0,95 \Delta f_p, \quad (16)$$

где  $\Delta f$  — реальная рабочая полоса пропускания канала на уровне 0,707 Гц.

Приравняв числитель производной (14) к нулю, найдем момент времени, когда огибающая амплитуды сигнала после фазового скачка достигнет своего минимума:

$$T_A = a^{-1} \cdot \ln 2 = 0,22 / \Delta f_p, \quad (17)$$

при этом текущее значение амплитуды в зависимости от величины угла может быть получено подстановкой (17) в (12):

$$A(T_A) = A_0 \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \psi}. \quad (18)$$

Процесс установления новой фазы при скачках для всех углов от 0 до  $120^\circ$  включительно имеет приблизительно одинаковую длительность фронта на интервале  $\{0,05-0,95\}$ , но при этом явно несимметричный характер набега фазы относительно отсчетов от среднего нулевого значения. Это предполагает актуальность дополнительных исследований влияния аппаратных и системных погрешностей на момент отсчета фазы при существующем методе однократной пробы, особенно в случае чередующихся символов при увеличении кратности сдвига фаз сигналов. Для углов близких к  $180^\circ$  симметрия процесса установки фазы обеспечивается уже по истечении (17), но

сопровождается выраженной амплитудной модуляцией до 100 %, что так же остро ставит вопрос об оптимизации динамического диапазона приемопередающих трактов аппаратуры, условий работы схемы ограничителя сигнала и системы тактовой синхронизации.

Рассмотрение производной (15) и графика на рис. 5 показывает, что знак выбега частоты относительно несущей тождественно совпадает со знаком отклонения фазы и устанавливается сразу после скачка. Момент времени, соответствующий максимуму выбега частоты, флуктуирует по (19) от нуля до значения (17) и для приведенной полосы контура составляет около

$$\Delta t = 0,346a^{-1} = 0,11 / \Delta f_p. \quad (19)$$

При этом величина выбега может превышать выделенную полосу, поражая рабочие сигналы соседних каналов, особенно при скачках на угол  $\pm 180^\circ$ , что требует помимо избирательности приемных фильтров нормировать и селективность выходных каскадов передающего устройства:

$$T_f = (2a)^{-1} \cdot \ln(4 \sin^2 \psi). \quad (20)$$

При проведении измерений в канале следует учитывать, что наличие регулярного выбега будет влиять на среднее значение частоты в тракте. При передаче последовательностей с преобладающими односторонними скачками меньше  $180^\circ$  это будет отмечено в виде расстройки соответствующего знака с величиной пропорциональной частоте манипуляции:

$$\Delta \omega_v = V \cdot 2\psi, \quad (21)$$

где  $V$  — скорость передачи, Бод.

При скачках на  $180^\circ$  направление последующего вращения вектора амплитуды несущей частоты однозначно не определяется и знак выражения (21) может меняться произвольно. Этим, в частности, объясняется отказ от

применения когерентного метода приема сигналов из-за неустранимого эффекта «обратной работы».

Если длительность импульсов существенно меньше длительности переходного процесса, вызванного скачком фазы, импульсы на выходе имеют форму, подобную треугольной (на примере  $2\tau$ ), а их амплитуды изменяются в зависимости от передаваемых комбинаций «0» и «1», как и время сдвига передаваемой последовательности, определяемое как время достижения огибающей своего

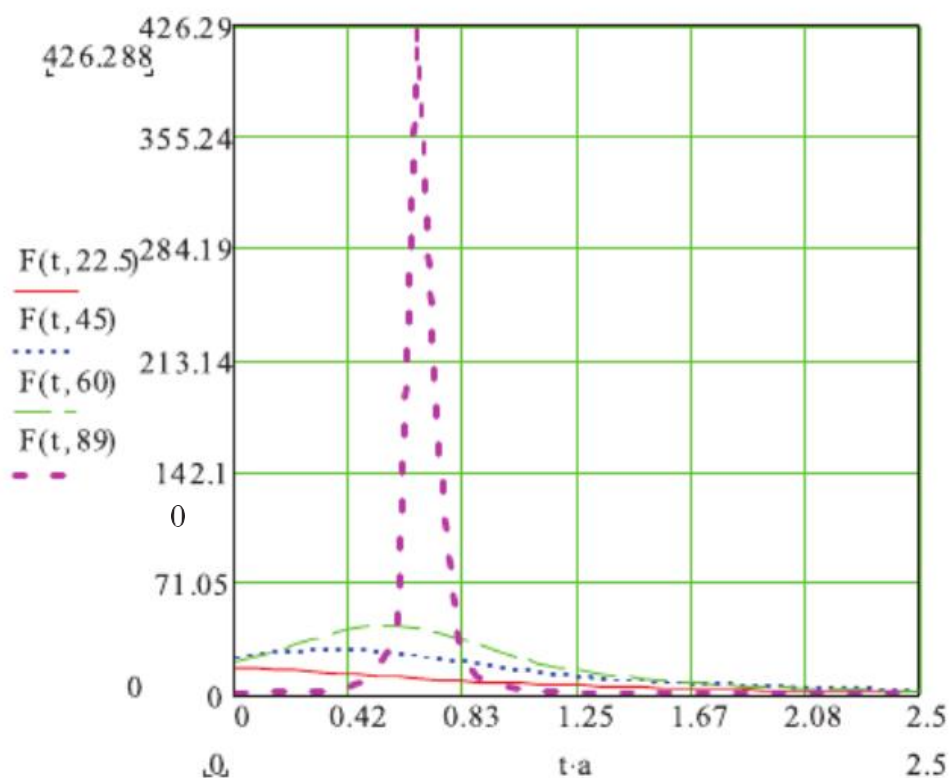


Рис. 5. Выбег частоты при скачке фазы входного сигнала на угол  $Q = 2\psi$

минимального значения. Для комбинаций из двух и более «1» время сдвига передаваемой последовательности постоянно. Для комбинаций с различным чередованием «0» и «1» время сдвига нестабильно [13], что приводит к нестабильности символьной частоты определяемой по огибающей. Увеличение числа комбинаций из «0», следующих друг за другом, делает выделение символьной частоты затруднительным.



На основе вышеизложенного формируется оригинальный метод приема кодов сигналов АЛС-ЕН способом «накопления», когда приемник осуществляет накопление сигнала за определенный период времени, затем по паттерну огибающей выделяет в принятом коде необходимый сигнал, а по синхро сигналу, формируемому перескоком фазы, приемник может достоверно оценить изменение сигнала и сформировать «точку выборки» текущего цифрового кода в зависимости от качества фидера, что позволит улучшить характеристики приема кодов и как следствие сократить количество сбоев.

**Литература:**

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники в трех частях / Л. А. Бессонов. – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 1961. – 792 с.
2. Saal R. Handbook of Filter Design. – W. Germany, Backnang: AEG-Telefunken, 1979. – Pp. 11–23.
3. Rice S. O. Noise in FM receivers. In Rosenblatt, M. (ed.). Time series analysis. – New York: Wiley, 1963. – Pp. 395–422.
4. Шаманов В. И. Помехи на аппаратуру рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Средства защиты: учеб. пособие. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. – 303 с.
5. Shannon C. E. Communication in the presence of noise // Proc. Institute of Radio Engineers. – 1949. – Vol. 37. – No 1. – Pp. 10–21.
6. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27. – Pp. 379–423, 623–656.
7. Залесова О. В. Экспериментальное исследование гармонического состава тяговых токов // Труды Кольского научного центра РАН. – 2017. – Т. 8. – № 1–14. – С. 52–

**Literature:**

1. Bessonov L. A. Theoretical foundations of electrical engineering in three parts

- / L. A. Bessonov. – 3rd ed. – Moscow: Higher School, 1961. – 792 p.
2. Saal R. Handbook of Filter Design. – W. Germany, Backnang: AEG-Telefunken, 1979. – Pp. 11-23.
  3. Rice S. O. Noise in FM receivers. In Rosenblatt, M. (ed.). Time series analysis. – New York: Wiley, 1963. – pp. 395-422.
  4. Shamanov V. I. Interference with the equipment of rail circuits and automatic locomotive signaling. Means of protection: studies. manual. – M.: FSBI DPO "Educational and methodological center for education in railway transport", 2019. – 303 p.
  5. Shannon C. E. Communication in the presence of noise // Proc. Institute of Radio Engineers. – 1949. – Vol. 37. – No. 1. – Pp. 10-21.
  6. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27. – Pp. 379-423, 623-656.
  7. Zalesova O. V. Experimental investigation of the harmonic composition of traction currents // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. - 2017. – Vol. 8. – No. 1-14. – P. 52–

© Ван Санъюй, 2022 *Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 5/2022.*

**Для цитирования:** Ван Санъюй, МЕТОДЫ ПРИЕМА И СИНХРОНИЗАЦИИ СИГНАЛОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ // Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 5/2022.

