

## ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 621.376.4

### СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ С ВЫСОКИМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

© 2019 г. В. Е. Мартиросов<sup>1, \*</sup>, Г. А. Алексеев<sup>1</sup>, А. А. Парамонов<sup>2</sup>, Ю. И. Савватеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Российская Федерация, 125993 Москва, Волоколамское шос., 4

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет,  
Российская Федерация, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78

\*E-mail: marti\_ve@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2018 г.

После доработки 01.06.2018 г.

Принята к публикации 11.06.2018 г.

Представлены результаты структурного синтеза систем синхронизации, оптимизированных по быстродействию в переходном режиме работы. На основе фазовых портретов систем фазовой автоподстройки частоты проанализированы проблемы быстродействия вхождения в синхронный режим работы. Осуществлена глобальная линеаризация траекторий фазовых портретов, позволившая аргументировать структурные решения для систем синхронизации, обладающих улучшенными динамическими характеристиками.

DOI: 10.1134/S0033849419020153

#### ВВЕДЕНИЕ

Синхронные технологии формирования и приема сигналов, основанные на использовании системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), являются эффективным инструментарием при создании современных радиосистем различного назначения. В частности, системы ФАПЧ применяются в составе оптимальных квазикогерентных структур модуляторов и демодуляторов дискретных сигналов типа PSK, QPSK и многопозиционных QAM, а также в синтезаторах частот, выполненных методами косвенного синтеза [1].

Проектирование систем ФАПЧ в составе компонентных устройств радиосистем является комплексной задачей, сложность которой обусловлена противоречивыми требованиями к параметрам самой системы ФАПЧ, возникающими вследствие наличия двух возможных состояний такой системы:

- 1) переходный режим (процесс установления синхронного режима работы);
- 2) синхронный режим работы системы.

Актуальными характеристиками системы ФАПЧ в переходном режиме работы являются диапазон частот синхронизации и время установления синхронного режима работы (динамические свойства системы).

В синхронном режиме работы критичны фильтрующие свойства системы ФАПЧ, которые обеспечивают фильтрацию внешних шумов и подавление

собственных частотно-фазовых флуктуаций синхронизируемого автогенератора системы.

В литературе известны оптимальные квазикогерентные алгоритмы формирования и приема дискретных сигналов, полученные на основе статистического синтеза с привлечением математического аппарата теории нелинейной фильтрации многокомпонентных марковских процессов [2, 3]. Однако эти структуры являются оптимальными только при условии известного текущего значения частоты принимаемого или формируемого сигнала, что обусловлено ограничениями применяемого математического аппарата данной теории.

В практических приложениях, когда номинальные значения частоты принимаемого или формируемого сигнала априори случайны, оптимальность обсуждаемых алгоритмов и структур сохраняется только для синхронного режима работы, когда входящая в их состав система ФАПЧ осуществляет оценку текущего значения частоты и фазы сигнала с достаточной точностью.

Цель работы – дополнительная структурная оптимизация квазикогерентных устройств формирования и приема дискретных сигналов для переходного режима работы входящих в них систем синхронизации. Критерий такой структурной оптимизации очевиден: минимизация времени переходного процесса системы синхронизации при максимальном диапазоне неопределенности начального частотного рассогласования.

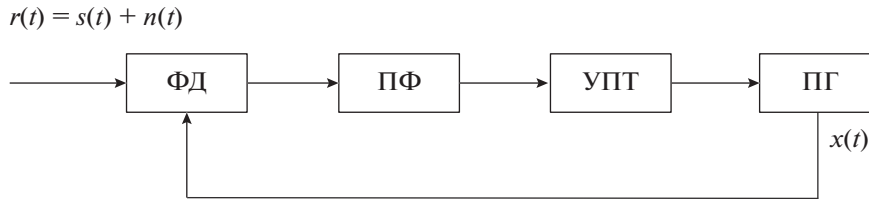


**Рис. 1.** Схема традиционной структуры системы ФАПЧ: ФД – фазовый детектор, ПФ – петлевой фильтр, УПТ – усилитель постоянного тока, ПГ – подстраиваемый генератор.

## 1. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРАДИЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ФАПЧ

Рассмотрим ограничения динамических характеристик традиционной структуры ФАПЧ (рис. 1) в переходном режиме работы, предшествующем установлению синхронного режима работы системы.

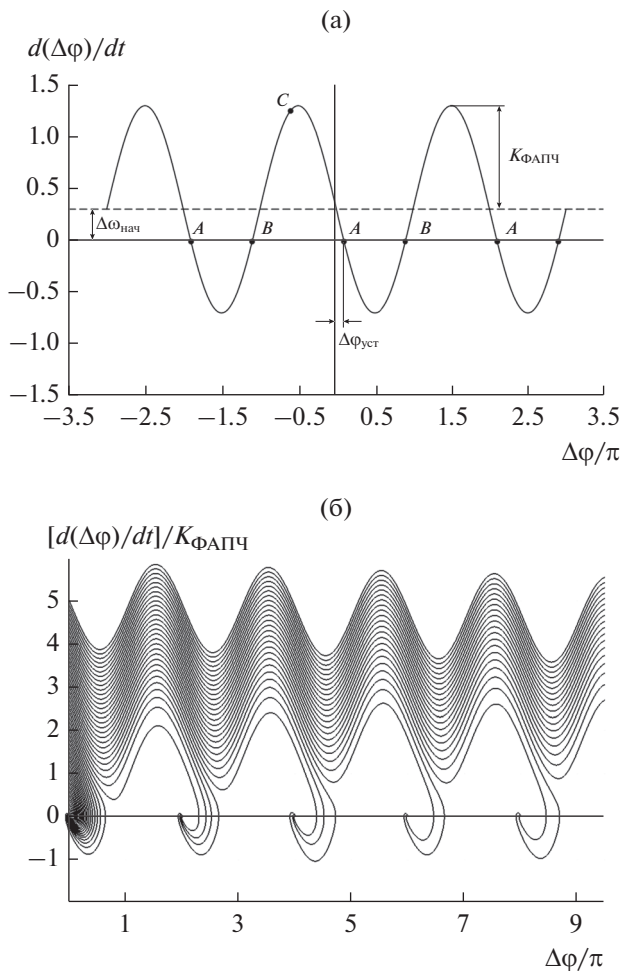


**Рис. 2.** Фазовый портрет системы ФАПЧ первого порядка (а) и второго идеального (б), полученного методом математического моделирования системы в программной среде MATLAB/Simulink.

Поведение такой системы ФАПЧ описывается следующим дифференциальным уравнением, записанным в операторной форме:

$$p(\Delta\varphi) + K_{\text{ФАПЧ}} K_{\text{ПФ}}(p) \sin(\Delta\varphi) = \Delta\omega_{\text{нач}}, \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{вх}} - \varphi_{\text{ПГ}})$  – текущее фазовое рассогласование входного сигнала  $s(t)$  и колебания ПГ;  $K_{\text{ФАПЧ}}$  – коэффициент петлевого усиления системы;  $K_{\text{ПФ}}(p)$  – комплексный коэффициент передачи петлевого фильтра;  $\Delta\omega_{\text{нач}} = (\omega_{\text{с}} - \omega_{\text{ПГ0}})$  – начальная частотная расстройка входного сигнала  $s(t)$  и колебания ПГ  $x(t)$ . При отсутствии фильтра в петле, т.е. при  $K_{\text{ПФ}}(p) \equiv 1$ , имеем дело с системой ФАПЧ первого порядка, для которой уравнение (1) примет следующий вид:

$$d(\Delta\varphi)/dt = \Delta\omega_{\text{нач}} - K_{\text{ФАПЧ}} \sin(\Delta\varphi). \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает зависимость производной фазового рассогласования  $d(\Delta\varphi)/dt$  (текущей частотной расстройки  $\Delta\omega = (\omega_{\text{вх}} - \omega_{\text{ПГ}})$ ) от самого фазового рассогласования  $\Delta\varphi$ . Из него следует, что система ФАПЧ является нелинейной следящей системой первого порядка. По уравнению (2) построим фазовый портрет системы (рис. 2а).

Далее исследуем поведение этой нелинейной системы графоаналитическим *методом фазовых траекторий* движения изображающей точки  $C$  на фазовом портрете системы. Изображающая точка  $C$  фазового портрета показывает текущее состояние системы ФАПЧ и может оказаться при включении системы в произвольном положении. Очевидно, что движение во времени изображающей точки  $C$  в верхней полуплоскости фазового портрета (при  $d(\Delta\varphi)/dt > 0$ ) происходит в направлении возрастания фазового рассогласования  $\Delta\varphi$  (слева направо). В нижней полуплоскости портрета (при  $d(\Delta\varphi)/dt < 0$ ) движение изображающей точки  $C$  происходит в сторону уменьшения значения фазового рассогласования (справа налево). Перемещение во времени изображающей точки  $C$  по фазовому портрету соответствует переходному режиму работы системы синхронизации, который заканчивается достижением синхронного режима работы, при котором точка  $C$  совмещается с ближайшей точкой  $A$  устойчивого равновесия системы, соответствующей условию  $d(\Delta\varphi)/dt = 0$ .

Из изложенного следует, что передвижение изображающей точки  $C$  по фазовому портрету на участках  $\Delta\varphi = (\pi/2; 3\pi/2) \pm 2\pi$ , содержащих точку неустойчивого равновесия  $B$ , с позиций минимизации времени переходного режима работы системы ФАПЧ является излишним.

Также очевидно, что обсуждаемая система ФАПЧ первого порядка имеет ограничение по начальной частотной расстройке  $|\Delta\omega_{\text{нач}}| < K_{\text{ФАПЧ}}$ , при которой возможен синхронный режим работы системы. Условием последнего является существование на фазовом портрете точки  $A$ , точки пересечения фазового портрета с осью абсцисс. Вследствие этого и с учетом наличия ограничений на выбор значения коэффициента петлевого усиления, частотный диапазон синхронного режима работы системы первого порядка существенно ограничен.

Ограничение на диапазон частот синхронизации системы может быть устранено при использовании системы ФАПЧ второго идеального порядка, т.е. при использовании в качестве петлевого фильтра интегратора с комплексным коэффициентом передачи  $K_{\text{ПФ}}(p) = (1 + a/pT)$ . При начальных частотных расстройках, превышающих значение  $K_{\text{ФАПЧ}}$ , происходит трансформация формы фазового портрета с появлением постоянной составляющей, которая в процессе каждого периода колебаний переходного режима накапливается во времени на интеграторе в ПФ, вследствие чего происходит постепенное сближение фазового портрета с осью абсцисс, вплоть до момента их пересечения и установления синхронного режима работы системы (рис. 26).

Данные процессы иллюстрируются приведенным на рис. 26 фазовым портретом систем ФАПЧ второго порядка, полученным методами математического моделирования системы в программной среде MATLAB/Simulink.

Получение фазового портрета методом программирования блок-схемы системы ФАПЧ на вычислительном устройстве, является классическим способом нахождения решений нелинейного дифференциального уравнения, описывающего состояние систем ФАПЧ порядков выше первого. Так, например, аналогичный подход был использован Э.Д. Витерби при анализе поведения системы ФАПЧ второго порядка [4].

Как следует из фазового портрета системы синхронизации второго порядка (см. рис. 26), достижение системой синхронного режима может осуществляться, даже в случае значительного превышения значения начальной частотной расстройки  $\Delta\omega_{\text{нач}}$  над величиной  $K_{\text{ФАПЧ}}$ .

Следует также отметить, что с увеличением начального частотного рассогласования *значительно возрастает число периодов фазового портрета*, которые проходит изображающая точка до со-

прикосновения с осью абсцисс и установления синхронного режима работы. Траектория движения изображающей точки портрета остается при этом нелинейной, носящей периодический характер.

Таким образом, проблема оптимизации синхронной структуры по комплексному критерию — *максимизация диапазона частот синхронизации при минимизации времени вхождения в синхронный режим работы* — остается открытой и для системы ФАПЧ второго порядка.

## 2. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ, ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ДЛЯ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Проведем преобразования фазового портрета традиционной структуры системы ФАПЧ с целью получения системы синхронизации, оптимизированной по указанному выше комплексному критерию. Структурные преобразования фазового портрета выполним в два этапа на основе системы ФАПЧ первого порядка.

На первом этапе структурной оптимизации фазового портрета системы (рис. 3а) осуществим инверсию знака функции фазового портрета на участках значений  $\Delta\varphi = (\pi/2; 3\pi/2) \pm 2\pi i$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots$ . В результате точки  $B$  неустойчивого равновесия (см. рис. 2а) будут преобразованы в дополнительные точки  $A^*$  устойчивого равновесия системы, а периодичность фазового портрета станет равной  $\pi$ . Очевидно, что при такой трансформации фазового портрета в определенной степени сократится длительность перехода системы в режим синхронной работы.

Дифференциальное уравнение системы ФАПЧ, соответствующее фазовому портрету на рис. 3а, может быть записано в виде

$$\frac{d(\Delta\varphi)}{dt} = \Delta\omega_{\text{нач}} - \text{sign}\{\cos(\Delta\varphi)\} K_{\text{ФАПЧ}} \sin(\Delta\varphi), \quad (3)$$

где множитель  $\text{sign}\{\cos(\Delta\varphi)\}$  определяет введенные структурные изменения.

Для существенного расширения диапазона частот синхронизации за пределы ограничения  $|\Delta\omega_{\text{нач}}| < K_{\text{ФАПЧ}}$  проведем второй этап структурной оптимизации фазового портрета (рис. 3б).

В моменты перехода между повторяющимися по форме областями фазового портрета, модифицированного на первом этапе (см. рис. 3а), осуществим сдвиг каждой последующей области портрета по оси ординат на величину  $2K_{\text{ФАПЧ}}$  в сторону сближения с осью абсцисс (см. рис. 3б, вертикальные штриховые стрелки). После определенного числа таких переходов произойдет пересечение структурированного таким образом

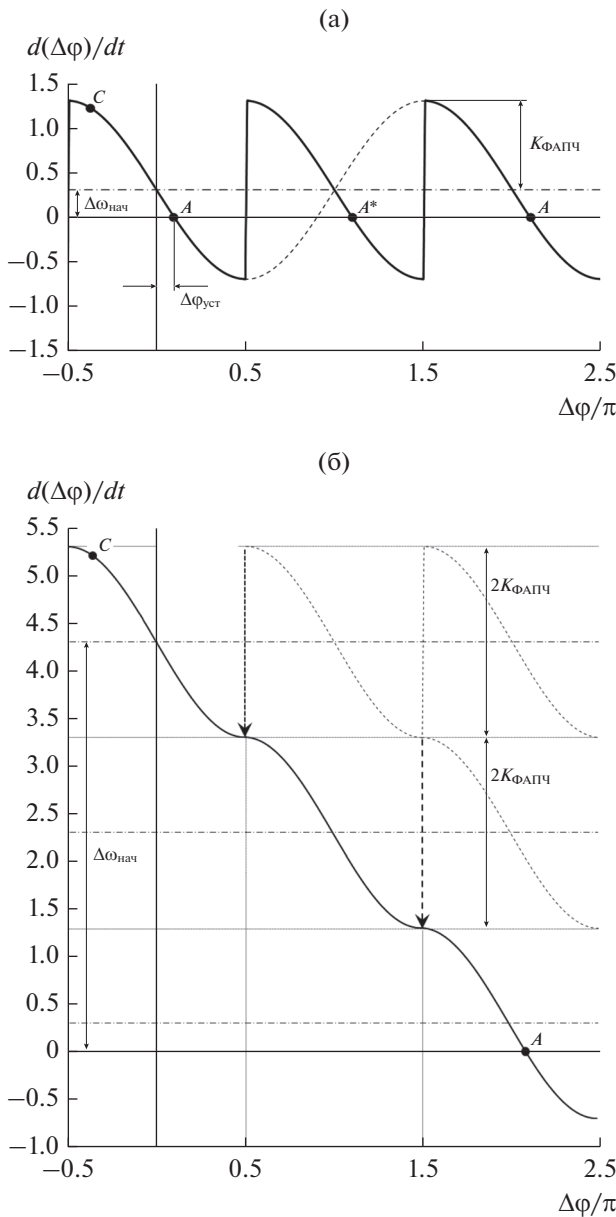


Рис. 3. Модификация фазового портрета системы ФАПЧ: первый (а) и второй (б) этапы.

фазового портрета с осью абсцисс, т.е. система войдет в синхронный режим работы.

Чтобы осуществить данное преобразование фазового портрета, необходимо ступенчато уменьшать текущее частотное рассогласование в моменты перехода между областями фазового портрета. Это можно выполнить путем дискретного смещения частоты ПГ на величину  $2K_{\text{ФАПЧ}}$ , например, формируя дополнительно ступенчатое напряжение управления частотой ПГ.

Проведенная структурная реорганизация фазового портрета системы ФАПЧ соответствует *оптимизации динамических переходов состояния си-*

*стемы*, которая отвечает принципу максимума Понтрягина [5]. Ее можно назвать структурой, оптимизированной по быстродействию в переходном режиме работы, и отобразить следующим дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} d(\Delta\varphi)/dt = & \Delta\omega_{\text{нач}} - \\ & - \text{sign}\{\cos(\Delta\varphi)\}K_{\text{ФАПЧ}} \sin(\Delta\varphi) - \\ & - \text{sign}\{d(\Delta\varphi)/dt\}2K_{\text{ФАПЧ}} \times \\ & \times \sum_i \left\{ \int_t [\delta[\cos(\Delta\varphi - \Delta\varphi_i)]] dt \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Delta\varphi_i = \pm i\pi$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$ . Множитель  $\text{sign}\{\cos(\Delta\varphi)\}$  в третьей компоненте уравнения (4) соответствует первому этапу структурной оптимизации. Четвертая компонента уравнения (4) отображает введенные на втором этапе структурного синтеза изменения, проявляющиеся только в переходном режиме работы системы. При этом множитель  $\text{sign}\{d(\Delta\varphi)/dt\}$  определяет знак *текущего* частотного рассогласования входного сигнала и колебания ПГ, а компонента  $2K_{\text{ФАПЧ}} \sum_i \left\{ \int_t [\delta[\cos(\Delta\varphi - \Delta\varphi_i)]] dt \right\}$  соответствует управляющему смещению частоты ПГ на границах областей фазового портрета на величину  $2K_{\text{ФАПЧ}}$ .

На основе структурно оптимизированного фазового портрета (см. рис. 3б) и соответствующего ему дифференциального уравнения (4) была разработана представленная на рис. 4 глобально-линеаризованная система синхронизации (ГЛСС), полная структура и описание которой приведены в [6]. В ее составе присутствует традиционная астатическая аналоговая ветвь управления частотой ПГ, включающая в себя фазовый детектор ФД, интегратор с регулирующим его коэффициентом передачи множителем  $k_2$  и сумматор напряжений.

Для реализации первого этапа структурного преобразования фазового портрета были применены фазовращатель на  $\pi/2$ , синхронный детектор СД, пороговое устройство ПУ<sub>1</sub> и коммутатор полярности КП, функционально реализующие множитель  $\text{sign}\{\cos(\Delta\varphi)\}$  в третьей компоненте дифференциального уравнения (4).

Для реализации второго этапа структурного преобразования фазового портрета создана цифровая ветвь управления частотой ПГ, содержащая пороговые устройства ПУ<sub>1</sub> и ПУ<sub>2</sub>, логическую схему “ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ” (=1), формирователь импульсов ФИ, линию задержки ЛЗ, реверсивный счетчик РС и цифро-аналоговый преобразователь ЦАП. Выходное напряжение ЦАП через сумматор напряжений обеспечивает ступенчатую регулировку частоты подстраиваемого генератора на величину  $2K_{\text{ФАПЧ}}$  в сторону снижения текущего частотного рассогласования в мо-

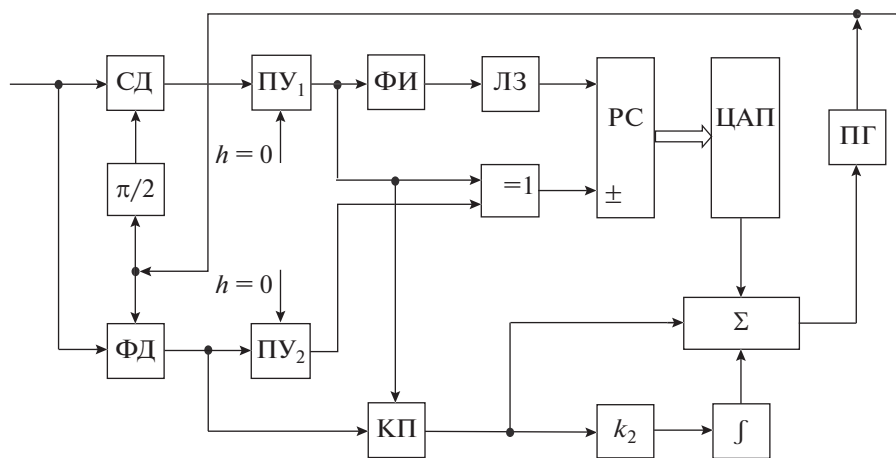


Рис. 4. Глобально линеаризованная система синхронизации (пояснения в тексте).

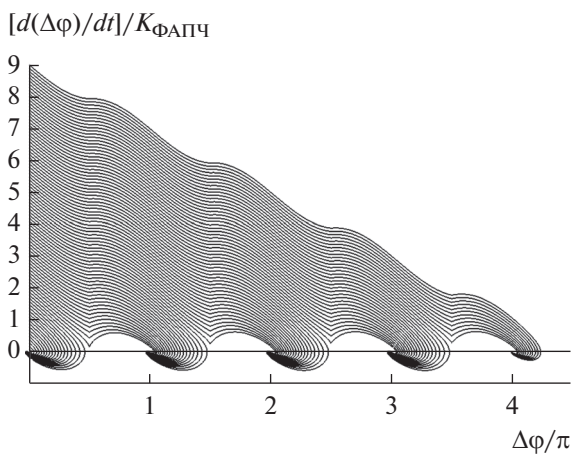


Рис. 5. Фазовый портрет ГЛСС.

менты перехода между повторяющимися областями фазового портрета системы.

После окончания переходного режима работы регулирование частоты ПГ осуществляется в пределах одного периода фазового портрета и только по аналоговой ветви управления, благодаря чему полученная структура сохраняет оптимальность по статистическим критериям в синхронном режиме работы [1, 3].

На рис. 5 представлен фазовый портрет системы ГЛСС, полученный методами имитационного моделирования структуры в программной среде MATLAB/Simulink. Сравнение с фазовым портретом системы ФАПЧ второго порядка (см. рис. 2б) показывает, что при многократно увеличенном диапазоне начальных частотных расстро-

ек значительно сократилось число периодов колебаний биений, предшествующих переходу системы в синхронный режим работы, т.е. существенно улучшились динамические характеристики системы.

\* \* \*

Проведенная в данной работе структурная оптимизация системы синхронизации, выполненная на основе критерия минимизации времени переходного процесса при максимальном диапазоне неопределенности начального частотного рассогласования, позволила значительно улучшить динамические характеристики системы в переходном режиме работы по сравнению с традиционными структурами системы ФАПЧ. Оптимизированные для переходного режима работы алгоритмы и структуры сохраняют свою оптимальность по статистическим критериям в синхронном режиме работы системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартыросов В.Е. Оптимальный прием дискретных сигналов ЦСПИ. М.: Радиотехника, 2010.
2. Мартыросов В.Е. // РЭ. 1985. Т. 30. № 5. С. 981.
3. Мартыросов В.Е. // Электросвязь. 1995. № 10. С. 33.
4. Витерби Э.Д. Принципы когерентной связи. М.: Сов. радио, 1970.
5. Понтягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиз, 1961.
6. Мартыросов В.Е., Алексеев Г.А. Глобально линеаризованная система синхронизации. Патент на изобретение РФ № 2554535 // Оpubл. офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели". 2015. № 18.