

УДК 621.396

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ В МОМЕНТ СРЫВА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ЧАСТОТОЙ ТОЧЕЧНОЙ ЦЕЛИ

В.А. КОВРИГИН

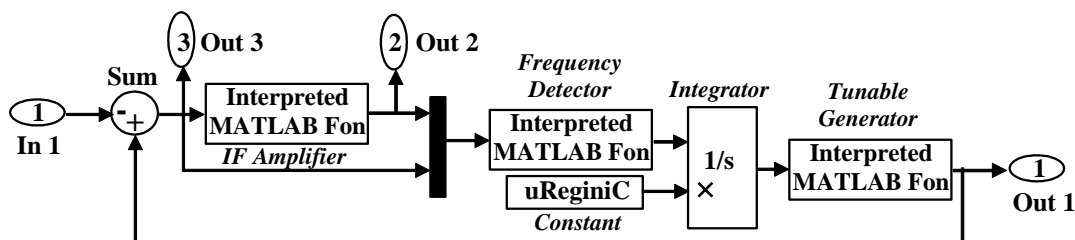
**Статья представлена доктором технических наук, профессором Шахтариным Б.И.**

Анализируются особенности функционирования в ближней зоне системы частотной автоподстройки (ЧАП), используемой в качестве узкополосного фильтра, следящего за частотой Доплера. Приводятся результаты вычислений динамических характеристик системы ЧАП в момент срыва слежения в диапазоне условий встречи.

**Ключевые слова:** система частотной автоподстройки, система ближней локации, доплеровская частота, точечная радиолокационная цель, срыв процесса слежения.

В работе рассматриваются вопросы моделирования процессов функционирования в ближней зоне системы ЧАП [1]. Система ЧАП после вхождения в режим слежения представляет собой узкополосный фильтр, перестраиваемый по частоте [2]. В процессе сближения доплеровская частота (ДЧ) принимаемого сигнала в окрестности цели меняется, в результате чего возникают большие динамические ошибки, а в системе ЧАП происходит срыв процесса слежения. Часто при разработке доплеровских систем ближней локации (СБЛ) используется упрощенный подход, при котором в качестве показателя, характеризующего срыв, задается фиксированное значение скорости изменения ДЧ в момент срыва независимо от условий встречи. Практический интерес представляет исследование в ближней зоне СБЛ методами математического моделирования характеристик слежения системы ЧАП в момент срыва [2].

Для реализации метода информативного параметра [3] исследуемая система ЧАП представлена в виде модели, структурная схема которой представлена на рис. 1. Исходные физические и математические модели устройств системы исследуемой системы ЧАП рассмотрены в [2]. Модель реализована в среде пакета прикладных программ Simulink системы Matlab в виде отдельного структурного блока – маскированной подсистемы с именем FLL. На входной порт In1 подается информативный параметр – реализация ДЧ, а с выходного порта Out1 в режиме слежения снимается реализация оценки ДЧ – частоты управляемого генератора. Кроме того, на схеме показаны две точки съема информации через порты Out2 и Out3.



**Рис. 1.** Структурная схема модели системы ЧАП

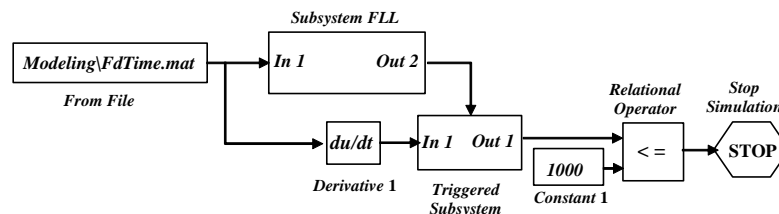
Скорость протекания переходных процессов в резонансных контурах смесителя, УПЧ, частотного детектора много ниже, чем в фильтре нижних частот. Поэтому соответствующие блоки структурной схемы аппроксимируются безынерционными звеньями, описываемыми статическими характеристиками. Каждое безынерционное звено реализовано в виде блока задания Matlab-функции – частного случая функций, определяемых пользователем [4]. Статические функции, описывающие соответственно ЧД и УГ, заданы выражениями в стиле языка программирования Matlab. УПЧ аппроксимируется безынерционным полосовым фильтром с идеальной прямоугольной АЧХ, симметричной относительно номинального значения промежуточной ча-

стоты. При необходимости каждый из перечисленных блоков можно представить динамическим звеном путем некоторого усложнения описания.

В схеме рис. 1 использованы следующие обозначения: IF Amplifier – усилитель промежуточной частоты, Frequency Detector – частотный детектор, Tunable Generator – управляемый генератор. Смеситель моделируется в виде сумматора, осуществляющего операцию вычитания частот. С помощью источника постоянного сигнала uRegInC задается начальное значение регулирующего напряжения, используемого для вхождения в режим слежения с заданной ДЧ. Это напряжение подается через внешний порт блока Integrator, реализующего сглаживающую цепь системы ЧАП.

Если требуемое входное воздействие отличается от типовых сигналов библиотеки источников Sources ППП Simulink, то его удобно задать с помощью блоков From Workspace или From File. В блоке From Workspace сигналы могут генерироваться в текущем сеансе Matlab. В блоке From File предварительно сформированные сигналы считываются с диска из двоичного MAT-файла (с расширением .mat).

Ниже приводятся результаты исследований динамических характеристик срыва в диапазоне типовых условий встречи для случая точечной цели. Для фиксации момента срыва слежения и оценки скорости изменения ДЧ в этот момент используется схема вычислительного эксперимента, приведенная на рис. 2.



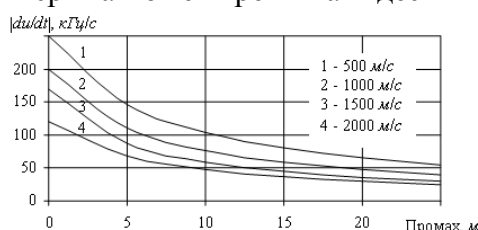
**Рис. 2.** Схема вычислительного эксперимента для оценки производной доплеровской частоты в момент срыва слежения

Схема содержит блок Derivative (Дифференцирование), который вычисляет скорость изменения по времени ДЧ, и блок Triggered Subsystem (Триггерная подсистема). Триггерная подсистема обладает двумя возможными состояниями и способна под действием внешнего управляющего (триггерного) сигнала переходить скачком из одного состояния в другое. Триггерная подсистема содержит управляющий блок Trigger, входной и выходной порты и линию связи между ними. Блок Trigger под действием триггерного сигнала управляет состояниями подсистемы. В качестве триггерного сигнала в схеме рис. 2 используется выходной сигнал УПЧ, а триггерная подсистема настроена на убывающий тип (спад) триггерного сигнала. При отсутствии спада сигнала подсистема находится в первом, запертом состоянии, в котором входной сигнал подсистемы не проходит по линии связи на выходной порт. В момент спада сигнала УПЧ до нулевого уровня, соответствующего моменту срыва слежения, подсистема переходит во второе, открытое состояние, и на текущем шаге моделирования временная производная ДЧ проходит по линии связи с входного на выходной порт. В дальнейшем выходной сигнал подсистемы остается неизменным до следующего спада триггерного сигнала.

Сигнал с выхода триггерной подсистемы поступает на первый вход блока выполнения операций отношения Relational Operator, который настроен на операцию “меньше или равно”. На второй вход этого блока от источника сигнала Constant подается достаточно малая опорная величина производной, например,  $-1000 \text{ Гц/с}$ . В блоке Relational Operator текущие значения входных сигналов сравниваются, и если производная ДЧ не больше опорного значения, то результатом вычисления операции отношения является булево значение ИСТИНА, и на выходе блока формируется единичный сигнал. При поступлении на вход блока останова моделирования Stop Simulation ненулевого сигнала Simulink завершает текущий шаг и прерывает процесс моделирования. На этом шаге моделирования формируются оценки момента срыва  $t_{\text{ср}}$  и значение производной ДЧ в момент срыва

$$\dot{f}_{d.tl} = df_d(t)/dt|_{t=t_{tl}}.$$

С помощью описанной схемы проведены численные исследования модели ЧАП на ЭВМ и получены следующие результаты. На рис. 3 приведены графики модуля  $\dot{f}_{d.tl}$  в зависимости от промаха, изменяющегося в диапазоне от 3 до 25 м, для четырех значений относительной скорости  $v_{rl}$ . Из анализа графиков можно сделать следующие выводы. Во-первых, графики имеют существенно нелинейный характер, причем наибольшая нелинейность наблюдается в области малых промахов, где динамические изменения  $\dot{f}_{d.tl}$  проявляются с наибольшей интенсивностью. Во-вторых, величина  $\dot{f}_{d.tl}$  существенно зависит от условий встречи. Так в рассмотренном примере разброс модуля  $\dot{f}_{d.tl}$  в диапазоне изменения промаха составляет до 180 кГц/с при максимальном значении  $v_{rl}$ , а в диапазоне изменения величины  $v_{rl}$  – до 210 кГц/с. При этом ошибка в оценке угла визирования в момент срыва может превышать десять градусов.



**Рис. 3.** Модуль скорости изменения доплеровской частоты в момент срыва слежения в диапазоне условий встречи

Полученные результаты показывают, что при задании исходных данных на разработку СБЛ требуется более полная информация о характеристиках срыва слежения, полученная путем предварительных исследований, в том числе с использованием математического моделирования. Разработанная математическая модель системы ЧАП может быть применена при исследовании процессов, протекающих в ближней зоне.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Первачев С.В. Радиоавтоматика. - М.: Радио и связь, 1982.
2. Ковригин В.А. Исследование системы частотной автоподстройки как перестраиваемого узкополосного фильтра // Наука в образовании. Электронное научное издание. - 2011. - Октябрь.
3. Радиоприемные устройства / Ю.Т. Трифонов, Ю.С. Данич, А.П. Жуковский [и др.] / под ред. А.П. Жуковского. - М.: Высшая школа, 1989.
4. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. - М.: Диалог-МИФИ, 2003.

#### DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE FREQUENCY-LOCKED LOOP AT THE MOMENT OF TRACKING LOSS OF THE FREQUENCY OF POINT TARGET

Kovrigin V.A.

Performance features of the frequency-locked loop in the close range zone used as a narrow-band filter, keeping track of the Doppler frequency, are analyzed. The results of the calculations of dynamic characteristics of the FLL system in the moment of tracking loss in the range of meeting conditions are given.

**Keywords:** frequency-locked loop, close range system, Doppler frequency, point target, tracking loss.

#### Сведения об авторе

**Ковригин Владимир Афанасьевич**, 1938 г.р., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана (1963), кандидат технических наук, доцент кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 120 научных работ, область научных интересов – моделирование и оценка эффективности систем ближней локации.