

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ ШИФРОВАННЫХ ДАННЫХ В СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СПЕЦИАЛЬНОЙ СВЯЗИ

В работе созданы математические модели процессов формирования и передачи шифрованных дискретных сообщений каналами связи, рассмотрены процессы модуляции при наличии различных исходных данных и проведено компьютерное моделирование.

**Введение.** Наряду с аналитическими методами и натурными испытаниями для исследования сложных технических систем широко используются разнообразные методы моделирования объектов и происходящих в них процессов. Обычно различают модели трех типов: геометрические, физические и математические [1].

Процессы моделирования занимают значительное место в создании современных радиотехнических систем (РТС) специальной связи: они позволяют наглядно представить определенные процессы, не используя сложных и громоздких установок, а имея только персональный компьютер, без которого уже невозможно представить исследования – будь то моделирование сигналов авиационной РТС [1] либо зоны покрытия базовой станции мобильной радиосвязи [2].

При создании систем радиосвязи и передачи шифрованных данных в большинстве случаев оказывается, что спектр исходного сигнала, подлежащего передаче, сосредоточен не на тех частотах, которые эффективно пропускает имеющийся канал связи. Кроме того, во многих случаях требуется, чтобы передаваемый сигнал был узкополосным. Перечисленные причины приводят к необходимости такой трансформации исходного сигнала, чтобы требования, предъявляемые к занимаемой сигналом полосе частот, были выполнены [3]. Решение указанной проблемы достигается путем использования модуляции, сущность которой заключается в следующем. Формируется некоторое колебание (чаще всего гармоническое), называемое несущим, и какой-либо из параметров этого колебания изменяется во времени пропорционально исходному сигналу [4].

Для повышения качества разработки РТС специальной связи целесообразно промоделировать процессы аналоговой модуляции, при этом, используя такую систему компьютерной математики как MATLAB + SIMULINK, которая позволяет моделировать эти процессы, исследовать их, изменять необходимые параметры и строить необходимые графики.

### Постановка задачи.

Рассматриваются процессы аналоговой модуляции, поскольку они чаще всего используются в авиационных РТС специальной связи, а также процессы передачи дискретных сообщений (данных) по непрерывному каналу радиосвязи, поскольку они нашли широкое применение в современных системах авиационной электросвязи и постепенно вытесняют аналоговые.

У гармонического несущего колебания  $s(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  есть три основных параметра: амплитуда  $A_0$ , частота  $\omega_0$  и начальная фаза  $\varphi_0$ . Каждый из них можно связать с модулирующим сигналом, получив таким образом три основных вида аналоговой модуляции: амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) и фазовую (ФМ).

Модуляция применяется для передачи информации с помощью электромагнитных волн (радиосигналов). Переносчиком сигнала в этом случае являются синусоидальные электрические колебания высокой частоты  $\omega_0$  (несущая частота).

В простейшем случае модуляции амплитуды  $A_0$  гармоническим сигналом модулированное колебание может быть записано в виде:

$$S_{\text{АМ}}(t) = A_0(1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1)$$

В формуле (1)  $A_0$  и  $\omega_0$  – амплитуда и частота исходного несущего колебания;  $\Omega$  – частота модулирующего колебания; величина  $m$  – коэффициент глубины АМ, который характеризует степень изменения амплитуды несущего колебания.

Частота модуляции  $\Omega$  определяет скорость изменения амплитуды несущего колебания. Эта частота должна быть во много раз меньше несущей частоты  $\omega_0$ . Модулированное колебание уже не является синусоидальным. Амплитудно-модулированное колебание представляет собой сумму трёх синусоидальных колебаний с частотами  $\omega$ ,  $\omega + \Omega$  и  $\omega - \Omega$ . Колебание частоты  $\omega$  называется несущим. Его амплитуда равна амплитуде исходного колебания  $A_0$ . Две остальные частоты называются боковыми частотами. Амплитуда каждой боковой равна  $0,5mA_0$ . Любая передающая радиостанция, работающая в режиме АМ, излучает не одну частоту, а целый набор (спектр) частот. В простейшем случае модуляции синусоидальным сигналом этот спектр содержит лишь три составляющие – несущую и две боковые. Если же модулирующий сигнал не синусоидальный, а более сложный, то вместо двух боковых частот в модулированном колебании будут две боковые полосы, частотный состав которых определяется частотным составом модулирующего сигнала. Поэтому каждая передающая станция занимает в эфире определённый частотный интервал. Во избежание помех несущие частоты различных станций должны отстоять друг от друга на расстоянии, большем, чем сумма боковых полос.

Угловая модуляция – это два связанных варианта: ЧМ и ФМ.

Пусть имеется сигнал вида  $u(t) = U_m \sin[\omega_0 t + \theta(t)]$  с фазой  $\theta$ , в общем случае зависящей от времени. Если  $\theta = \text{const}$ , то это гармонический сигнал с частотой  $\omega = \omega_0$ .

Если  $\theta(t) = \Delta\omega t$ , то имеет место линейный по времени набег фазы, что эквивалентно значению  $\omega_1 = \omega + \Delta\omega$ . Колебания с линейно нарастающей фазой есть колебания со смещенной частотой. Существует связь между  $\omega(t)$  и  $\theta(t)$ . В общем случае  $\theta(t) = \int_0^t \Delta\omega dt$ ,

тогда полная фаза колебаний будет:

$$\psi(t) = \omega_0 t + \theta(t) = \omega_0 t + \int_0^t \Delta\omega dt,$$

а мгновенная частота будет равна:

$$\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = \omega_0 + \Delta\omega(t).$$

Пусть модулирующий сигнал  $v(t)$  воздействует на мгновенную частоту так, что  $\Delta\omega(t) = K_{\text{ЧМ}} v(t)$ . Здесь  $K_{\text{ЧМ}}$  – крутизна ЧМ или коэффициент преобразования «напряжение-частота».

Если

$$v(t) = V_m \cos \Omega t, \text{ то } \Delta\omega(t) = K_{\text{ЧМ}} V_m \cos \Omega t = \omega_{\text{д}} \cos \Omega t,$$

где  $\omega_{\text{д}} = K_{\text{ЧМ}} V_m$  – так называемая девиация частоты (ее максимальное отклонение).

Тогда получим:

$$\theta(t) = \int_0^t \Delta\omega dt = \frac{\omega_{\text{д}}}{\Omega} \sin \Omega t \Rightarrow u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \omega_{\text{д}} \sin \Omega t). \quad (2)$$

Модуляція частоти в межах  $\pm \omega_d$  чистим тоном частоти  $\Omega$  є модуляція фази в межах  $\pm \frac{\omega_d}{\Omega}$  тем же тоном. Величина  $m = \frac{\omega_d}{\Omega} = \theta_{\max}$  – індекс ЧМ (максимальне відхилення фази), він визначається тільки девицією  $\omega_d$  і модулюючою частотою  $\Omega$  [5].

**Реалізація моделі модуляції з допомогою системи MATLAB/SIMULINK.**

Промоделируем АМ процесс РТС специальной связи, используя систему MATLAB + SIMULINK [6]. Обосновав математическую модель для процесса АМ, получим функциональные схемы на рис. 1 и рис. 3, где процесс модуляции происходит по закону  $S_{AM}(t) = A_0(1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ . В этих схемах можно изменять исходные параметры модуляции и выводить результаты в графическом виде на экран блока – осциллографа. На рис. 2 и рис. 4 изображены осциллограммы для процесса АМ с параметрами:  $m$  – коэффициент глубины АМ,  $\omega$  – несущая частота (Гц),  $\Omega$  – модулирующая частота (Гц),  $A_0$  – амплитуда несущего сигнала (В).

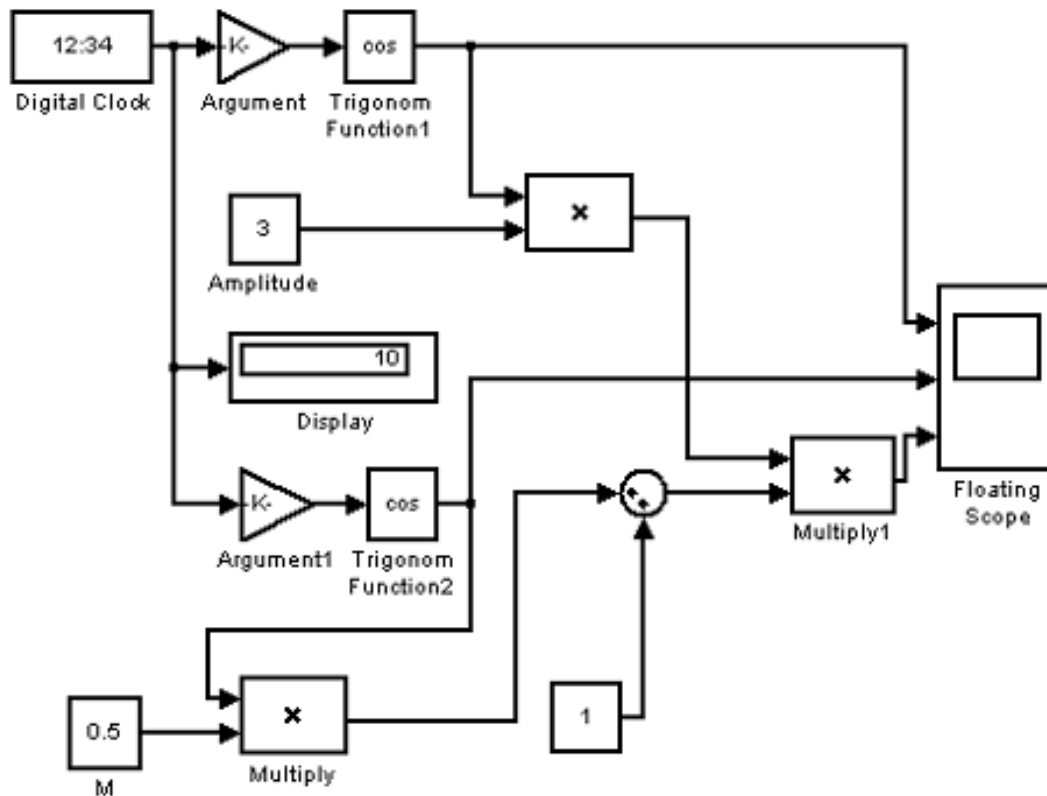


Рис. 1. Функциональная схема модели АМ сигнала с параметрами:  
 $m = 0,5$  ;  $\omega = 1000$  Гц;  $\Omega = 300$  Гц;  $A_0 = 3$  В

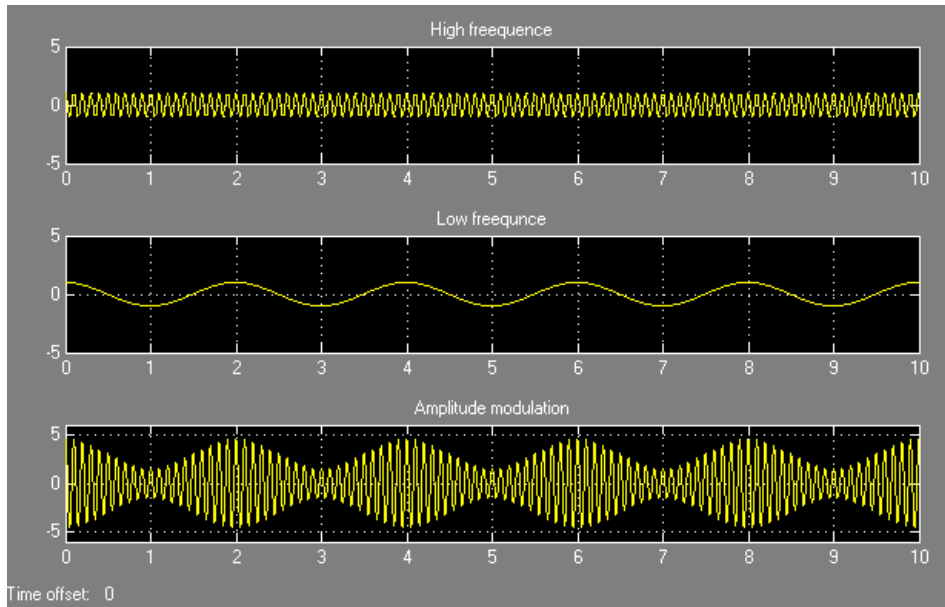


Рис. 2. Осциллограммы АМ сигнала  
( $m = 0,5$ ;  $\omega = 1000$  Гц;  $\Omega = 300$  Гц;  $A_0 = 3$  В)

В реальных системах радиосвязи имеется, как правило, не одно гармоническое колебание, а несколько. Кроме того, речевой сигнал имеет случайный характер и от шума он отличается только тем, что несет полезную информацию, а шумы создают некоторый дискомфорт при прослушивании и затрудняют обработку полезной информации.

Промоделируем АМ процесс для нескольких синусоидальных колебаний. Обосновав математическую модель для процесса АМ, получим функциональную схему (рис. 3) и осциллограммы (рис. 4), где процесс АМ происходит по закону:

$$S_{AM}(t) = A_0 [1 + m(a_1 \cos \Omega_1 t + a_2 \cos \Omega_2 t + \dots + a_n \cos \Omega_n t)] \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (3)$$

В данном случае ограничимся четырьмя слагаемыми в формуле (3).

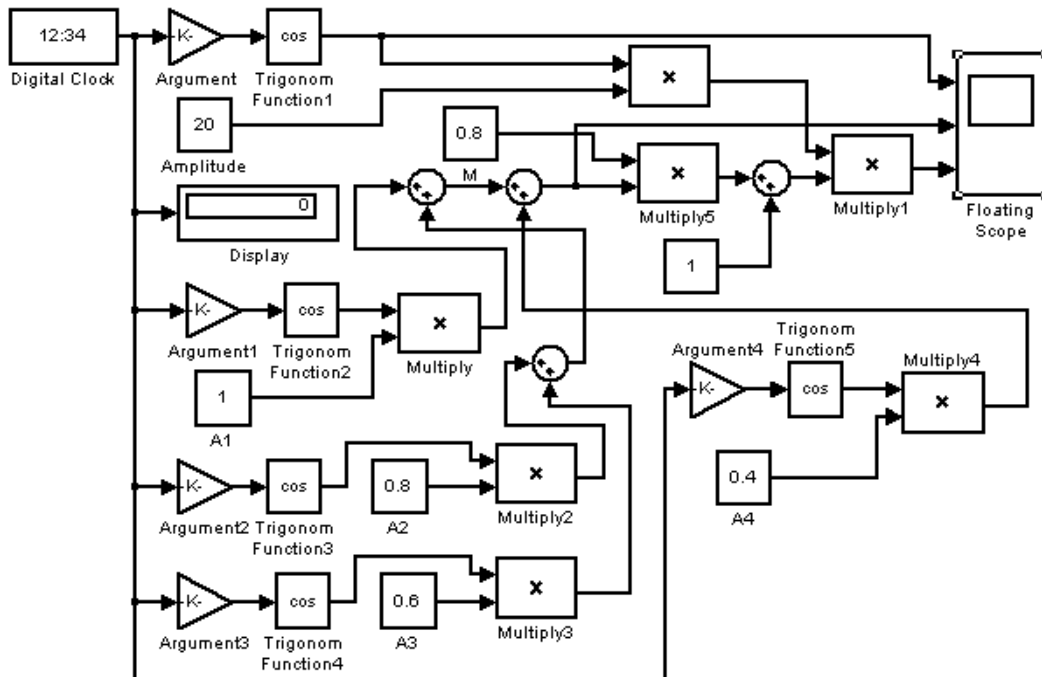


Рис. 3. Функциональная схема модели АМ сигнала с параметрами:

$m = 0,8$ ;  $\omega = 100$  кГц;  $\Omega_1 = 300$  Гц;  $\Omega_2 = 600$  Гц;  $\Omega_3 = 1000$  Гц;  $\Omega_4 = 2000$  Гц;  $A_0 = 20$  В

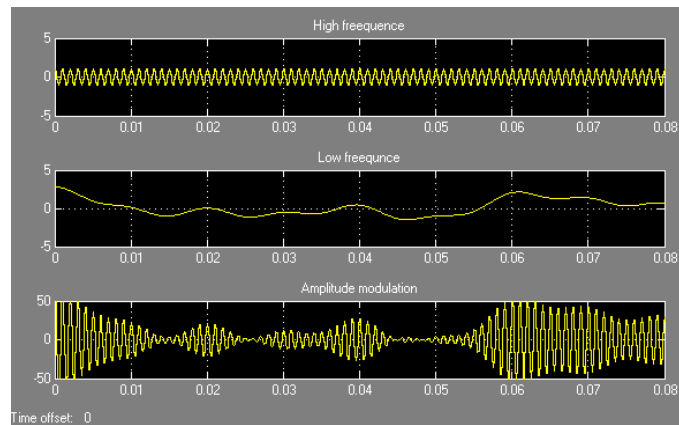


Рис. 4. Осциллограммы АМ сигнала

( $m = 0,8$ ;  $\omega = 100$  кГц;  $\Omega_1 = 300$  Гц;  $\Omega_2 = 600$  Гц;  $\Omega_3 = 1000$  Гц;  $\Omega_4 = 2000$  Гц;  $A_0 = 20$  В)

Для процесса ЧМ, который происходит по закону (2), обоснована функциональная схема (рис. 5). На рис. 6 изображена осциллограмма для процесса ЧМ с параметрами:  $\omega_d$  – коэффициент девиации частоты;  $\omega_0$  – несущая частота (Гц);  $\Omega$  – частота модулирующего сигнала (Гц);  $U_m$  – амплитуда модулируемого сигнала (В).

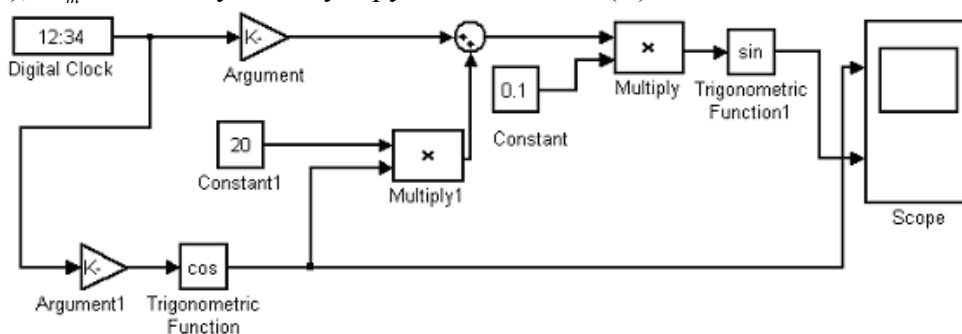


Рис. 5. Функциональная схема модели ЧМ сигнала

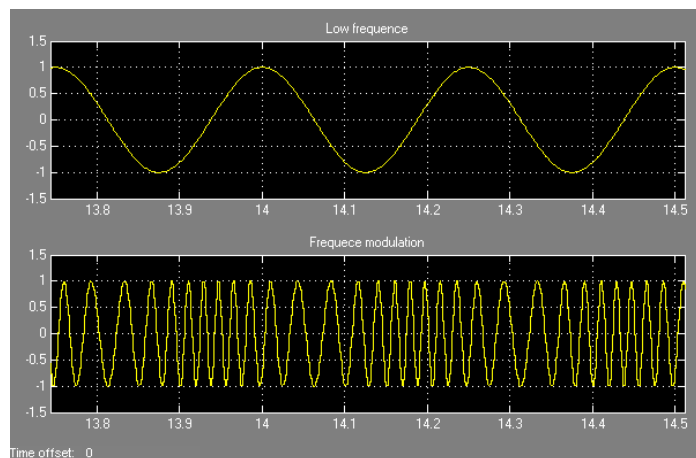


Рис. 6. Осциллограммы ЧМ сигнала

( $\omega_d = 0,2$ ;  $\omega_0 = 10000$  Гц;  $\Omega = 200$  Гц;  $U_m = 20$  В)

Для процесса передачи дискретных сообщений по ЧМ каналу, который происходит по закону (2), обоснована функциональная схема (рис. 7). На рис. 8 изображена осциллограмма для этого процесса с параметрами:  $\omega_d$  – коэффициент девиации частоты;  $\omega_0$  (Гц) – несущая частота;  $\Omega$  – частота следования (Гц);  $U_m$  – амплитуда модулируемого сигнала (В).

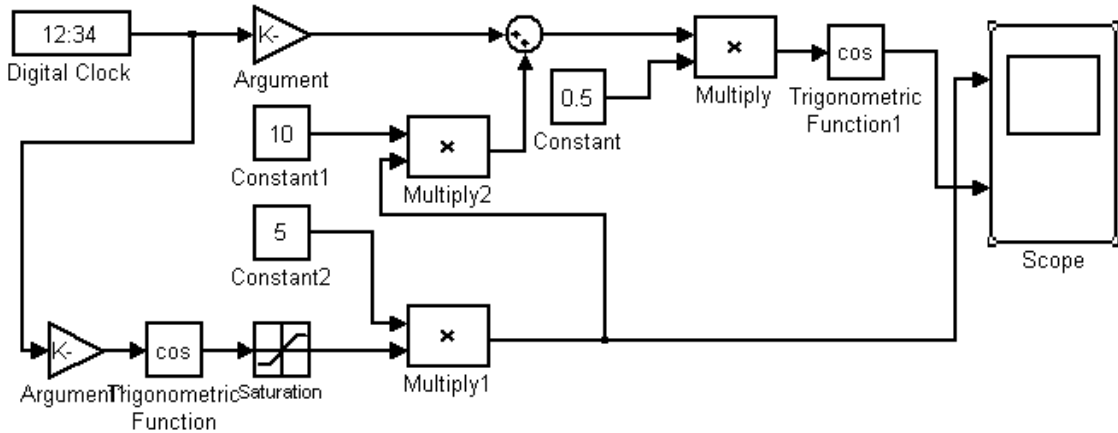


Рис. 7. Функциональная схема модели для процесса передачи дискретных сообщений по ЧМ каналу

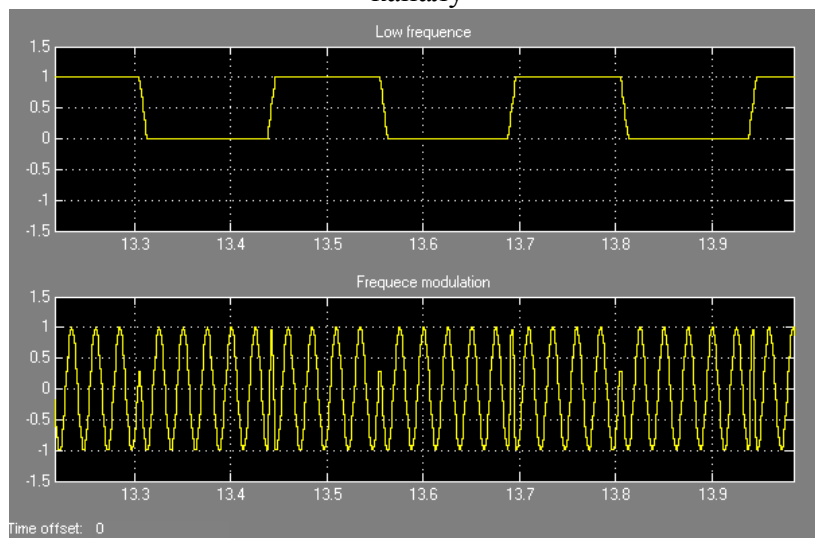


Рис. 8. Осциллограммы процесса передачи дискретных сообщений по ЧМ каналу ( $\omega_d = 0,2$ ;  $\omega_0 = 10000$  Гц;  $\Omega = 200$  Гц;  $U_m = 20$  В)

### Выводы.

С помощью компьютерного приложения MATLAB/SIMULINK реализованы функциональные схемы для процессов АМ и ЧМ в авиационных РТС специальной связи. В предложенных схемах можно изменять параметры модуляционных процессов и строить графические изображения исследуемых процессов. Кроме того, возможен анализ спектра исследуемого модулированного сигнала с помощью предложенных моделей.

Таким образом, предложенные математические модели процессов аналоговой модуляции и схемы моделей можно использовать для проведения экспериментов при разработке, проектировании и эксплуатации систем радиосвязи и передачи шифрованных данных.

### Литература

1. *Малецький І.К., Захаров Д.М., Левчук А.Н.* Моделирование процессов авиационных РТС // Проблемы транспорта. Збірник наук. пр. – К.: НТУ, Вип. 6. – 2009. – С.213.
2. *Габрусенко Є.І., Захаров Д.М.* Моделювання зони покриття базової станції стільникового зв'язку // Електроніка та системи управління, 2008, № 2 (16). – С 133-137.
3. *Андрусак А.І., Дем'янчук В.С., Юр'єв Ю.М.* Мережа авіаційного електрозв'язку. – К.: НАУ, 2001. – 448с.
4. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 604с.
5. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы [учеб. для вузов]. – М.: Высшая школа, 1988. – 448с.
6. *Дьяконов В.П.* MATLAB 6.5 SP/7+ Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. –576с.

Надійшла: 15.03.11

Рецензент: д.т.н., проф. Давлет'янц О. І.