

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЗВЕНЬЯХ

© 2025 г. П. С. Мартынов^{a,*}

^a Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук
Россия, 117342, Москва, ул. Бутлерова, 15

* e-mail: La3232@mail.ru

Поступила в редакцию 24.09.2024 г.

После доработки 08.11.2024 г.

Принята к публикации 19.11.2024 г.

Представлено описание методики разработки аналоговых электронных узлов с использованием необходимых звеньев и ее применение для конкретных задач. Приводится обоснование важности предлагаемой методики для создания радиотехнических систем. Применение теоретических расчетов позволяет осуществлять синтез аналоговых устройств и проводить необходимые экспериментальные исследования.

DOI: 10.31857/S0032816225020071, EDN: GJUDVN

1. ВВЕДЕНИЕ

Для развития радиоэлектроники на сегодняшний день требуются новые научные и практические решения в области усовершенствования элементной базы, в частности для снижения времени и трудоемкости разработки аналоговых устройств. Цифровая радиоэлектроника за последние десятилетия практически полностью вытеснила аналоговую, развитее новых научных и практических решений в этой области электроники является актуальной задачей. Основная идея данной работы заключается в модернизации существующей элементной базы (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и т. д.). Для этого необходима замена некоторых элементов, которые можно будет использовать для реализации электронных схем и узлов. Предлагается использовать элементную базу, которая состоит из пяти звеньев теории автоматического управления (ТАУ) и включает в себя дифференцирующие и интегрирующие звенья, пропорциональное звено, звено сложения или умножения и звено мультиплексирования (соединения или разъединения). Данная теория создает возможность для реализации перепрограммируемых аналоговых микросхем (ПАИС) и матричных аналоговых боль-

ших интегральных схем. В России исследование в этом направлении прекратилось в начале 90-х годов, и провести практические исследования в этом направлении практически невозможно. Однако в США ряд ведущих компаний ведет разработки в этом направлении и выпускает аналоговые интегральные микросхемы, которые по принципу работы схожи с отечественными элементами. К примеру, программируемые аналоговые интегральные микросхемы выпускает компания Fast Analog Solution, где каждая ячейка состоит из операционного усилителя и согласующих цепей обратной связи.

Для синтеза аналоговых устройств были приняты методы, которые позволяют при первоначальных заданных параметрах системы, характеристиках воздействий, ограничениях и взаимосвязях определить структурную схему и математическую модель в виде передаточной характеристики, по которой в дальнейшем можно будет определить функционально-структурную схему и основные параметры разрабатываемого устройства. Таким образом, задача синтеза устройства разделена на задачу получения передаточной функции по заданным параметрам и задачу синтеза функционально-структурной схемы по передаточной функции [1, 2].

По результатам анализа литературных источников [1–3] было сделано заключение о том, что для реализации новой методики проектирования необходим математический аппарат на основе применения систем дифференциальных уравнений, которые будут описывать базовые аналоговые устройства. Это позволит выделить наиболее часто встречающиеся математические функции и рассматривать их в качестве элементарных звеньев [1, 3, 4].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В связи с недоступностью требуемой элементной базы для проектирования ПАИС было предложено реализовать эти идеи на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), где синтезированные электрические схемы будут работать на цифровой элементной базе по аналоговому прототипу с возможностью многократного обновления управляющей программы для этой микросхемы. Работа цифрового устройства по аналоговому прототипу подразумевает использование управляющего кода, в котором программно будут реализованы аналоговые устройства из элементарных звеньев. Программный код, который реализован на языках программирования Verilog или VHDL, пред-

ставляет собой эквивалентную электрическую схему из элементарных звеньев для дальнейшего перепрограммирования в память микросхемы ПЛИС. Схема данного процесса представлена на рис. 1. При проведении успешных экспериментальных исследований данная методика может применяться для проектирования аналоговых устройств, которые необходимы для современных радиотехнических систем.

Элементарные звенья могут быть представлены в виде дифференциального уравнения, передаточной функцией или структурной матрицей [2, 5]. Математическое описание элементарных звеньев приведено в табл. 1.

Дифференциальные уравнения в теории автоматического управления (ТАУ) применяются для составления передаточных функций, которые обычно используют для описания систем автоматического управления (САУ). Кроме того, передаточная функция может применяться для составления структурной схемы САУ. В большинстве случаев на основе структурной матрицы осуществляется синтез схем в САУ. Теория структурных матриц изложена в работе [1].

В связи с тем, что предлагаемая методика довольно объемная и нет возможности полностью представить ее в рамках данной публикации, рассмотрим пример составления структурной

Таблица 1. Описание элементарных звеньев

Звено	Дифференциальное уравнение	Передаточная функция	Структурная матрица
Пропорциональное	$y(t) = ku(t)$	$\frac{y(s)}{u(s)} = W(s) = k$	$\frac{u(t)}{k} = \frac{y(t)}{1}$
Интегрирующее	$\frac{dy(t)}{dt} = ku(t)$, или $py = ku$	$W(s) = \frac{k}{s}$	$\frac{u(t)}{k} = \frac{y'(t)}{1}$
Дифференцирующее	$y(t) = k \frac{du(t)}{dt}$, или $y = kru$	$W(s) = ks$	$\frac{u'(t)}{k} = \frac{y(t)}{1}$



Рис. 1. Схема процесса использования ПЛИС для реализации радиотехнических систем.

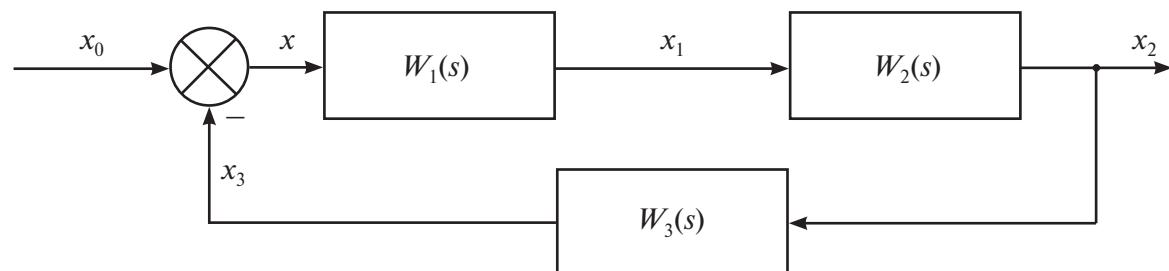


Рис. 2. Структурная схема из передаточных функций.

матрицы. На рис. 2 представлена САУ в виде структурной схемы, которая состоит из передаточных функций W_1 , W_2 , W_3 .

Представленная на рисунке структурная схема САУ будет описываться системой уравнений

$$\begin{cases} x_1 = W_1(x_0 + x_3), \\ x_2 = W_2 x_1, \\ x_3 = -W_3 x_2. \end{cases} \quad (1)$$

С использованием правил преобразования структурных схем перепишем общую передаточную функцию замкнутого контура в следующем виде:

$$W(s) = \frac{W_1 W_2}{1 + W_1 W_2 W_3}. \quad (2)$$

Передаточную функцию каждого звена можно представить как отношение $R(s)/Q(s)$, где $R(s)$, $Q(s)$ – полиномы. Опустив краткость оператора s и используя преобразование Лапласа, можно записать выражение в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_2 = W(s)x_0 &= \frac{W_1 W_2}{1 + W_1 W_2 W_3} x_0 = \\ &= \frac{R_1 R_2 / Q_1 Q_2}{1 + R_1 R_2 R_3 / Q_1 Q_2 Q_3} = \frac{R_1 R_2 Q_3}{R_1 R_2 R_3 + Q_1 Q_2 Q_3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Далее на основе полученного выражения (3) составляется структурная матрица системы, которая представлена в табл. 2.

Таблица 2. Структурная матрица

x_1	x_2	x_3	x_0	\Rightarrow	x_1	x_2	x_3	x_0
1		W_1	W_1		Q_1		R_1	R_1
W_2	1				R_2	Q_2		
$-W_3$	1					$-R_3$	Q_3	

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для подтверждения теоретических положений и методики разработки аналоговых устройств из элементарных звеньев была разработана отладочная плата. Устройство представляет собой печатный узел, основными элементами которого являются аналого-цифровой преобразователь (АЦП), ПЛИС и цифро-анalogовый преобразователь (ЦАП), а также вспомогательные электронные компоненты. Данный узел позволяет имитировать работу аналогового устройства, что является важным критерием для подтверждения работоспособности новой элементной базы. Для достижения поставленных результатов была выбрана микросхема ПЛИС модели Altera EPM7064AE. Фотография внешнего вида печатного узла представлена на рис. 3.

Входной аналоговый сигнал поступает на АЦП и преобразуется в 12-разрядный цифровой код, который далее поступает на ПЛИС.

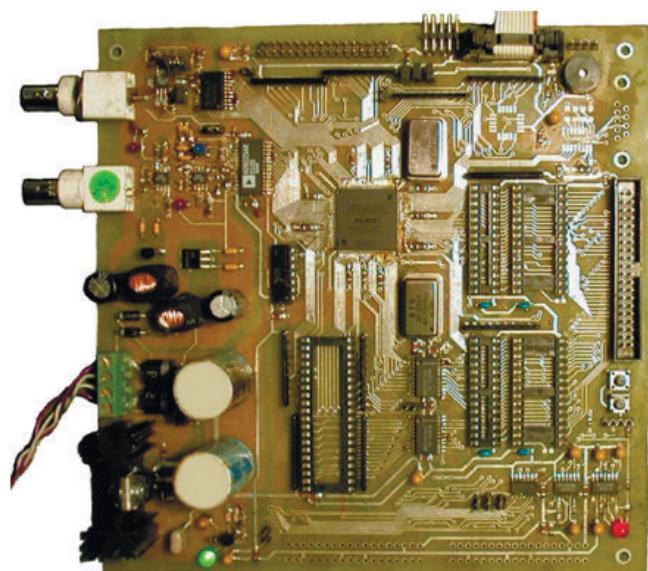


Рис. 3. Макет печатного узла для проведения исследований.

В ПЛИС происходит обработка данных с учетом управляющей программы. Затем сигнал поступает на ЦАП, в котором происходит преобразование в аналоговый сигнал. Выход устройства, к примеру, может быть подключен к измерительным приборам (осциллограф, частотомер и т. п.).

Предлагаемую методику проектирования для лучшего восприятия можно рассмотреть на примере реализации какого-либо аналогового устройства из элементарных звеньев электроники. Для этого рассмотрим Т-образный фильтр нижних частот, электрическая схема которого представлена на рис. 4. На конечном этапе синтеза должна быть получена модель исследуемого фильтра для возможности реализации ее на макетной плате и получения экспериментальных результатов.

Были выбраны следующие параметры схемы: $R_s = 1 \text{ кОм}$, $L_1 = 500 \text{ мкГн}$, $L_2 = 10 \text{ мкГн}$, $L_3 = 500 \text{ мкГн}$, $R_h = 100 \text{ кОм}$, $C_1 = 0.2 \text{ мкФ}$. Преобразуем схему, добавив источник тока I , для дальнейшего анализа-синтеза и нахождения передаточной функции (рис. 5).

Далее необходимо составить матрицу проводимости этой схемы, используя метод узловых потенциалов:

Используя математические преобразования, перейдем от матрицы (5) к системе уравнений

$$\begin{cases} U_1 \left(G_u + \frac{1}{s} L_1 \right) - \frac{1}{s} L_1 U_2 = I, \\ -U_1 \frac{1}{s} L_1 + U_2 \left(\frac{1}{s} L_1 + \frac{1}{s} L_3 + sC_1 \right) - U_3 sC_1 - U_4 \frac{1}{s} L_3 = 0, \\ -U_2 sC_1 + U_3 \left(\frac{1}{s} L_2 + sC_1 \right) = 0, \\ -U_2 \frac{1}{s} L_3 + U_4 \left(\frac{1}{s} L_3 + G_h \right) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

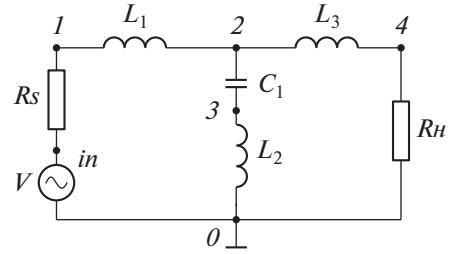


Рис. 4. Схема Т-образного фильтра нижних частот.

$$\begin{bmatrix} G_u + \frac{1}{s} L_1 & -\frac{1}{s} L_1 & 0 & 0 & -G_u \\ -\frac{1}{s} L_1 & \frac{1}{s} L_1 + sC_1 + \frac{1}{s} L_3 & -sC_1 & -\frac{1}{s} L_3 & 0 \\ 0 & -sC_1 & \frac{1}{s} L_2 + sC_1 & 0 & -\frac{1}{s} L_2 \\ 0 & -\frac{1}{s} L_3 & 0 & G_h + \frac{1}{s} L_3 & -G_h \\ -G_u & 0 & -\frac{1}{s} L_2 & -G_h & G_u + G_h + \frac{1}{s} L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Поскольку потенциал на пятом узле равен 0, $U_5 = 0$, следовательно, вычеркиваются последний столбец, последняя строка и получается следующая матрица проводимости:

$$\begin{bmatrix} G_u + \frac{1}{s} L_1 & -\frac{1}{s} L_1 & 0 & 0 & \\ -\frac{1}{s} L_1 & \frac{1}{s} L_1 + sC_1 + \frac{1}{s} L_3 & -sC_1 & -\frac{1}{s} L_3 & \\ 0 & -sC_1 & \frac{1}{s} L_2 + sC_1 & 0 & \\ 0 & -\frac{1}{s} L_3 & 0 & G_h + \frac{1}{s} L_3 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

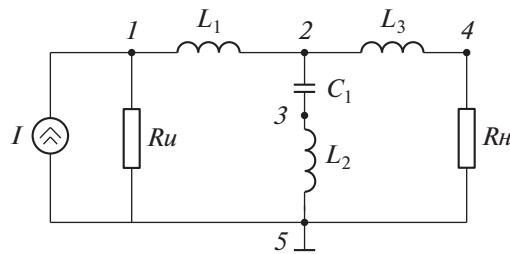


Рис. 5. Модель Т-образного фильтра низких частот.

На следующем этапе из системы (6) найдем выражения для узловых потенциалов U_1, U_2, U_3, U_4 :

Полученная выше система уравнений состоит из суммы передаточных функций, это позволяет воспроизвести структурную схему фильтра низких частот из элементов ТАУ, которая изображена на рис. 6.

Полиномы передаточных функций структурной схемы фильтра, размещенных в прямоугольниках, должны быть преобразованы к стандартному виду, для этого необходимо применить метод разложения многочленов до элементарных звеньев [1, 2, 6]. Представить всю процедуру разложения не представляется возможным,

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = \frac{I + \frac{1}{s} L_1 U_2}{G_u + \frac{1}{s} L_1}, \\ U_2 = \frac{U_1 \frac{1}{s} L_1}{\frac{1}{s} L_1 + \frac{1}{s} L_3 + s C_1} + \frac{U_3 s C_1}{\frac{1}{s} L_1 + \frac{1}{s} L_3 + s C_1} + \frac{U_4 \frac{1}{s} L_3}{\frac{1}{s} L_1 + \frac{1}{s} L_3 + s C_1}, \\ U_3 = \frac{U_2 s C_1}{\frac{1}{s} L_2 + C_1}, \\ U_4 = \frac{U_2 \frac{1}{s} L_3}{\frac{1}{s} L_3 + G_H}. \end{array} \right\} \quad (7)$$

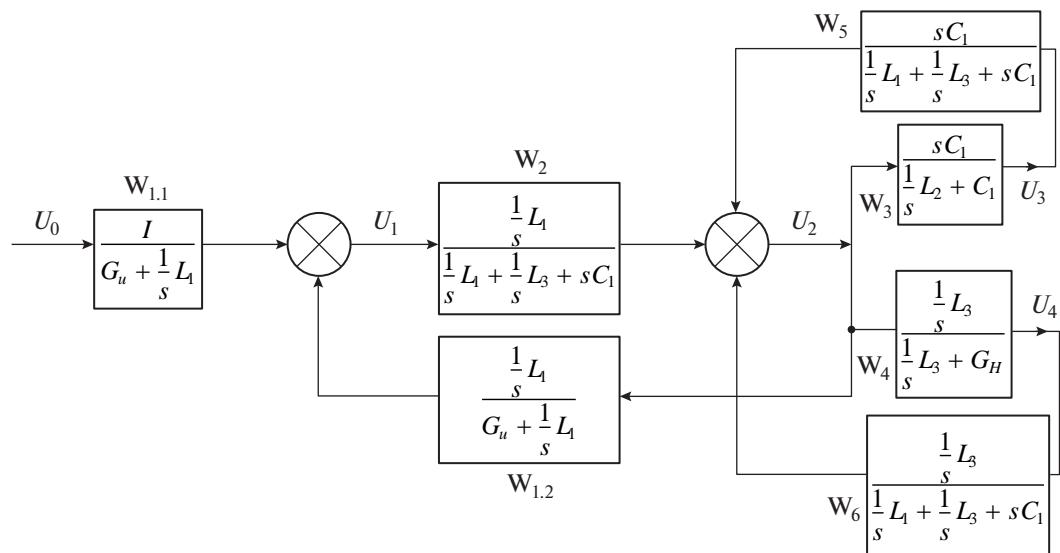


Рис. 6. Структурная схема фильтра из передаточных функций.

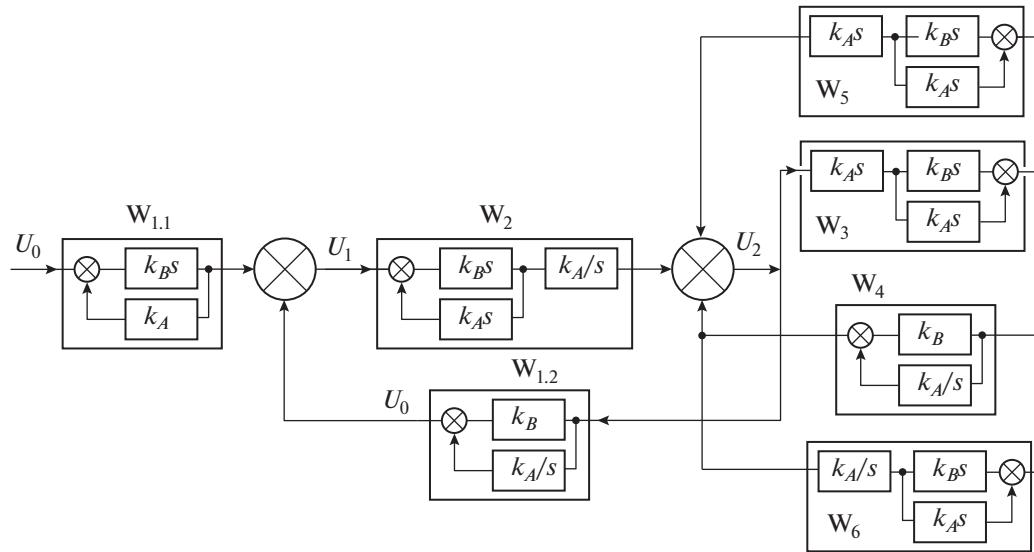


Рис. 7. Структурно-принципиальная схема фильтра нижних частот.

более подробное описание было приведено в работе [7]. После проведения декомпозиции сформировалась структурно-принципиальная схема Т-образного фильтра нижних частот, которая изображена на рис. 7.

Структурно-принципиальная схема состоит из набора элементарных звеньев, которые необходимо программно реализовать с применением языка программирования Verilog или VHDL для дальнейшего перепрограммирования в микросхему ПЛИС и проведения исследований на макетной плате [8, 9]. Схема эксперимента представлена на рис. 8, где персональный компьютер (ПК), генератор сигналов и измеритель АЧХ были подключены к макету печатного узла.

На вход макета с генератора подавался аналоговый сигнал, в ПЛИС происходила его обработка в цифровой. Далее сигнал преобразовывался обратно в аналоговый и поступал на вход измерителя АЧХ. В результате была получена частотная характеристика фильтра, которая представлена на рис. 9.

4. ОБСУЖДЕНИЯ

Стоит отметить, что в данной методике проектирования используются элементарные звенья аналоговой электроники, которые являются прототипами элементов ТАУ. Однако в силу того, что в настоящее время применять нестандартную

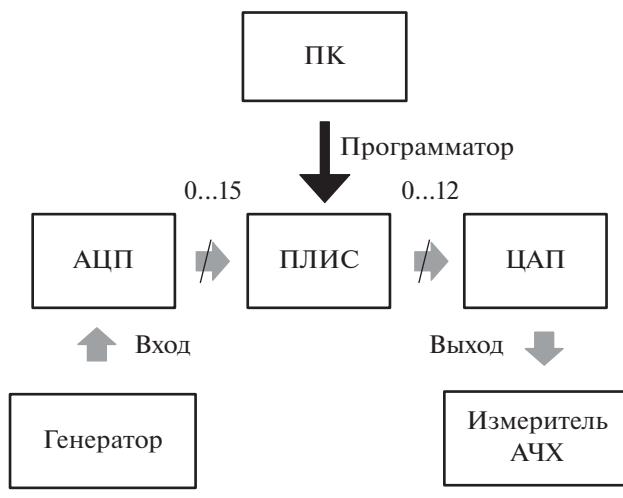


Рис. 8. Схема эксперимента.

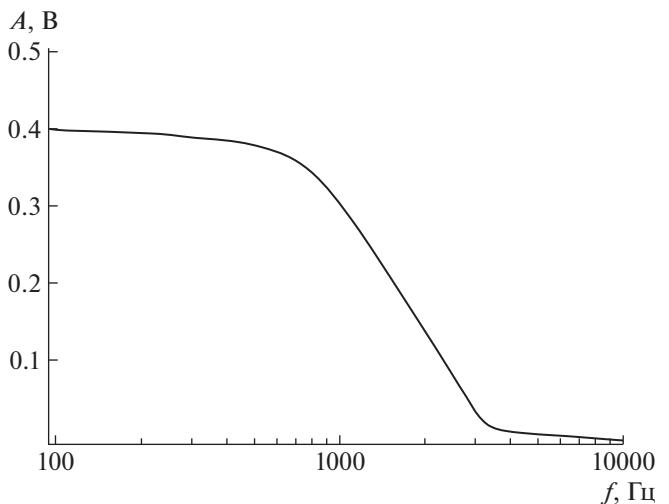


Рис. 9. Частотная характеристика фильтра.

элементную базу на производстве не представляется возможным, для подтверждения достоверности результатов была выбрана микросхема ПЛИС, которая является цифровой. Поэтому в результате эксперимента можно программно синтезировать устройства, которые работают по аналоговому алгоритму. Это позволит получить новые научные и практические результаты в создании отечественных ПАИС и развитии радиотехнических систем.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе успешно проведены экспериментальные исследования, предлагаемую методику можно использовать в научных и практических целях. Таким образом, в результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1) описана методика разработки радиотехнических устройств с применением элементарных звеньев на примере аналоговых фильтров;

2) в процессе макетирования были написаны управляющие программы для ПЛИС, которые описывают алгоритм работы фильтров;

3) данная методика позволяет реализовать структурно-принципиальную схему аналогового устройства на предлагаемой элементной базе с использованием системы уравнений, состоящей из передаточных функций;

4) предложенная теория дает возможность для научных и практических работ в области создания ПАИС.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа была выполнена в НТЦ УП РАН в рамках государственного задания № FFNS-2022-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишин Г.Т. Естественно-научные основания аналоговой микроэлектроники. Москва: МИЭМ, 2003.
2. Мишин Г.Т. // Наукоемкие технологии. 2004. Т. 5. № 2–3. С. 85.
3. Харкевич А.А. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва: Наука, 1965.
4. Мишин Г.Т. // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2004. № 4. С. 26.
5. Мальцев П.П., Домрачев В.Г., Новаченко И.В., Пономарев С.Н. Базовые матричные кристаллы и матричные БИС. Москва: Энергоиздат, 1992.
6. Топчеев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. Москва: Машиностроение, 1989.
7. Martyanov P.S. // WECONF conference proceedings. St. Petersburg, Russia, 2019. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/WECONF.2019.8840645>.
8. Martyanov P.S. // J. Commun. Technol. Electr. 2018. V. 63. P. 1335.
<http://doi.org/10.1134/S1064226918110049>.
9. Martyanov P.S. // J. Commun. Technol. Electr. 2022. V. 67. P. 1039.
<https://doi.org/10.1134/S1064226922080113>.