

рованием в среде ADS позволит разработать удобные методики проектирования АГКК рассмотренного здесь типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голуб В. Квадратурные модуляторы и демодуляторы в системах радиосвязи // Электроника: наука, технология, бизнес.— 2003.— № 3.— С. 28–32.
2. ElSayed A., Elmary M. Low-phase noise LC quadrature VCO using coupled tank resonators in a ring structure // IEEE J. Solid-State Circuits.— Apr. 2001.— Vol. 36, № 4.— P. 701–705.
3. Andreani P., Bonfanti A., Romano L., Samori C., Analysis and design of a 1.8-GHz CMOS LC quadrature VCO // IEEE J. Solid-State Circuits.— Dec. 2002.— Vol. 37, № 12.— P. 1737–1747.
4. Chamas I.R., Raman S. A comprehensive analysis of quadrature signal synthesis in cross-coupled RF VCOs // IEEE Trans. Circuits Syst. 1, Reg. papers.—2007.— Vol 54, № 4.— P. 689–704.
5. Кулешов В.Н., Кочемасов Д.В. Флуктуации в кольцевых автогенераторах квадратурных колебаний с одноконтурными цепями межкаскадной связи // Электросвязь.— 2014.— № 5.— С. 34–38.
6. Жалуд В., Кулешов В.Н. Шумы в полупроводниковых устройствах.— М.: Сов.Радио, 1977.— 416 с.

Получено 23.03.15

УДК 621.373: 621.391.822

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ RC-AВТОГЕНЕРАТОРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Е. М. Дроздова, аспирант НИУ «МЭИ»; drozdovaEM1989@mail.ru
Т. И. Болдырева, доцент НИУ «МЭИ», к.т.н.; boldyrevati@yandex.ru
В. Н. Кулешов, профессор НИУ «МЭИ», д.т.н.; vnk37@mail.ru

Представлены результаты сравнительного анализа двух вариантов построения RC-автогенераторов гармонических колебаний: автогенератора (АГ) с мостом Вина в цепи положительной обратной связи (ПОС) и АГ на дифференциальном усилителе с двойным Т-образным мостом в цепи отрицательной обратной связи (ООС) и диодным ограничителем в цепи ПОС. Приведены результаты моделирования обоих генераторов в среде ADS и экспериментального исследования АГ с двойным Т-образным мостом.

Ключевые слова: RC-автогенератор, мост Вина, режекторный фильтр, двойной Т-мост, фазовые (ФМ) шумы, нелинейные искажения.

Введение. Автогенераторы гармонических колебаний (АГ) с RC-цепями обратной связи (ОС) (далее RC-АГ) широко применяются в измерительных приборах, медицинской технике и датчиках. Их конкретные схемы исследовались отечественными и зарубежными специалистами [1, 2]. В ряде приложений решение вопроса о целесообразности использования таких АГ зависит от уровней фазовых (ФМ) шумов и нелинейных искажений выходных колебаний.

При исследовании однокольцевых АГ с RC-фильтрами в цепях ОС [3] с помощью метода укороченных символических уравнений С.И. Евтянова [4] было показано, что по уровням ФМ-шумов наилучшим в этом классе RC-АГ является АГ с мостом Вина. В [5] для RC-АГ, построенного на дифференциальном усилителе, моделью которого стал преобразователь напряжения в напряжение (ПНН) с режекторным фильтром (РФ) в виде двойного Т-моста (ТТ-моста) в цепи ООС и ограничителем амплитуды колебаний в цепи ПОС, получены формулы для расчета уровней фазовых и амплитудных шумов и приведен пример количественной оценки этих шумов.

Цель работы: сравнить RC-АГ с РФ в виде ТТ-моста и RC-АГ с мостом Вина по уровням ФМ-шумов, рассчитанных методом С.И. Евтянова; проверить полученные

результаты путем моделирования реальных схем RC-АГ в пакете ADS (где расчет шумов выполняется полигармоническим методом); сравнить эти АГ по уровням нелинейных искажений, рассчитанных методом моделирования, а также расчетные уровни ФМ-шумов с результатами экспериментов.

Общие и укороченные символические уравнения RC-АГ. Схемы рассматриваемых генераторов представлены на рис. 1. АГ с мостом Вина (рис. 1, а) описывается символическим уравнением для напряжения u на входе усилителя [3]:

$$u = K_{\text{цос}}(p)K_U V(u) + u_{\text{шцос}}, \quad (1)$$

где $K_U > 0$ — коэффициент усиления линейного усилителя; $K_{\text{цос}}(p)$ — символический коэффициент передачи ЦОС по напряжению, являющийся функцией оператора $p = d/dt$; $V(u)$ — нормированная нечетная функция входного напряжения, характеризующая нелинейность усилителя (в конкретных примерах используется функция $V(u) = u(1 - u^2 / U_x^2)$, где U_x — характеристическое напряжение, определяющее вес нелинейной составляющей функции $V(u)$); $u_{\text{шцос}}$ — источник тепловых шумов цепи ОС.

В RC-АГ (рис. 1, б) с ТТ-мостом в цепи ООС дифференциальный ПНН может рассматриваться как узкополосный усилитель, автоколебания в котором возникают и стабилизируются по амплитуде за счет нелинейной ПОС (рис. 2).

Общее символическое уравнение АГ с ТТ-мостом (рис. 1, б) имеет вид [5]:

$$u = k(p)[V(u) + k_{oc}^{-1}u_{\text{ш}}], \quad (2)$$

где

$$k(p) = \frac{(pT_m)^2 + 4(pT_m) + 1}{(pT_m)^2 + \delta(pT_m) + 1} \frac{k_{oc}}{1 + K_U^{-1}}$$

— символический коэффициент усиления по кольцу ПОС, записанный с учетом влияния ОС через инвертирующий

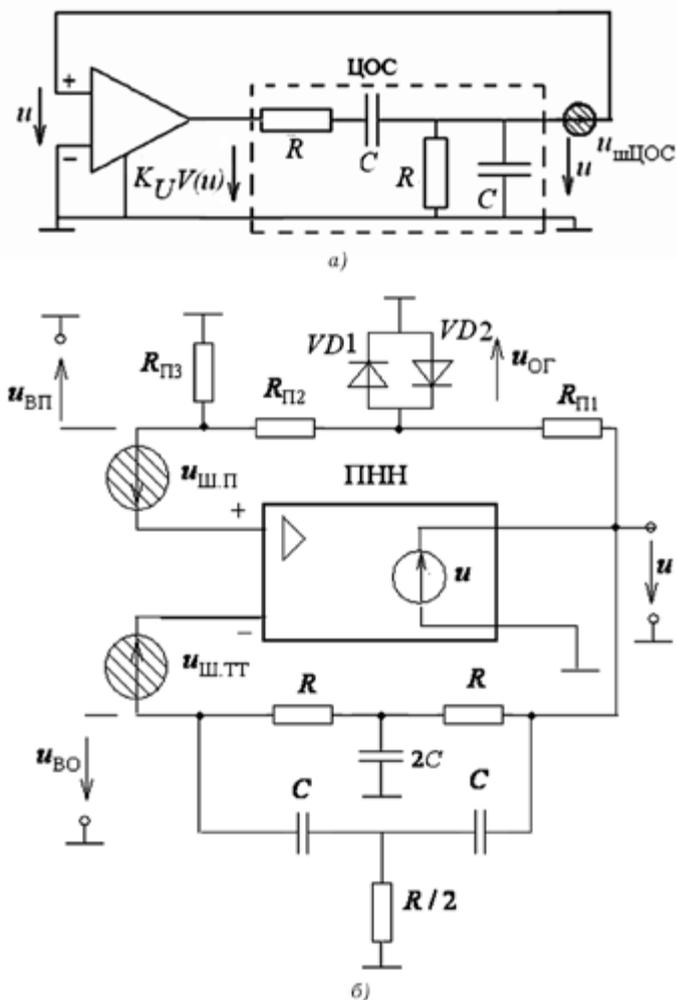


Рис. 1

вход и ТТ-мост; $K_U > 0$ — коэффициент усиления линейного усилителя; $\delta = 4 / (K_U + 1)$ — эквивалентное затухание, определяющее полосу кольца ПОС; $u_{ш} = u_{ш.п} - u_{ш.тг}$ — суммарное шумовое напряжение на входе ПНН ($u_{ш.п}$ и $u_{ш.тг}$ — аддитивные с напряжениями ОС тепловые шумовые на-

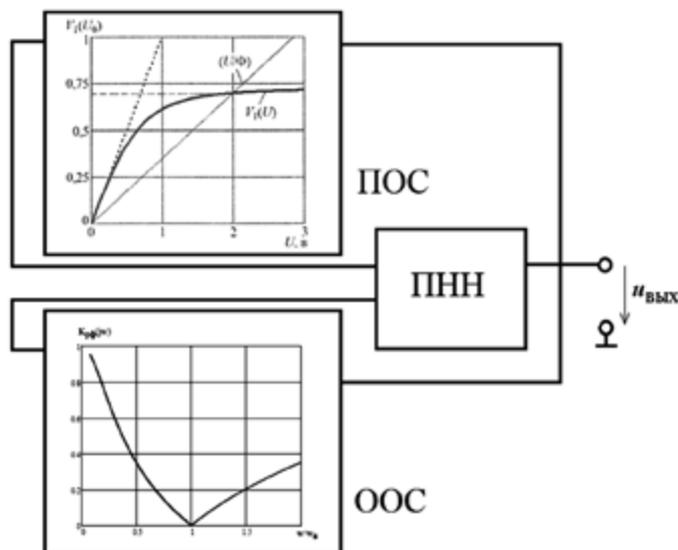


Рис. 2

пряжения цепей ОС); $T_m = RC$ — постоянная времени, характеризующая частотные свойства ТТ-моста; $k_{ос} = R_{п3} / (R_{п1} + R_{п2} + R_{п3})$ — коэффициент передачи цепи ПОС для малых колебаний, при которых диоды $VD1$ и $VD2$ в амплитудном ограничителе не открываются; $V(u)$ — нормированная нечетная функция выходного напряжения ПНН, характеризующая нелинейность цепи ПОС.

Формулы для расчета спектральной плотности мощности (СПМ) ФМ-шумов. При анализе СПМ ФМ-шумов учитывались только естественные шумовые источники — тепловые шумы цепей ОС. В [6, 7] было показано, что при построении АГ на дифференциальном усилителе вклад шумов биполярных транзисторов (БТ) в суммарные уровни ФМ-шумов выходного колебания не превышает 1–2 дБн/Гц. Для расчета СПМ флуктуаций фазы автоколебаний в [3, 5] получены формулы:

- для RC-АГ с мостом Вина:

$$S_{ФВ}(F) = \frac{f_B^2}{(2/3)^2 F^2} \cdot \frac{8k_B T^0 [R/3]}{(U_{ст}/3)^2}; \tag{3}$$

- для RC-АГ с режекторным фильтром:

$$S_{ФРФ}(F) = \frac{f_B^2}{[(1 + K_U^{-1})/2]^2 F^2} \cdot \frac{8k_B [(R/2) + R_{ПЗ}]}{U_{ст}^2}. \tag{4}$$

Здесь $f_B = \omega_B/2\pi$ — частота колебаний; $U_{ст}$ — амплитуда колебаний; k_B — постоянная Больцмана; T^0 — абсолютная температура; K_U^{-1} — величина обратная коэффициенту усиления линейного усилителя в RC-АГ с РФ в виде ТТ-моста; F — частота анализа; $R, R_{ПЗ}$ — сопротивления в фильтрах АГ (рис. 1).

Уровни СПМ ФМ-шумов АГ при отстройках от частоты f_B , равных ($\pm F$), выражаются в децибелах относительно мощности колебания и рассчитываются по формуле:

$$L_{\phi}(F) = 10 \lg(S_{\phi}(F)) - 3, \text{ дБн/Гц.} \tag{5}$$

Выражения (3) и (4) справедливы при частотах анализа до 20% от частоты автоколебаний при условии, что дифференциальный усилитель работает в линейном режиме.

Сравнение режимных и шумовых характеристик двух схем АГ. Спектральные составы выходных колебаний и уровней СПМ ФМ-шумов двух схем АГ сравнивались при условии, что для этих АГ одинаковы: частота генерации $f_B = 1$ МГц, амплитуда выходных напряжений — 1 В и сопротивление в фильтрах цепей ОС $R = 1$ кОм.

Данные для сравнения получены моделированием АГ в пакете ADS2008, где расчеты спектральных и шумовых характеристик выполняются полигармоническим методом. В качестве активных приборов использовались дифференциальные усилители на БТ с граничной частотой 900 МГц и коэффициентом усиления по току $\beta = 100$.

Схема RC-АГ с мостом Вина показана на рис. 3, а схема с режекторным ТТ-мостом — на рис.4. В АГ для ослабления влияния усилителя на цепь ПОС введены эмиттерные повторители. В схеме АГ с РФ в цепь ПОС включен мост Вина, позволяющий снизить уровень высших гармоник в напряжении, поступающем с выхода ограничителя на вход усилителя.

Результаты расчета спектрального состава выходного колебания АГ с мостом Вина приведены на рис. 5, а, а для АГ с ТТ-мостом — на рис. 5, б. Временные зависимости выходных напряжений двух схем автогенераторов представлены на рис. 6, а.

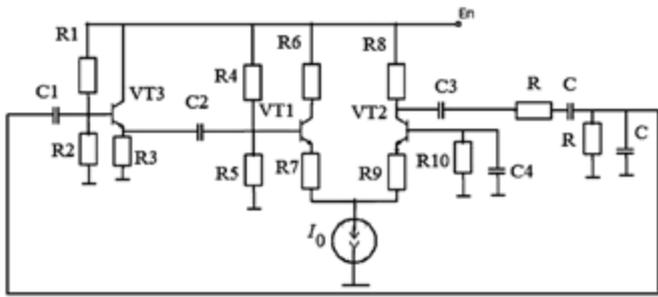


Рис. 3

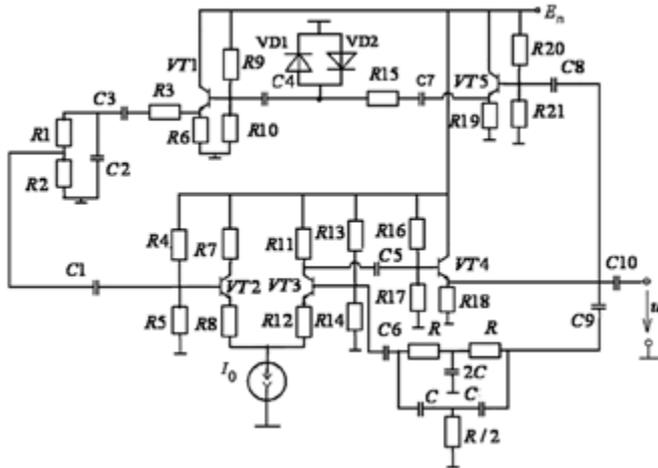


Рис. 4

На рис. 6, б для двух схем автогенераторов показаны зависимости СПМ ФМ-шумов в одной боковой полосе отстройки от несущей, а в табл. 1 представлены результаты расчета СПМ ФМ-шумов методом С. И. Евтянова и полигармоническим методом в пакете ADS2008 при частоте отстройки от несущей 1 кГц.

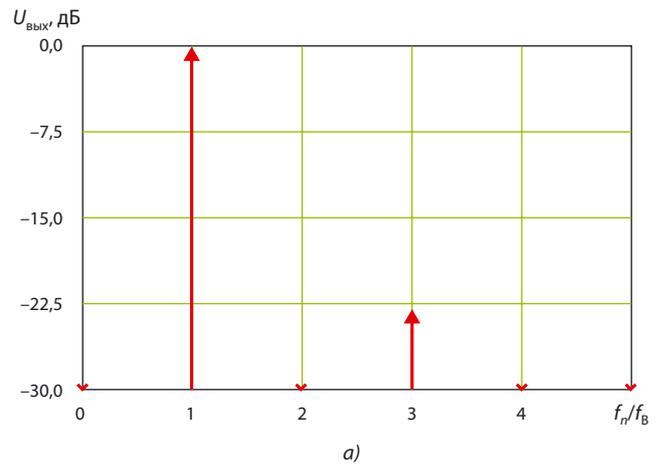
Таблица 1. Сравнение СПМ ФМ-шумов АГ

Схема АГ	Метод С. И. Евтянова	ADS (полигармонический метод)
С мостом Вина	-97,7 дБн/Гц	-97,7 дБн/Гц
С ТТ-мостом	-104,9 дБн/Гц	-105,7 дБн/Гц

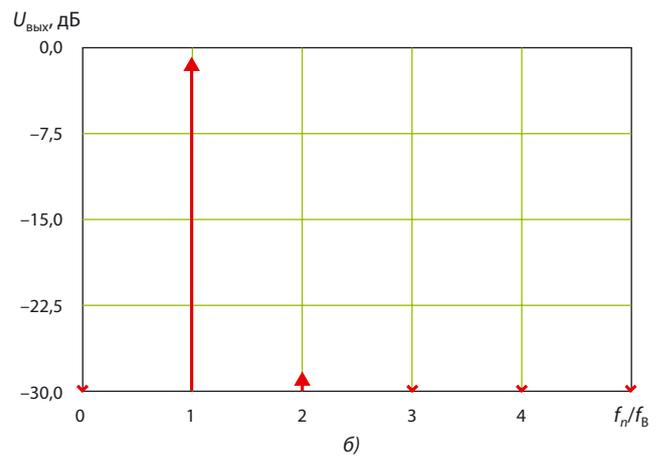
Из таблицы видно, что СПМ ФМ-шума АГ с мостом Вина на ~7 дБн/Гц выше, чем у АГ с ТТ-мостом. Кроме того, выходное колебание АГ с ТТ-мостом (рис. 5, б) имеет меньший уровень высших гармоник, чем в АГ с мостом Вина (рис. 5, а). Отметим, что данные, полученные методом С. И. Евтянова по соотношениям (3), (4), отличаются от результатов, достигнутых с помощью полигармонического метода всего на ~1 дБн/Гц и дают оценку сверху.

Дополнительные исследования показали, что формулы (3) и (4) справедливы для оценки СПМ ФМ-шумов АГ без учета влияния инерционных свойств БТ, на которых построен дифференциальный усилитель. Поэтому полученные формулы справедливы на частотах автоколебаний f_B , лежащих ниже частоты $f_\beta = f_T/\beta$, где f_T — граничная частота БТ.

Результаты эксперимента. Для схемы RC-АГ с РФ (см. рис. 4) был проведен эксперимент, предварительно определены все параметры схемы и получены параметры стац-

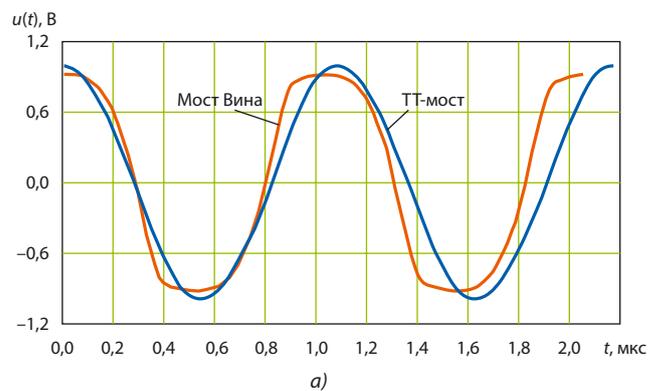


а)

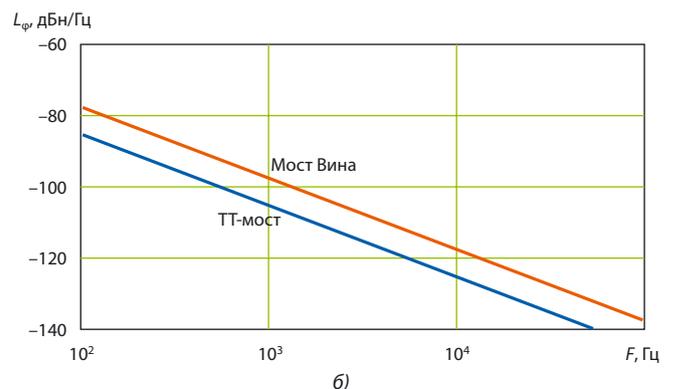


б)

Рис. 5



а)



б)

Рис. 6

онарного режима. СПМ ФМ рассчитаны методом С.И. Евтянова. Результаты эксперимента представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Сравнение режимных характеристик АГ с РФ

Параметр	Эксперимент	Прогноз
Частота генерации $f_{в}$, кГц	922,6	920
Амплитуда выходного напряжения $U_{вых}$, В	0,98	1

Таблица 3. Сравнение СПМ ФМ-шумов АГ с РФ

Частота отстройки $F_{отс}$, кГц	L_{ϕ} , дБн/Гц	
	Эксперимент	Прогноз
0,1	-85	-84,9
10	-125	-124,9

Разница частот и амплитуд выходного напряжения между экспериментальными и расчетными результатами объясняется наличием паразитных емкостей и дискретностью рядов резисторов и конденсаторов. Результаты измерения уровней ФМ-шумов при заданных отстройках от несущей хорошо согласуются с результатами расчетов.

Заключение. Представленные результаты сравнения двух схем RC-автогенераторов по уровням фазовых шумов рассчитаны методом С.И. Евтянова. Показано, что при одинаковых амплитудах выходных колебаний в RC-АГ с режекторным фильтром в виде ТТ-моста уровень фазовых шумов на 5–7 дБн/Гц ниже, чем в АГ с мостом Вина. Результат подтвержден моделированием в среде ADS, где расчет флуктуаций выполняется полигармоническим методом.

Кроме того, показано, что RC-АГ с режекторным фильтром может работать с большим запасом по самовозбуждению, обеспечивая форму выходного колебания, более близкую к гармонической. Для генератора с режекторным фильтром получены результаты измерений СПМ ФМ-шума, хорошо согласующиеся с результатами прогнозных расчетов.

Авторы выражают благодарность В.А. Прокофьеву за неоценимую помощь в подготовке и проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бондаренко В.Г.** RC генераторы синусоидальных колебаний.— М.: Связь, 1976.
2. **Palumbo G, Pennisi M., Pennisi S.** Wien-Type Oscillators: Evaluation and Optimization of Harmonic Distortion // IEEE Transactions on Circuits and Systems — II: Express Briefs.— July 2008.— Vol. 55, № 7.
3. **Кулешов В.Н., Болдырева Т.И., Дроздова Е.М.** Исследование режимных и шумовых характеристик RC-автогенераторов гармонических колебаний методом укороченных символических уравнений С.И. Евтянова / Вестник МЭИ.— 2013.— № 5.
4. **Евтянов С.И.** Избранные статьи (составитель В.Н. Кулешов).— М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
5. **Кулешов В.Н., Болдырева Т.И., Дроздова Е.М.** Шумовые характеристики автогенератора гармонических колебаний с режекторным RC-фильтром // Радиотехника.— 2013.— № 10.
6. **Кулешов В.Н., Болдырева Т.И., Дроздова Е.М.** Режимные и шумовые характеристики RC-автогенераторов гармонических колебаний // СИНХРОИНФО-2013.— М.: ООО «Брис-М».
7. **Кулешов В.Н., Болдырева Т.И., Дроздова Е.М.** Режимные и шумовые характеристики RC-автогенераторов гармонических колебаний // Электросвязь.— 2014.— № 5.— С.30–33.

Получено 23.03.15

ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРА!

31 мая исполняется 75 лет Сергею Львовичу Мишенкову — советнику генерального директора ФГУП РСВО, д.т.н., профессору МТУСИ, члену редколлегии журнала «Электросвязь».



С.Л. Мишенков родился в 1940 г. В 1963 г. окончил МЭИС (МТУСИ) по специальности «Радиосвязь и радиовещание», в 1968 г.— аспирантуру МЭИС. С 1962 г. по 1965 г. работал в ЦНИИС Минсвязи СССР. В 1969–1983 гг.— ассистент, старший преподаватель, доцент МЭИС. В 1983–1992 гг.— заместитель начальника, главный инженер МГРС. В 1992–2001 гг.— начальник научно-

технического управления Министерства РФ по связи и информатизации. Это были сложные для науки времена, когда государство практически отказалось от финансирования исследовательской работы. Для того чтобы поддержать передовые разработки, нужно было нацелить операторов на поддержку отраслевой науки, и ценой огромных усилий С.Л. Мишенкову это удавалось. Затем, в 2001–2007 гг., Сергей Львович работал директором по маркетингу ОАО АСВТ, а с 2008 г.— советником министра связи и массовых коммуникаций РФ. Таков послужной список д.т.н., профессора, заведующего кафедрой систем и сетей массовых коммуникаций (СиСМК) МТУСИ, занимающегося преподавательской деятельностью с 1966 г. За это время им было подготовлено пять кандидатов наук и более 150 инженеров.

Область научных интересов С.Л. Мишенкова весьма широка: восприятие информации (звуковой, видео), синтез систем связи и массовых коммуникаций, нормирование их показателей качества, разработка новых услуг связи, конвергенция услуг и конвергенция систем и сетей связи.

Сергей Львович входит в состав редколлегии журналов «Электросвязь» и «Радио», он главный эксперт по разделу «Связь» Большой российской энциклопедии, автор и соавтор 10 авторских свидетельств и более 200 публикаций. Имеет звания «Ветеран труда», «Мастер связи», «Почетный радист». Является действительным членом Академии телекоммуникаций и информатизации, Российской академии естественных наук, Академии инженерных наук РФ, Международной академии информатизации, Международной академии наук высшей школы, Международной академии качества, действительным членом IEEE.

Как член президиума МАС С.Л. Мишенков ведет большую работу с молодыми учеными, видя в них продолжателей лучших традиций национальной научной школы. Не случайно именно он возглавляет жюри Молодежного конкурса инноваций и инновационных проектов — Новое поколение 2014/2015 Международной академии связи.

Редакция и редколлегия журнала «Электросвязь» сердечно поздравляют Сергея Львовича с юбилеем и желают ему здоровья, успехов и новой интересной работы.