

12-15-2019

METHODS OF BUILDING LOAD CHARACTERISTICS OF SOLID STATE POWER AMPLIFIERS ON MOS TRANSISTORS

Vyacheslav Mikhailovich Andreev

A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, St. Petersburg

Khayrulla Kabilovich Aripov

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan, Khayrulla-Aripov@yandex.ru

Axmed Mallayevich Abdullayev

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan, ahmed.34@gmail.ru

Shunkorjon Toshpulatovich Toshmatov

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan, shu-toshmatov@mail.ru

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/semiconductors>

Recommended Citation

Andreev, Vyacheslav Mikhailovich; Aripov, Khayrulla Kabilovich; Abdullayev, Axmed Mallayevich; and Toshmatov, Shunkorjon Toshpulatovich (2019) "METHODS OF BUILDING LOAD CHARACTERISTICS OF SOLID STATE POWER AMPLIFIERS ON MOS TRANSISTORS," *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*: Vol. 1 : Iss. 6 , Article 5.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/semiconductors/vol1/iss6/5>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.

УДК 621.385

**МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ
УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ НА МОП-ТРАНЗИСТОРАХ**

Андреев Вячеслав Михайлович, д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

Арипов Хайрулла Кабилович, д.ф.-м.н., профессор Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Узбекистан, Ташкент. E-mail: khayrulla-aripov@yandex.ru

Абдуллаев Ахмед Маллаевич, к.ф.-м.н., профессор Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Узбекистан, Ташкент. E-mail: ahmed.34@gmail.ru

Тошматов Шункоржон Тошпулатович, PhD, докторант Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Узбекистан, Ташкент. E-mail: shu-toshmatov@mail.ru.

Аннотация. В работе приводятся результаты исследований по разработке твердотельных усилителей мощности на МОП-транзисторах в режиме большого сигнала. Разработан универсальный метод расчета усилителей мощности с заданными параметрами, основанный на построении нагрузочных характеристик усилителя по статическим вольт-амперным характеристикам МОП-транзисторов, либо наоборот. Предложен метод совмещения нагрузочных характеристик усилителей мощности, обеспечивающий взаимосвязь между параметрами МОП-транзистора и параметрами усилителя.

Ключевые слова: МОП-транзистор, исток-затворная характеристика, истоковая характеристика, усилитель мощности, нагрузочная характеристика, метод совмещения.

**METHODS OF BUILDING LOAD CHARACTERISTICS OF SOLID STATE
POWER AMPLIFIERS ON MOS TRANSISTORS**

Andreev Vyacheslav Mikhailovich, Dr. of Tech. Sc., Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of the A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, St. Petersburg.

Aripov Khayrulla Kabilovich, Dr. Phys. -Math. Sc., Professor of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan. E-mail: khayrulla-aripov@yandex.ru

Abdullayev Axmed Mallayevich, Cand. Phys. Math. Sc., Professor of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan. E-mail: ahmed.34@gmail.ru

Toshmatov Shunkorjon Toshpulatovich, PhD, Doctoral student of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan. E-mail: shu-toshmatov@mail.ru.

Abstract. The paper presents the results of studies on the development of solid state power amplifiers based on MOS transistors in the large-signal mode. An express method has been developed for constructing the load characteristics of a power amplifier according to the static current-voltage characteristics of MOS transistors, or a set of. A method for combining the load

characteristics of power amplifiers is proposed, which provides a relationship between the parameters of the MOS transistor and the parameters of the amplifier.

Keywords: MOS transistor, source-gate characteristic, source characteristic, power amplifier, load characteristic, combining method.

1. Введение

Бестрансформаторные усилители мощности широко используются в электронных устройствах, предназначенных для усиления аудиосигналов [1-4].

Принцип работы отдельных типов усилителей и основные расчетные соотношения приводятся в работе [1].

Современные способы передачи звука требуют аналоговых усилителей с весьма высокими показателями качества, такими как динамический диапазон до 100 дБ, коэффициент нелинейных искажений около 0,002%, энергопотребление, эксплуатационные параметры.

Совершенствующиеся методы анализа усилительных элементов и устройств на их основе позволяют определять всё новые причины, приводящие к искажениям электрических сигналов при их усилении, обработке и передаче.

В работах [2-10], приводятся закономерности формообразования электродных характеристик полупроводниковых усилительных элементов и универсальный метод расчета усилителей мощности с заданными показателями. Предложенные методы анализа позволили вскрыть неизвестные ранее факты, приводящие к искажениям сигнала при его усилении.

Задачей исследования является теоретическое и экспериментальное выяснение возможностей предложенного метода построения нагрузочных характеристик твердотельных усилителей мощности (ТУМ) на МОП-транзисторах с заданными вольт-амперными характеристиками (ВАХ).

2. Методика исследования

Теоретически и экспериментально рассматриваются графо-аналитические методы расчета ТУМ на МОП-транзисторах в режиме класса А.

На первой стадии этого поиска рассмотрен режим плавного канала и режим насыщения МОП-транзистора, поскольку именно эти режимы свойственны ТУМ классам усиления А, А⁺, АВ, В и G [4].

На второй стадии исследования ВАХ МОП-транзисторов производится симуляция ТУМ при помощи моделирующих программ Labview, Signal Express, MultiSim 10.1, Ultiboard компании National Instruments.

На третьей стадии для экспериментального исследования в качестве предлагаемого ТУМ были использованы интегральные микросборки МОП-транзисторов типа IRF9640S.

3. Результаты и их обсуждение

В режиме большого сигнала переменные составляющие токов и напряжений соизмеримы с постоянными составляющими сигналов [4-6]. Поэтому на свойства усилителя начинают сильно влиять связи параметров транзистора с режимами его работы и

нелинейность основных характеристик в схеме с общим стоком (ОС). В связи с этим расчет усилителя проводится не с использованием малосигнальных моделей транзисторов, а графо-аналитическим методом непосредственно по характеристикам, используемым при создании ТУМ на конкретных МОП-транзисторах.

Рассмотрим теоретическое построение линии нагрузки усилительного каскада класса А (рис.1). Транзистор включен по схеме с ОС (рис.1,в). Напряжение U_{BX0} задает значение напряжения затвор-сток в режиме покоя (рабочая точка С)

$$U_{ЗC0} = E_{П} - U_{BX0}. \quad (1)$$

Сопротивление $R_{Н}$ (далее будем называть его нагрузкой) включено последовательно с промежутком сток-исток транзистора и источником напряжения $E_{П}$. Поэтому значения напряжений на нагрузке $U_{R_{Н}}$ и на транзисторе $U_{ИС}$ жестко связаны соотношением

$$U_{ИС} + U_{R_{Н}} = E_{П}. \quad (2)$$

Очевидно, что в данной схеме ток через резистор $I_{R_{Н}}$ равен току истока $I_{И}$. Следовательно, ток истока должен удовлетворять системе уравнений

$$I_{И} = f(U_{R_{Н}}); \quad (3)$$

$$I_{И} = f_1(U_{ИС}); \quad (4)$$

$$I_{И} = f_2(U_{ЗC}). \quad (5)$$

где $f_1(U_{ИС})$ – функция, описывающая выходную характеристику транзистора при заданном напряжении $U_{ЗC}$, а функция $f(U_{R_{Н}})$ представляет собой ВАХ резистора $R_{Н}$, т.е. уравнение закона Ома.

Для расчета коэффициентов усиления ТУМ и других его параметров необходимо найти значения тока истока (выходной ток усилителя $I_{И}$) и напряжения истока (выходное напряжение $U_{ИС}$) по заданному значению входного напряжения. Проведем расчет методом графического решения системы уравнений (3)÷(5).

Уравнению (4) соответствует график выходных характеристик используемого транзистора (рис. 1, б).

Наклонная прямая линия – график уравнения (3). Ее называют нагрузочной прямой. Нагрузочная прямая отсекает в системе координат ($I_{И}, U_{ИС}$) отрезки на оси токов при $U_{ИС}=0$, $I_{И}=E_{П}/R_{Н}$, а на оси напряжений при $I_{И}=0$, $U_{ИС}=E_{П}$. Точки пересечения нагрузочной прямой с выходными характеристиками транзистора соответствуют решениям системы (3)÷(5) и позволяют построить нагрузочную проходную характеристику усилителя $I_{И}=\varphi_1(U_{ЗC})$ (рис.1,а).

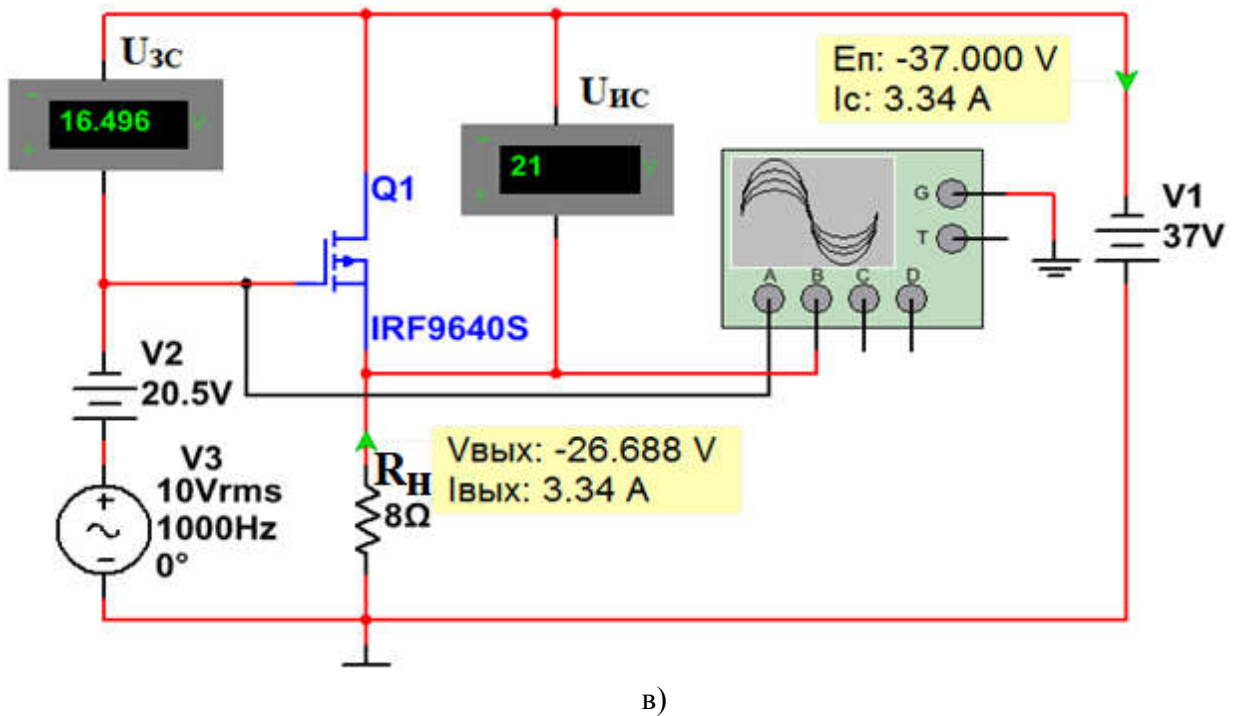
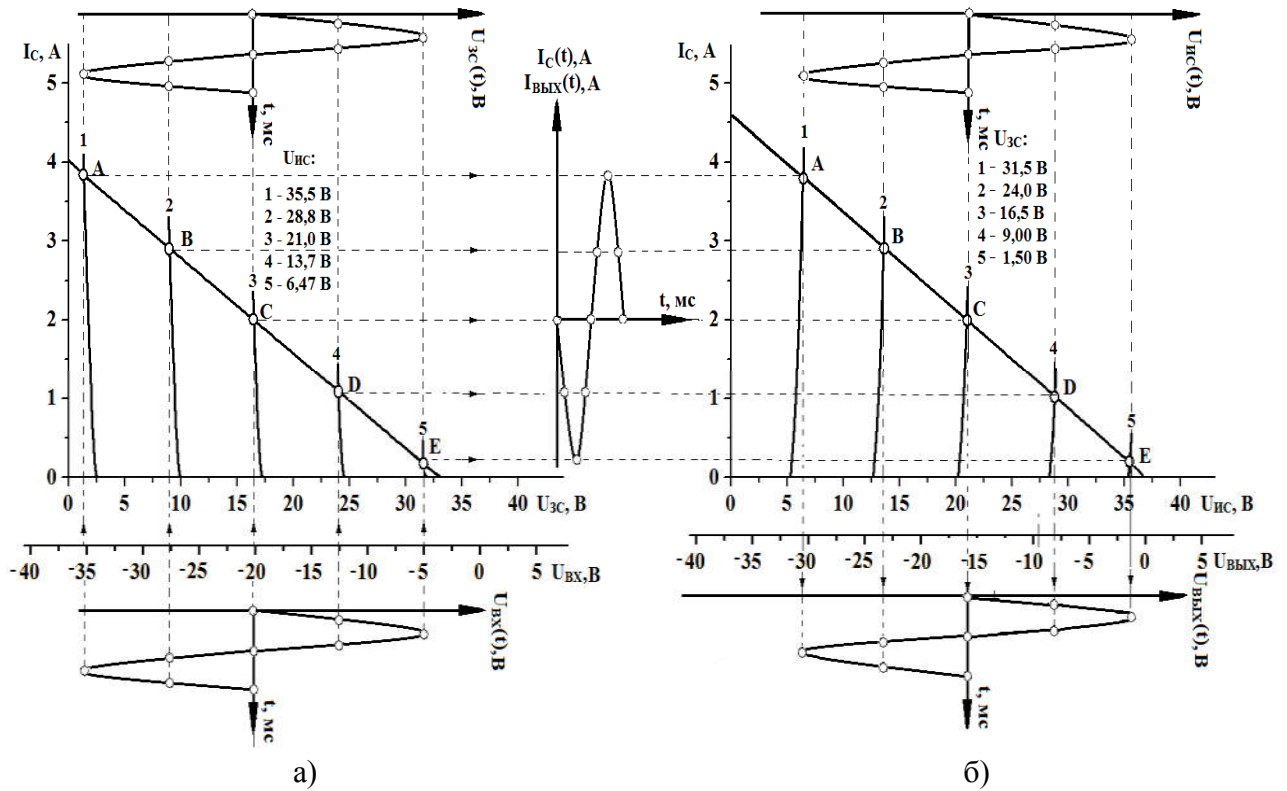


Рис. 1. Теоретическое построение линии нагрузки на семействе ВАХ МОП-транзистора с индуцированным р-каналом IRF9640S: источник -затворных характеристик $I_c=f(U_{3c})$ (а); стоковых характеристик $I_c=f(U_{нс})$ (б) и схема экспериментального исследования каскада усилителя мощности класса А при $E_{п}=37$ В, $R_{н}=8$ Ом (в).

Предложенный нами графо-аналитический метод расчета позволяет теоретически и экспериментально получить входную и выходную ВАХ МОП-транзистора при помощи нагрузочных характеристик ТУМ по статическим ВАХ МОП-транзистора, либо наоборот.

Для этого необходимо перенести начало координат по оси абсцисс графика семейства входных характеристик транзистора в точку $E_{П}-U_{ЗС}$, а графика семейства выходных характеристик транзистора в точку $E_{П}-U_{ИС}$.

Полученные указанным способом графики ВАХ транзистора представлены на рис. 2 (а и б) соответственно. При этом на одном графике совмещаются как преобразованная входная характеристика транзистора, так и выходная характеристика ТУМ.

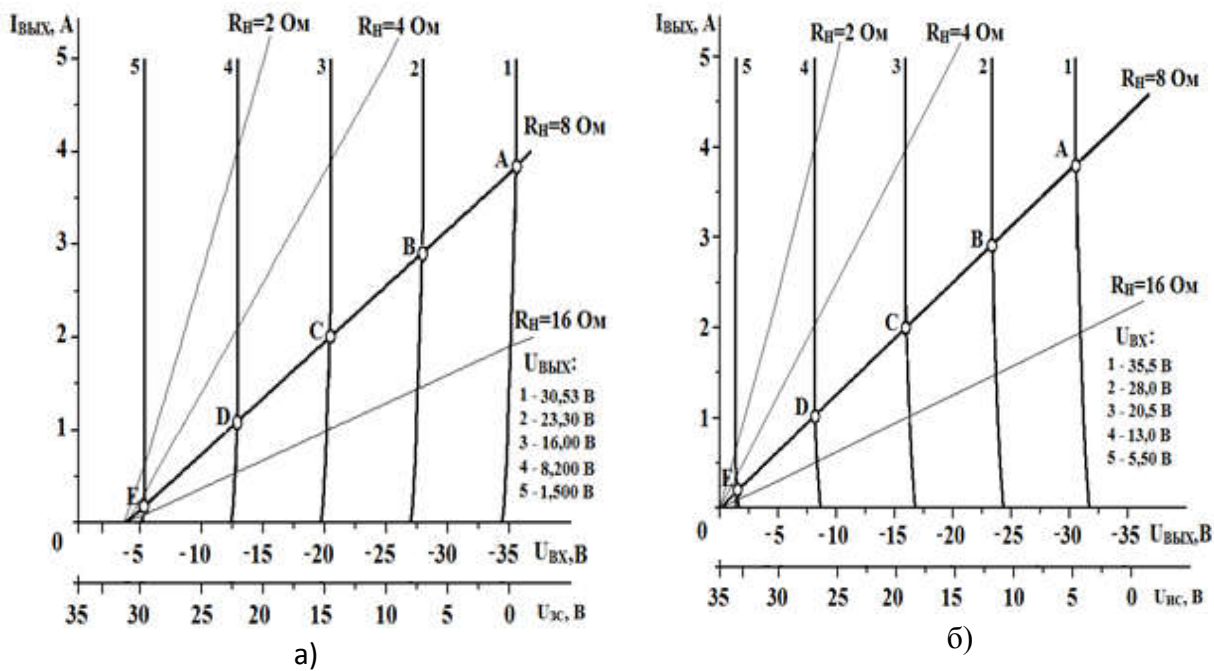


Рис. 2. Теоретический и экспериментальный методы построения линии нагрузки на семействе ВАХ МОП транзистора IRF9640S: проходных характеристик $I_{BX}=f(U_{BX})$ (а) и выходных характеристик $I_{ВЫХ}=f(U_{ВЫХ})$ (б)

Искомая выходная ВАХ транзистора строится путем нахождения координат соответствующих выходных токов и напряжений ($I_{И}, E_{П} - U_{ИС}$) при заданном значении $U_{ВХ}$ усилителя для различных нагрузок R_H .

Аналогично, искомая проходная ВАХ транзистора строится путем нахождения координат выходных токов и напряжений ($I_{С}, E_{П} - U_{ЗС}$) при заданных значениях $U_{ВЫХ}$ усилителя для различных нагрузок R_H .

Нагрузочные передаточные характеристики ТУМ можно представить на одном графике, где совмещены между собой три параметра транзистора $I_{И}, U_{ЗС}, U_{ИС}$ и три параметра ТУМ $I_{ВЫХ}, U_{ВЫХ}, U_{ВХ}$.

На рис. 3 приведен совмещенный график для ТУМ на транзисторе типа IRF9640S с $E_{П}=37 \text{ В}$, $R_H=8 \text{ Ом}$ по разработанной нами методике наглядного сравнения входного и выходного сигналов. При этом координаты точки С одновременно определяют все три

основных параметра – выходные токи, а также напряжения как транзистора $I_{и}$, $U_{зс}$, $U_{ис}$ так и ТУМ $I_{вых}$, $U_{вх}$, $U_{вых}$.

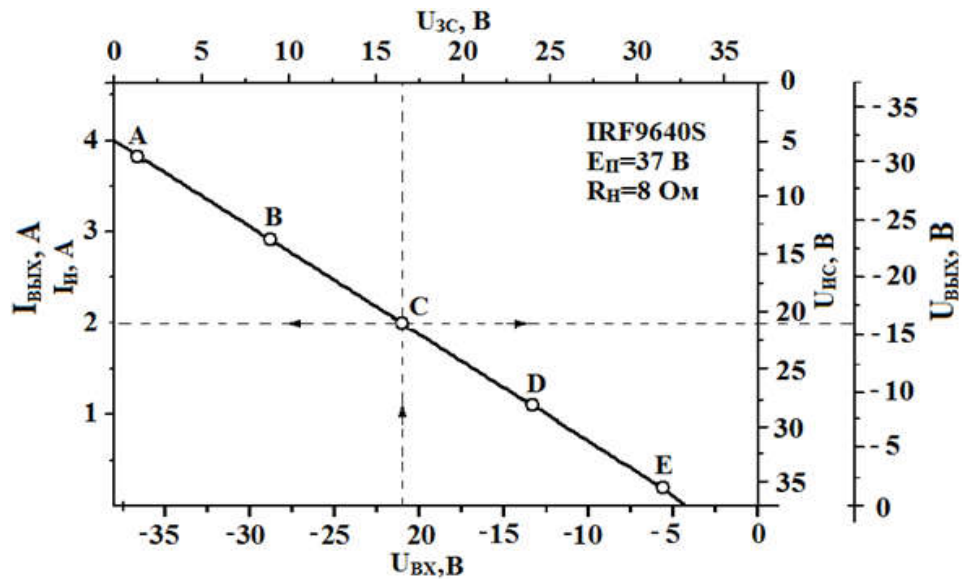


Рис. 3. Совмещенная нагрузочная характеристика транзистора IRF9640S в схеме каскада усилителя мощности класса А при $E_{п}=37$ В, $R_{н}=8$ Ом.

Для вычисления усредненных значений коэффициентов усиления, а также выходного сопротивления ТУМ используются две ВАХ транзистора $I_{и}=f(U_{зс})$, $I_{и}=f(U_{ис})$ и две передаточные характеристики $U_{зс}=f(U_{ис})$ и $U_{ис}=f(U_{зс})$ при заданных значениях $E_{п}$ и $R_{н}$.

Усредненные значения $I_{ит}$, $U_{ист}$ и $U_{зст}$ определяются по формулам:

$$I_{ит} = \frac{I_{итmax} - I_{итmin}}{2}; \quad U_{ист} = \frac{U_{истmax} - U_{истmin}}{2};$$

$$U_{зст} = \frac{U_{зстmax} - U_{зстmin}}{2}.$$

Найденные усредненные значения позволяют вычислить параметры усилителя:

коэффициент усиления каскада по напряжению и выходное сопротивление усилителя

$$K_U = U_{ист}/U_{зст}; \quad R_{вых} = U_{ист}/I_{ит}.$$

4. Заключение

На основе выявленных закономерностей формообразования ВАХ ТУМ на МОП-транзисторе впервые разработаны:

- универсальный метод построения нагрузочных характеристик ТУМ на МОП-транзисторе в схеме с общим стоком, позволяющий максимально упростить получение временных диаграмм усилительного каскада при заданной форме входного сигнала;
- экспресс-метод построения нагрузочных характеристик ТУМ по статическим ВАХ МОП-транзистора, либо наоборот;

- метод совмещения нагрузочных характеристик ТУМ с ВАХ МОП-транзистора, связывающий между собой параметры транзистора с параметрами ТУМ и позволяющий наглядно анализировать усилительные свойства транзистора при минимальных нелинейных искажениях.

References

1. P. Horowitz, W. Hill, The Art of Electronics. Cambridge University press, 2015, p.1225.
2. Aripov Kh.K., Abdullaev A.M., Toshmatov Sh.T. *Zakonomernosti formoobrazovaniya VAKh MOP-tranzistorov v skheme s obshchim stokom* [Regularities the generalities of I-V curve formation in MOSFET with a common drain] *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics]. Moskva, 2017. No.9. pp. 40-44. (In Russ.)
3. Aripov Kh.K., Abdullaev A.M., Toshmatov Sh.T. *Zakonomernosti formoobrazovaniya VAKh elektronno-upravlyaemykh lamp v skheme vklyucheniya s obshchim anodom* [Regularities the generalities of I-V curve formation in vacuum tube a common anode] *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics]. Moscow, 2019. No. 9. pp. 51-57. (In Russ.)
4. H.K. Aripov, A.M. Abdullaev, Sh.T. Toshmatov *Usiliteli na osnove foto-i inzhektionsno-vol'taicheskogo effektov* [Amplifiers based on photo-and injection-voltaic effects] LAP LAMBERT Academic Publishing, Mauritius, 2018, p. 293. (In Russ.)
5. Sh.T. Toshmatov. *Osnovnye zakonomernosti formoobrazovaniya VAKh usilitelei moshnosti*. [The main regularities the generalities of I-V curve formation characteristics of power amplifiers] Toshkent 2017: Fan va texnologiya, - 252s. ISBN 978-9943-11-614-6; Publisher: LAP LAMBERT Academic Publishing, Beau Bassin, Mauritius. 2018. p. 250. ISBN: 978-613-5-84514-3. (In Russ.)
6. H.K. Aripov, A.M. Abdullaev, Sh.T. Toshmatov. *Zakonomernosti formoobrazovaniya VAKh MOP-tranzistorov v skheme s obshchim stokom* [Regularities the generalities of I-V curve formation in MOSFET with a common drain] «Aktualnye problemy nauki i obrazovaniya v sovremennom vuze» *Materialy III mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference], 2017. Sterlitamak. vol. I. pp. 251-256. (In Russ.)
7. Toshmatov Sh.T. *Metody postroeniya nagruzochnykh kharakteristik usilitelei moshchnosti na bipolyarnykh tranzistorakh* [Method of building load characteristics of power amplifiers on a bipolar transistors] *Potomki Mukhammeda al-Khorezmi* [Descendants of Muhammad al-Khwarizmi]. Tashkent, 2017. no. 2. pp. 57-60. (In Russ.)
8. I.S.Andreev, H.K.Aripov, A.M.Abdullaev, Zh.T.Mahsudov, Sh.B.Rahmatov, Sh.T. Toshmatov *Poluprovodnikovye pribory mnogoslojnoi struktury: tranzistory i tiristory* [Multilayer semiconductor device structure: transistors and thyristors]. Monografiya. T. «Navro`z», 2019, 280 p. ISBN 978-9943-562-36-3; Monografiya. T. «Aloqachi», 2019, 276 p. (In Russ.)
9. Mohammed Ismail, Delia R.de Llera Gozalez. *Radio design in Nanometer Technologies*. Springer Science&Business Media. 2007, 316 p.
10. Kh.K.Aripov, A.M.Abdullayev, Sh.T. Toshmatov. Features the generalities of I-V curve formation in MOSFET with a common drain. In: *Semiconductor physics and microelectronics*. Tashkent, 2019. vol. 1 (01) pp. 41-44 (In Russ.)