

УДК 621.375.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ НА ТРАНЗИСТОРЕ СО СТАТИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИЕЙ

ФЕДОСЕЕВ Д. С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: [precisionaudiosystems@gmail.com](mailto:precisionaudiosystems@gmail.com)

**Аннотация.** В статье рассматриваются результаты исследования транзисторного усилителя мощности звуковой частоты, построенного с использованием отдельных схемотехнических решений, применяемых при проектировании ламповых устройств.

**Abstract.** The article discusses the results of a study of an audio solid-state power amplifier built using separate circuit solutions used in the design of tube devices.

### Введение

В 1960-е годы полупроводниковые приборы (транзисторы) постепенно начали вытеснять электровакуумные приборы (лампы) при построении усилителей звуковой частоты (УЗЧ). Несмотря на определённые преимущества реализованных на транзисторах УЗЧ любители высококачественного звуковоспроизведения стали жаловаться на ненатуральность (неестественность) звука новых устройств и тогда рядом производителей того времени предпринимались попытки придать транзисторным УЗЧ характер звука, который был присущ ламповым.

В 1974 году Дзюньити Нисидзава получил патент специального полевого транзистора с управляющим р-п-переходом, у которого "зависимость тока стока от напряжения на стоке очень точно имитирует зависимость тока анода от напряжения на аноде электровакуумного триода" [1]. На основе данного патента подразделения японских компаний Yamaha и Sony, занимавшиеся производством элементной базы, инициировали выпуск транзисторов 2SK77 и 2SK82 соответственно, которые открыли новую серию полупроводниковых приборов под общим названием VFET (Vertical Field Effect Transistor), получившую в дальнейшем название SIT (Static Induction Transistor) – транзистор со статической индукцией.

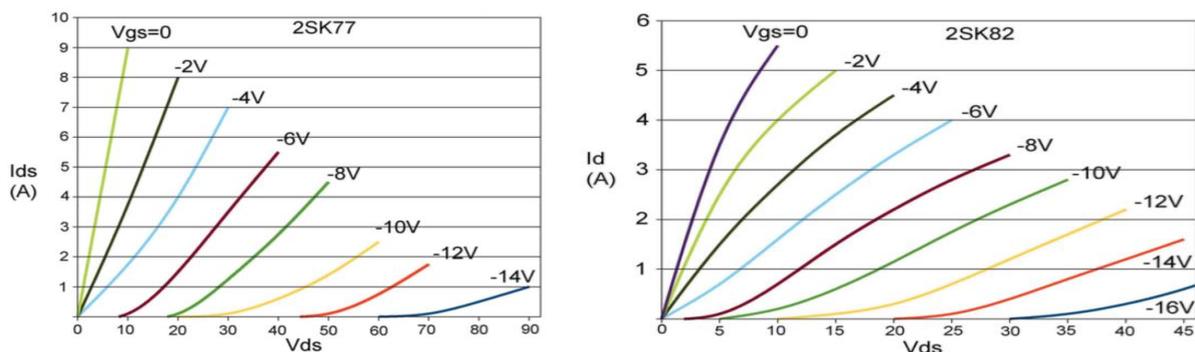


Рис.1. Вольт-амперные характеристики транзисторов 2SK77 и 2SK82.

Как видно из рисунка 1, данные вольт-амперные характеристики схожи с характеристиками триодов, например, триода прямого накала 300B, разработанного американской компанией Western Electric (рисунок 2).

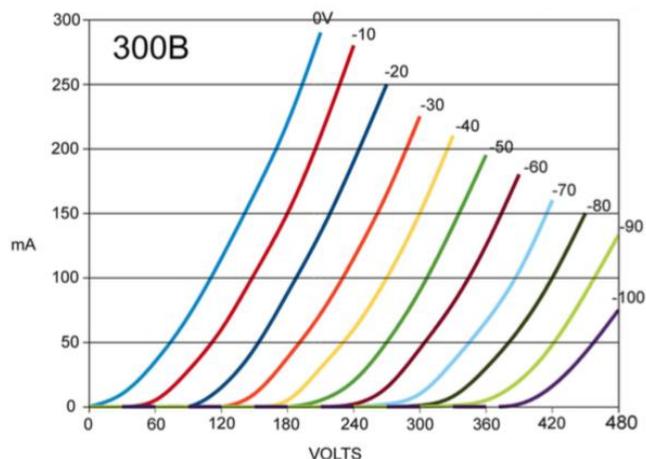


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика триода 300В.

В настоящее время японская компания Digital do MaiN и американская Pass Labs возобновили выпуск транзисторов со статической индукцией (2SK77B и SIT-1 соответственно) для производства собственных усилителей мощности звуковой частоты (УМЗЧ).

### Результаты исследования

С помощью программно-аппаратного комплекса Audio Precision SYS2722 был исследован однотактный УМЗЧ, работающий в классе А без цепи отрицательной обратной связи, построенный по схеме Нэльсона Пасса [2]. В качестве выходных транзисторов данного УМЗЧ используются транзисторы со статической индукцией SIT-1, произведённые компанией SemiSouth Laboratories, Inc., вольт-амперная характеристика которых представлена на рисунке 3.

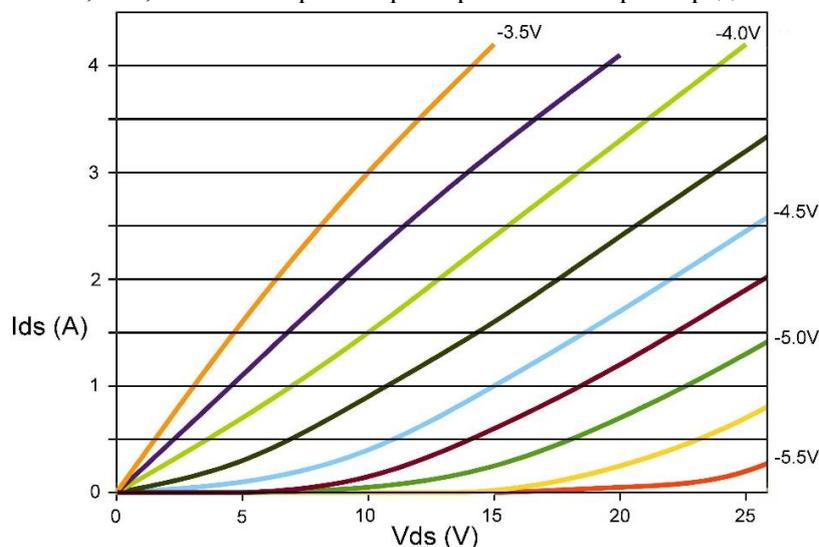
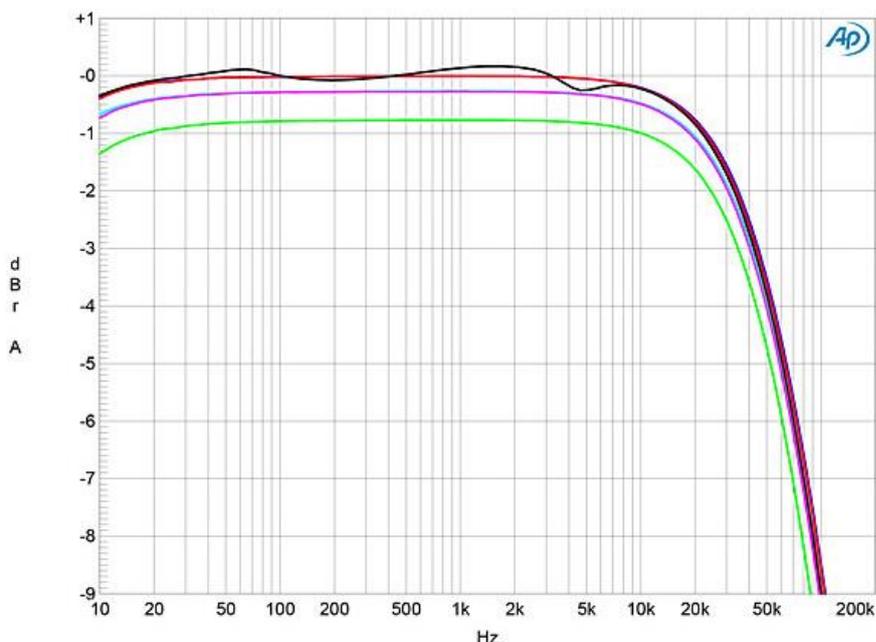


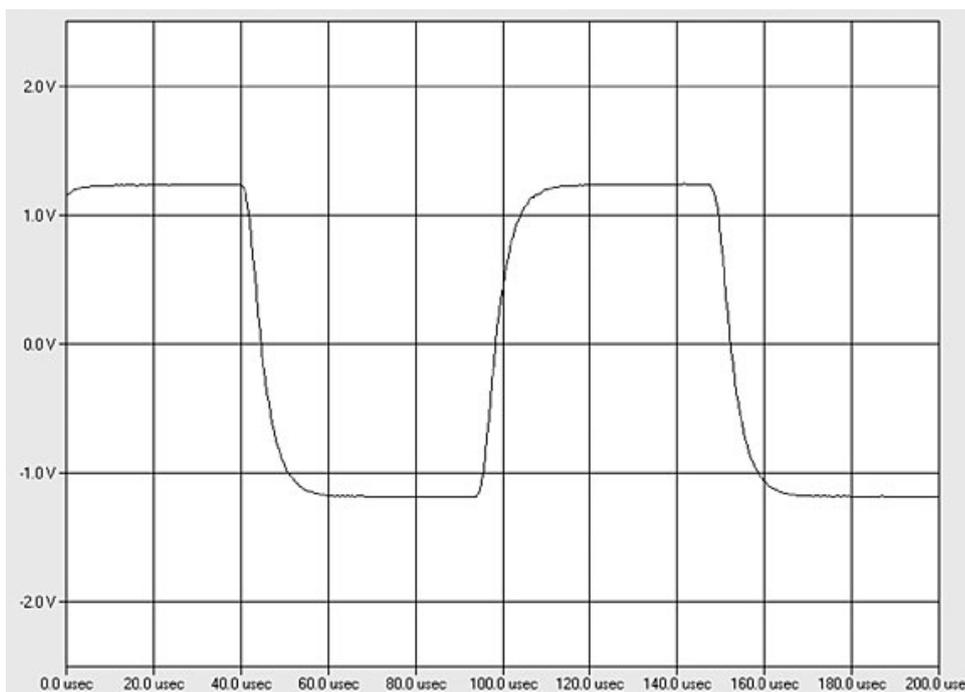
Рис. 3. Вольт-амперная характеристика транзистора SIT-1.

- 1) Коэффициент усиления по напряжению на эквиваленте нагрузки 8 Ом составил 11,3 дБ.
- 2) Значение входного импеданса в области НЧ и СЧ составило 200 кОм, а начиная с частоты 20 кГц, упало до 151 кОм.
- 3) Значение выходного импеданса составило 0,25 Ом на частотах 20 Гц и 1 кГц, и 0,265 Ом на частоте 20 кГц.
- 4) Амплитудно-частотная характеристика (рисунок 4) плоская до 10 кГц, со спадом -0,8 дБ на 20 кГц. Синим и красным цветом показаны соответствующие значения для левого и правого каналов на эквивалент нагрузки 8 Ом, голубым и пурпурным – соответствующие значения на эквивалент нагрузки 4 Ома, зелёным – на эквивалент нагрузки 2 Ома.



**Рис. 4.** Амплитудно-частотная характеристика.

5) Сигнал на выходе исследуемого УМЗЧ на эквиваленте нагрузки 8 Ом при подаче на вход сигнала прямоугольной формы с частотой 10 кГц (рисунок 5) имеет короткое время нарастания и лишён выбросов.



**Рис.5.** Реакция УМЗЧ на сигнал прямоугольной формы.

6) Разделение каналов составило ~ 100 дБ на частотах ниже 1 кГц и ~74 дБ на частоте 20 кГц.

7) Широкополосное невзвешенное отношение сигнал/шум (при закороченном входе) составило 87,3 дБ и 95,4 дБ для левого и правого каналов соответственно. При ограничении полосы частот диапазоном 20 Гц – 20 кГц отношение сигнал/шум возросло до значений 94,5 дБ и 98,1 дБ для соответствующих каналов. А-взвешенное значение составило 107 дБ.

8) Выходная мощность УМЗЧ составляет 18 Вт на канал при нагрузке 8 Ом (12,55 дБ\*Вт). При пороге, когда коэффициент гармонических искажений + шум (THD+N) достигает 1% (рисунок 6. а), выходная мощность ограничивается значением 8,4 Вт (9,24 дБ\*Вт), а при пороге 3% - 18 Вт. При сопротивлении нагрузки 4 Ом исследуемый усилитель имеет выходную мощность 16,8 Вт (9,24 дБ\*Вт) при значении THD+N равном 1% (рисунок 6. б), при 3% - 36 Вт.

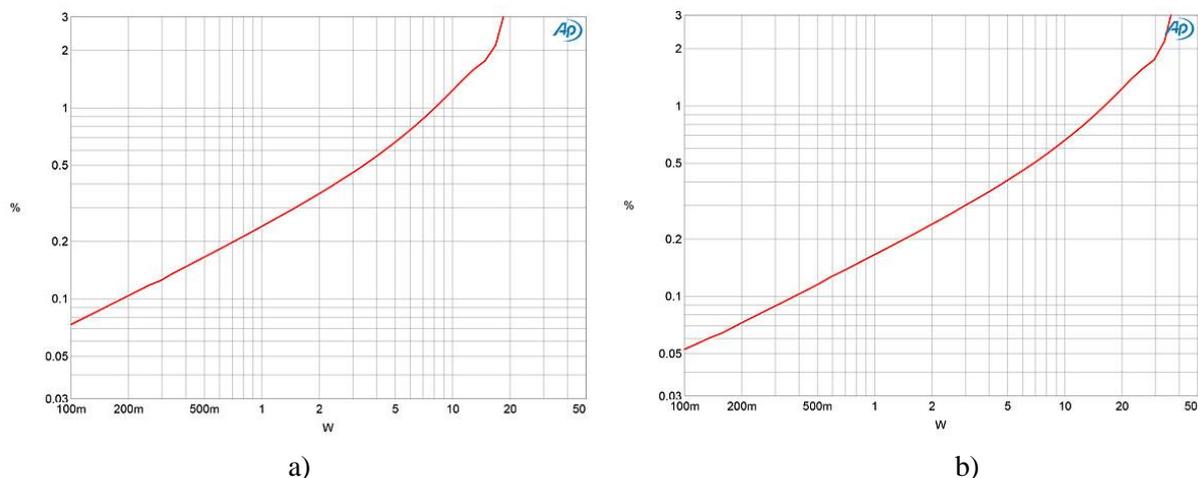


Рис. 6. Коэффициент гармонических искажений, а – на нагрузке 8 Ом, б – на нагрузке 4 Ом.

На основании графиков, представленных на рис. 6. а и рис. 6. б можно сделать вывод, что значения THD+N возрастают линейно по мере увеличения выходной мощности, что является характерным для одноконтурных УНЧ.

9) Уровень THD+N оставался практически неизменным в диапазоне частот 20 Гц – 20 кГц, но увеличивался с понижением импеданса нагрузки (рисунок 7). Синим цветом показано значение для левого канала, красным - для правого при нагрузке 8 Ом, голубым и пурпурным – соответствующие значения при нагрузке 4 Ом, серым – при нагрузке 2 Ома (левый + правый каналы).

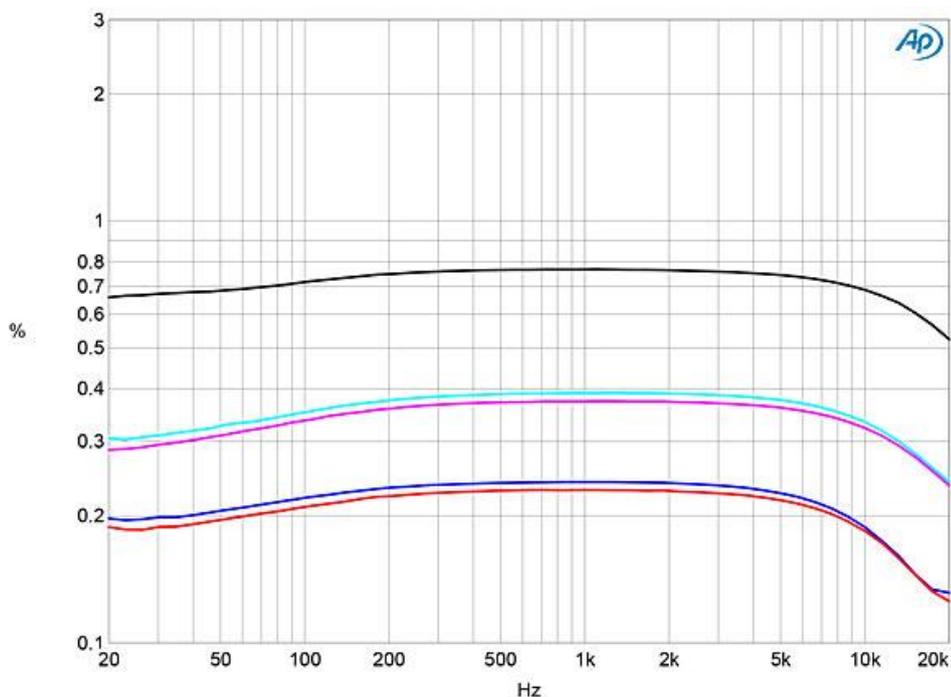
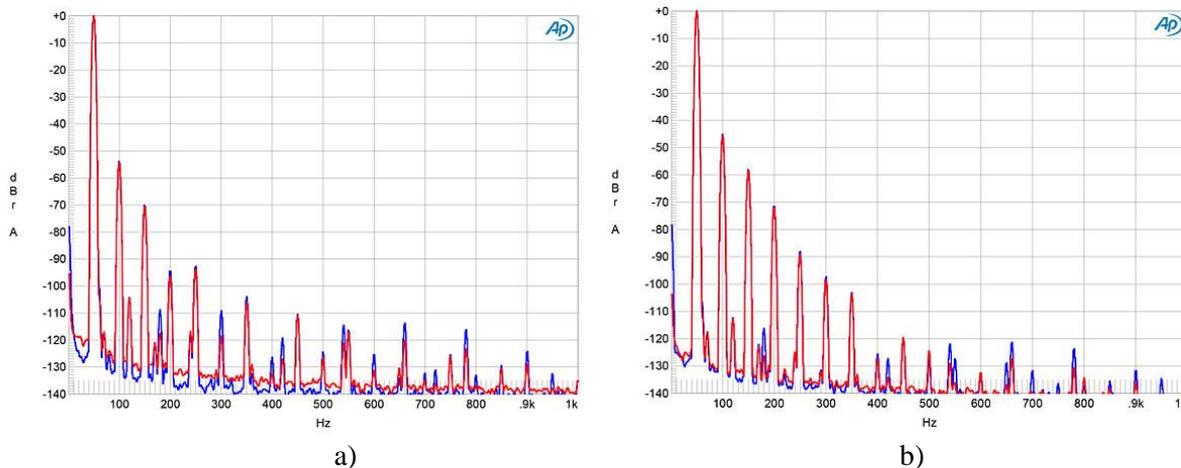


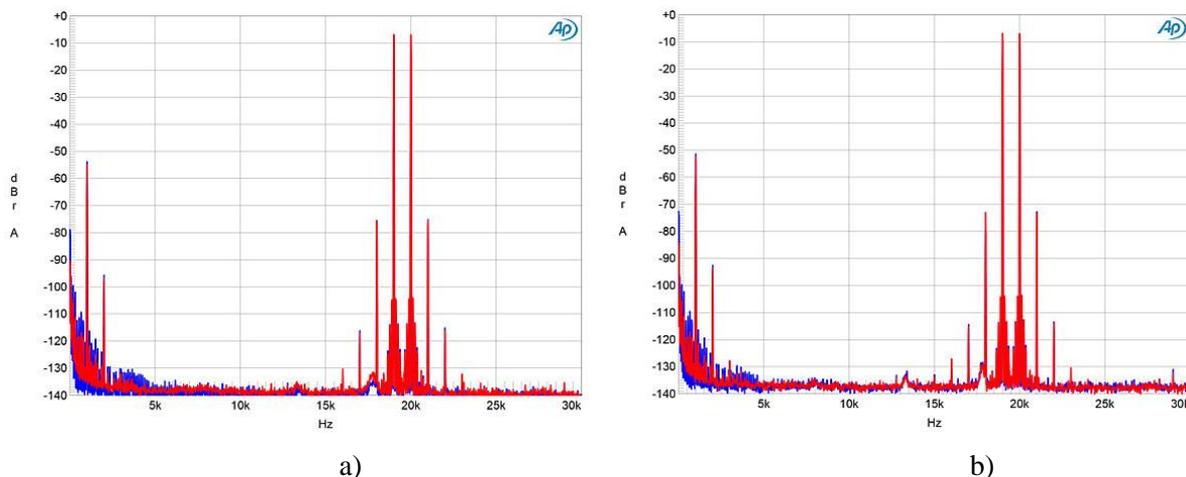
Рис. 7. Уровень THD+N в зависимости от значения импеданса нагрузки.

10) На основании исследования спектра синусоидального сигнала частотой 50 Гц на выходе исследуемого УМЗЧ при выходной мощности 1 Вт (рисунок 8. а) и 5 Вт (рисунок 8. б) на нагрузке 8 Ом можно сделать вывод, что соотношения между уровнями 2-ой и 3-ей гармоник остаются постоянными с увеличением значения выходной мощности.



**Рис. 8.** Спектр синусоидального сигнала частотой 50 Гц, а – при 1 Вт, б – при 5 Вт.

11) При подаче на вход исследуемого УМЗЧ смеси тонов 19 и 20 кГц уровни интермодуляционных продуктов более высокого порядка были относительно низкими (рисунок 9. а), хотя уровень разностного продукта второго порядка составил -54 дБ (0,15 %). При снижении импеданса нагрузки в 2 раза данные уровни сохранились (рисунок 9. б).



**Рис. 9.** Интермодуляционный спектр, а – на нагрузке 8 Ом, б – на нагрузке 4 Ом.

### Заключение

Исследованный УМЗЧ, построенный на транзисторе со статической индукцией, имеет результаты измерений, свойственные для однотактных ламповых УМЗЧ на триодах, работающих в классе А и не охваченных обратной связью.

### Список использованных источников

- 1 Field Effect Semiconductor Device Having An Unsaturated Triode Vacuum Tube Characteristics : пат. США 3,828,230 / Jun-Ichi Nishizawa ; заявл. 28.07.72 ; опубл. 06.08.74 // United States Patent Office.
- 2 Reichert, H. First Watt SIT-3 power amplifier / H. Reichert, J. Atkinson // Stereophile. – 2019. – Vol.42, №2. – P. 120-123.