

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ТРИОДЫ СЕРИИ AMT WARMSTONE

Кемпф В. А.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ламповое звучание практически изначально стало своеобразным стандартом гитарного звука и является им и по сей день. При этом наиболее часто используемыми в гитарных усилителях маломощными триодами стали сдвоенные триоды ECC83 (12AX7). Несмотря на несомненные музыкальные заслуги этого триода, у него есть некоторые недостатки, общие для всех вакуумных приборов (хрупкость, низкий КПД, ограниченность ресурса, ухудшение характеристик с течением времени и т.д.), что издавна приводило инженеров-разработчиков к мысли о создании устройств, заменяющих лампы, но лишенных вышеуказанных недостатков.

Еще в 70-е годы XX-го века в музыкальной индустрии были осуществлены первые попытки применения полупроводниковых заменителей маломощных ламп. В ряде моделей фирма Mesa-Boogie, например, в первом каскаде вместо обычного в этом месте триода 12AX7 использовала продукцию фирмы Fetron. Следует отметить, что продукция Fetron предназначалась в первую очередь для телефонных станций, где она применялась с конца 60-х годов из соображений экономии электроэнергии. Заменители ламп от FETRON строились по каскодной схеме, что обеспечивало способность работать при высоких напряжениях, но имели пентодные выходные характеристики, что отчетливо видно на графиках выходных ВАХ [1, 2], поэтому прямая замена триодов на приборы с пентодной ВАХ приводила к сильным различиям в звуке. Это обстоятельство, безусловно, сыграло немалую роль в том, что музыкальная общественность достаточно прохладно встретила подобное новшество в гитарных усилителях и, как показало время, заменители ламп от FETRON не прижились в мире музыки.

Некоторое время назад некоторые компании, также осуществили значимую попытку штурма «ламповых высот». К сожалению, производители не сопроводили свои изделия достаточной технической документацией, поэтому мы не в праве говорить ни о триодности вольт-амперных характеристик (ВАХ), ни о других аспектах эмуляции поведения вакуумного триода, особенно при работе с сигналами больших уровней. Мы лишь констатируем факт выпуска заменителей ламп, оставив музыкальной общественности право самой сформировать мнение о звуковых свойствах этих приборов.

Компания AMT имеет свои традиции построения заменителей ламп. В 2007 году инженеры компании применили свой вариант каскодного включения JFET и при БТ в преампе SS-20, что позволило разгонять сигнал без ограничения до нескольких сотен вольт при минимуме собственных шумов. Затем в каскады были введены цепи, эмулирующие сеточное ограничение, и форма сигнала стала очень близка к форме сигнала на 12AX7. В 2007-м на основе работы [3] компания начала разработку низковольтных каскадов, эмулирующих поведение триодов в ограничении. Несмотря на использование полевых транзисторов с пентодными характеристиками, инженерам компании удалось получить формы сигналов, подобные ограничению сигналов вакуумного триода и в 2008 году свет увидела первая серия преампов LegendAmps (LA). В 2011-м году в результате кропотливой работы по модернизации низковольтных каскадов появилась серия LA2, продолжающая традиции использования полевых транзисторов в гитарных преампах.

К 2012 году инженерами AMT был накоплен большой опыт разработки полупроводниковых каскадов, в той или иной мере заменяющих вакуумные триоды, и в начале 2012 года в компании AMT начались активные работы по созданию полных функциональных полупроводниковых аналогов популярных ламп, используемых в гитарных усилителях.

В настоящей статье мы познакомим читателя с основными моментами, характеризующими звучание вакуумных триодов в гитарных усилителях и их реализацией

в твердотельном триоде **AMT WARMSTONE**. Описание работы мощных твердотельных пентодов и тетродов предполагается в ближайшем будущем в отдельной статье.

ОБЩИЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТРИОДА

1. Триодный характер звучания вакуумного триода в линейной области во многом определяется формой выходных характеристик, а именно сильной зависимостью анодного тока I_a , от анодного напряжения U_a при фиксированном потенциале управляющей сетки $U_g = \text{const}$ (рис.1).

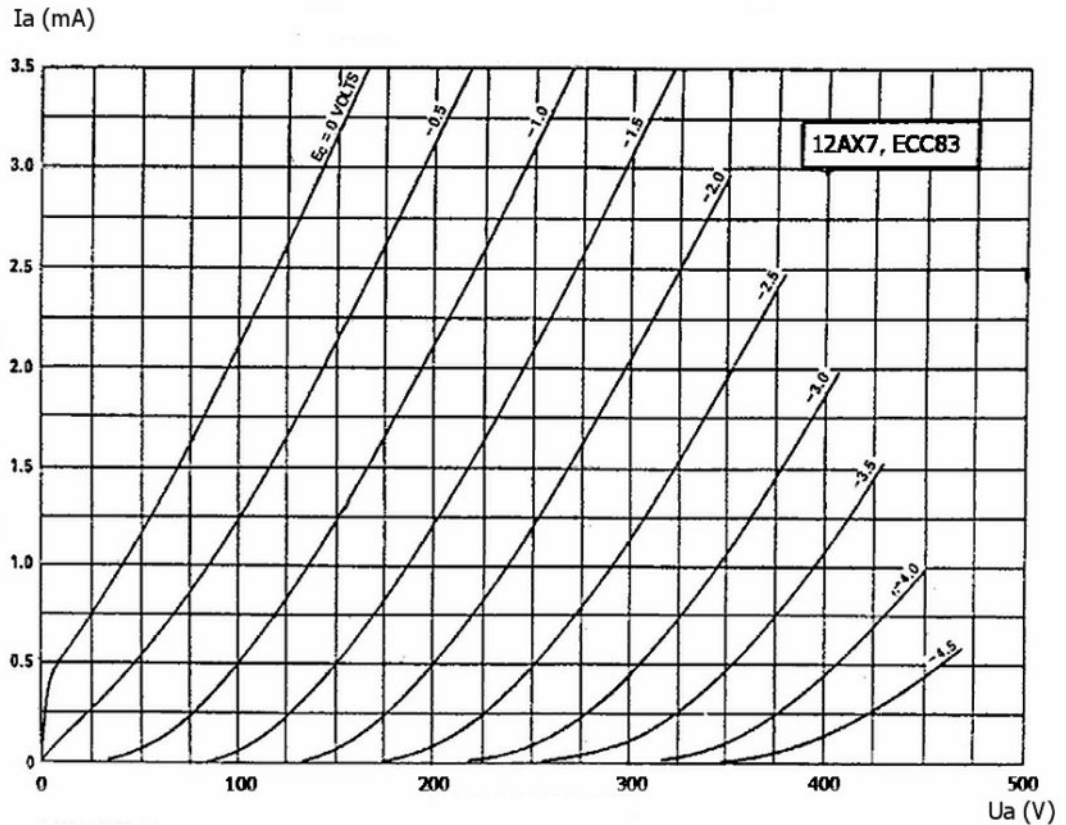


Рис.1. Анодные вольт-амперные характеристики 12AX7, ECC83

В триоде изменение потенциала анода U_A под действием сигнала на сетке U_G приводит к изменению электрического поля \vec{E}_A между анодом и катодом, которое суммируется с полем управляющей сетки \vec{E}_G таким образом, что препятствует изменению поля сетки под действием U_G (рис.2), что определяет наличие в триоде внутренней отрицательной обратной связи – параллельной ООС по напряжению [5].

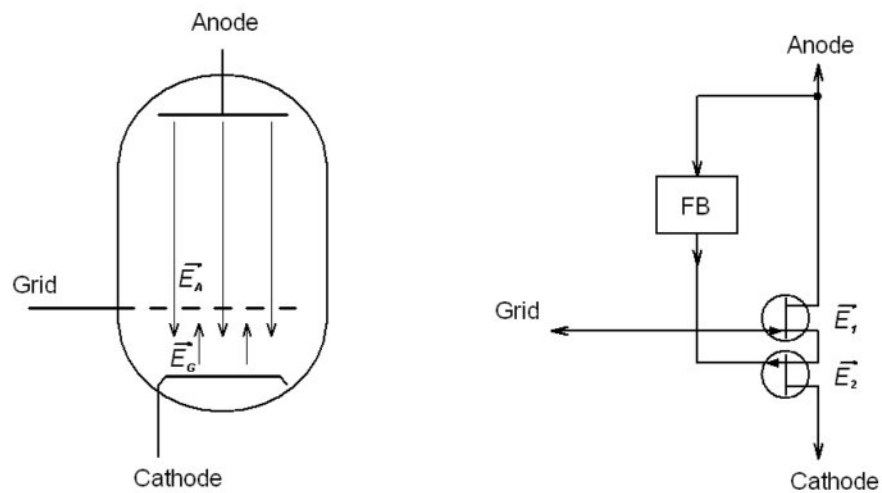


Рис.2. ООС вакуумного триода и организация управления полем в триоде АМТ

Результирующее поле, управляющее током через триод $\vec{E}_\Sigma = \vec{E}_G + \vec{E}_A$, отличается от поля сетки прибора с пентодной ВАХ наличием компоненты \vec{E}_A [5]. Таким образом, введением в пентодный прибор внешнего управления с анода полем входной сетки реализуется триод (в случае электровакуумного пентода для этого достаточно соединить экранирующую сетку с анодом).

Среди полупроводниковых приборов наиболее близкими к пентоду ВАХ обладают полевые транзисторы, комбинированное сочетание которых позволяет получить возможность одновременного полевого управления и с входной сетки и с «анода» (рис.2). При соответствующей организации обратной связи, управляющей нижним транзистором (при обеспечении условий: $\vec{E}_2 \approx \vec{E}_A$ и $\vec{E}_1 \approx \vec{E}_G$), такая структура работает как триод, в котором управление током, как и в вакуумных приборах, осуществляется электрическим полем.

Базовая схема триода АМТ 12АХ7WS изображена на рис.3.

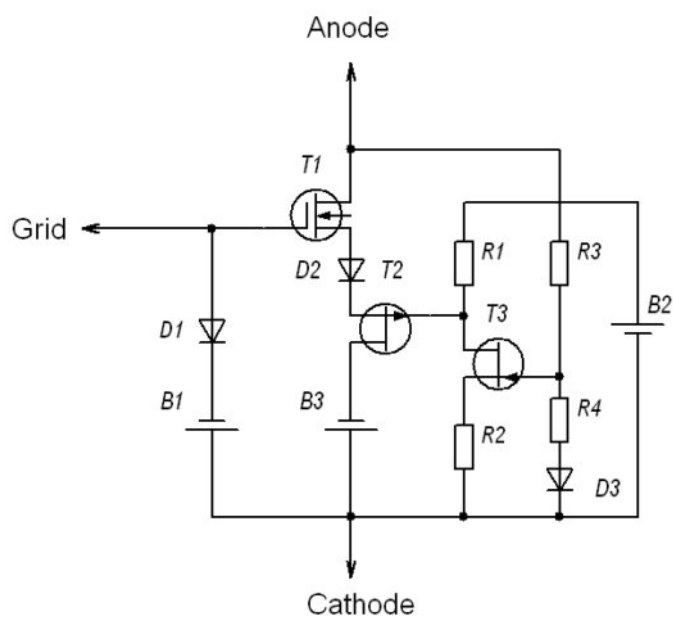


Рис.3. Схема полупроводникового триода с полевым управлением.

В приведенной базовой схеме (рис.3) T1 – МДП-транзистор обедненного типа, т.е прибор с пентодной ВАХ.

Узел коррекции ВАХ реализован в каскаде на T3. Необходимая для точного воспроизведения ВАХ вакуумного триода нелинейность каскада определяется наличием диода D3 и нелинейностью сопротивления канала T2, включенного по схеме повторителя. Транзистор T2, управляемый каскадом на T3, поддерживает необходимый потенциал на истоке T1, обеспечивая требуемые ВАХ. Отношение R1 и (R2+g), где g–сопротивление канала T2 определяет степень веерообразности ВАХ, а также совместно с делителем R3R4 устанавливает внутреннее усиление триода - μ_0 . D3 формирует ВАХ при низком анодном напряжении в области напряжений на сетке, близких к нулю.

Диод D2 – разделительный. Он обеспечивает отсечку анодного тока при любых отрицательных напряжениях ниже напряжения закрывания «лампы» [6]. Кроме того, D2 участвует в формировании важного в звуке плавного загиба ВАХ в области малых токов анода.

Подобная структура позволяет получать зависимости тока анода от напряжения на аноде с выраженной «триодной» областью I (рис.4). Начиная с некоторого критического напряжения на аноде (на рисунке выделено красной линией) ВАХ перестает быть триодной, переходя в «пентодную» область II.

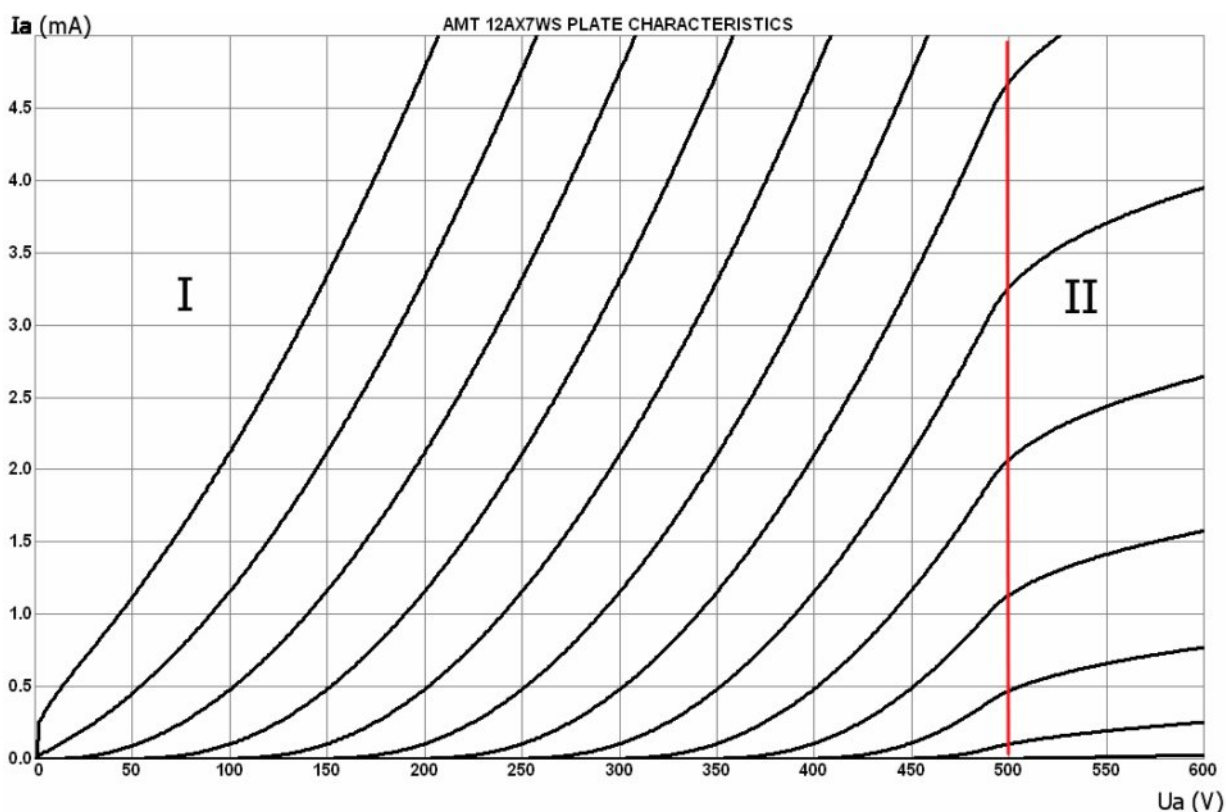


Рис.4. Триодная и пентодная области анодной ВАХ триода с полевым управлением

Граница перехода в пентодную область зависит от параметров примененных компонентов и в триодах AMT-12AX7-WS составляет не менее 500В.

2. Второй важной особенностью вакуумного триода, во многом определяющее звучание, особенно в перегруженных гитарных усилителях, является наличие тока катод-сетки при близких к нулю напряжениях на сетке относительно катода [3].

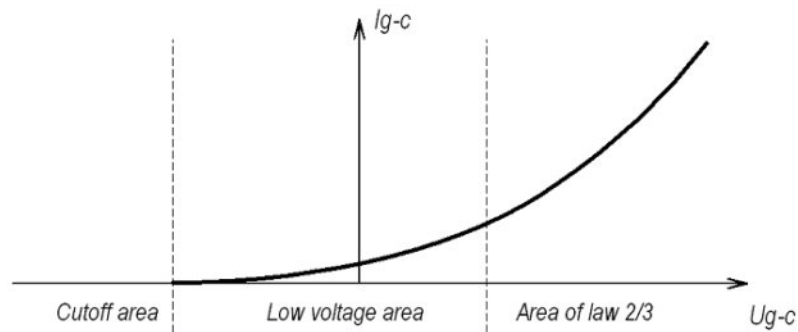


Рис.5. Обобщенная зависимость тока сетки от напряжения сетка-катод

Из рисунка 5 видно, что в вакуумном триоде даже при нулевом напряжении на сетке относительно катода течёт ток электронов из катода в сетку. Этот эффект объясняется тем, что самые быстрые электроны преодолевают потенциальную яму пространственного заряда электронного облака около катода и притягиваются к сетке. Для 12AX7 полная отсечка тока сетки наступает только при подаче запирающего отрицательного напряжения порядка $-1,5$ В и ниже.

При разработке триодов серии WarmStone особое внимание было уделено воспроизведению уровней отсечки сеточного тока и сохранению зависимости напряжение-ток в области малых напряжений в соответствии с аналогичными характеристиками вакуумных 12AX7. Узел формирования сеточного тока реализован из источника отрицательного напряжения В2 и цепи полупроводниковых диодов D1 (рис.3), реализующих совместно необходимую ВАХ входного диода сетка-катод. Выбор типа и количества диодов, а также напряжения смещения в цепи сетки АМТ-12AX7-WS осуществлен исходя из критерия наиболее точного соответствия зависимости ток-напряжение вакуумному прототипу (рис.6).

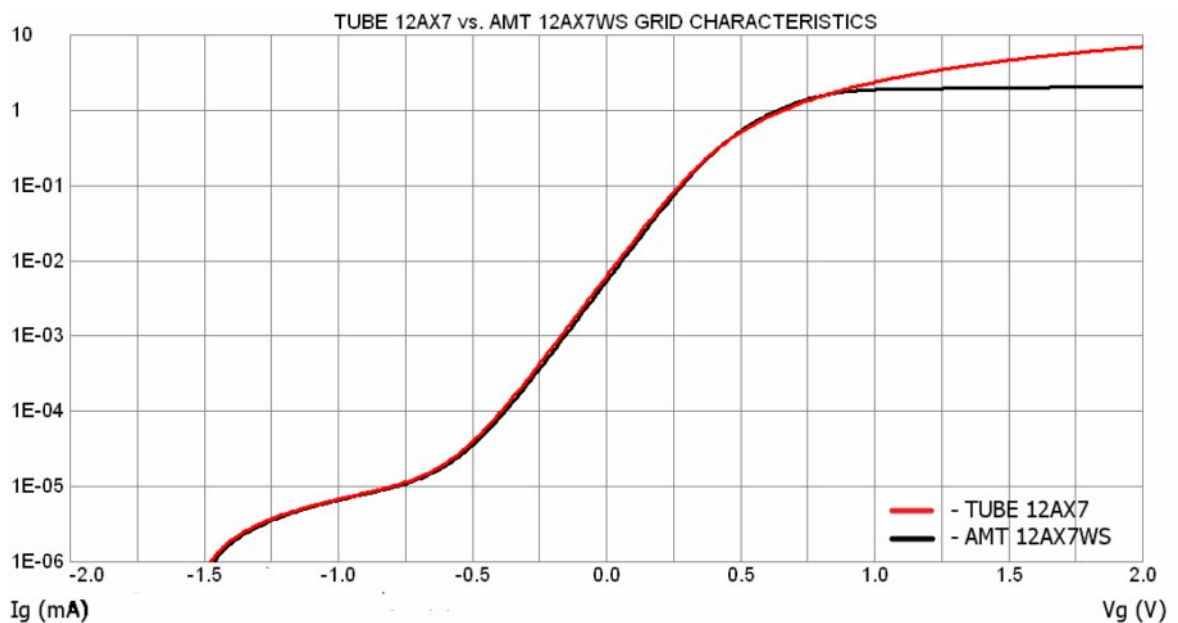


Рис.6. Зависимость тока сетки от напряжения сетка-катод для вакуумного и полупроводникового триодов 12AX7

Как видно из рис.6 в области $-1,5...+0,7$ В зависимости практически совпадают. При напряжениях же выше $+0,7$ В наблюдаемое расхождение не оказывает влияние на адекватность работы полупроводникового триода, так как величина сеточных токов в реальных схемах на 12AX7 практически всегда ограничена величиной $0,5...1$ мА.

Насыщение тока сетки на уровне 2мА является результатом конкретной схемотехники АМТ-12АХ7-WS и указано для учета этой особенности в случае особых применений триода с существенными токами сетки.

Примечание! Характеристики вакуумных приборов разных производителей, и характеристики внутри серии даже у одного и того же производителя порой значительно разнятся. При разработке АМТ-12АХ7-WS компания АМТ ориентировалась в первую очередь на стандартные паспортные данные 12АХ7 (ЕСС83) и экземпляры ламп различных производителей, наиболее полно соответствующих промышленному стандарту на 12АХ7.

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

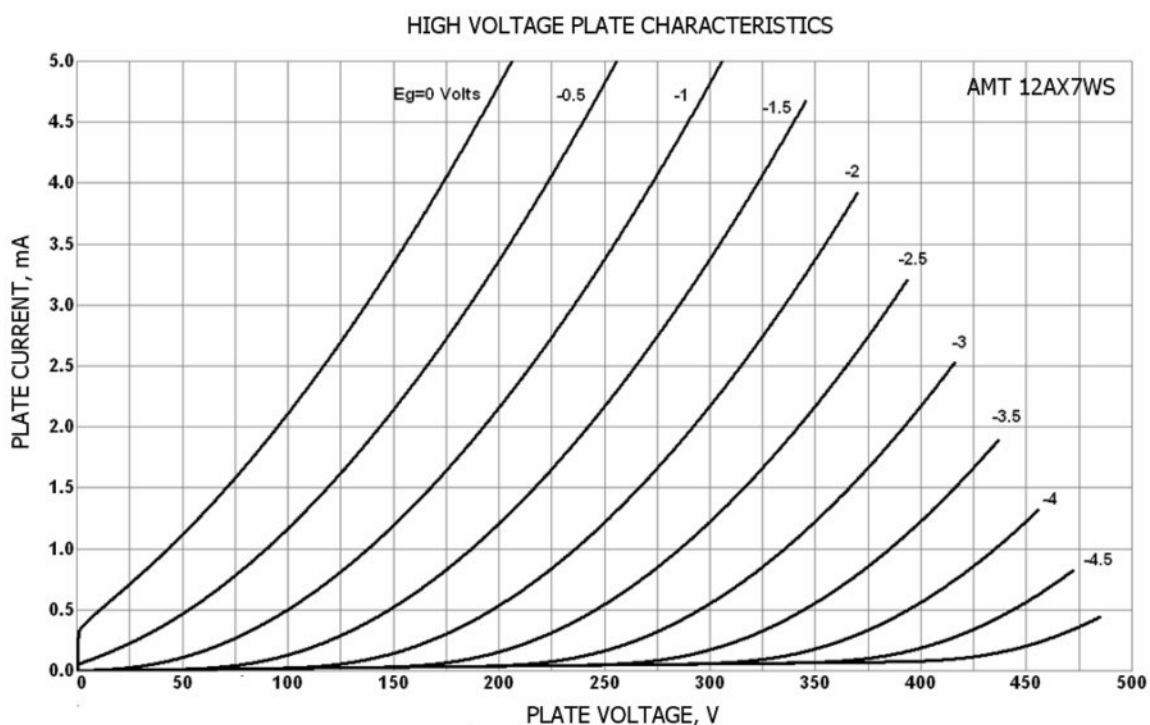


Рис.7. Выходные характеристики $I_a=f(U_a)$ ($U_g=0...-5V$)

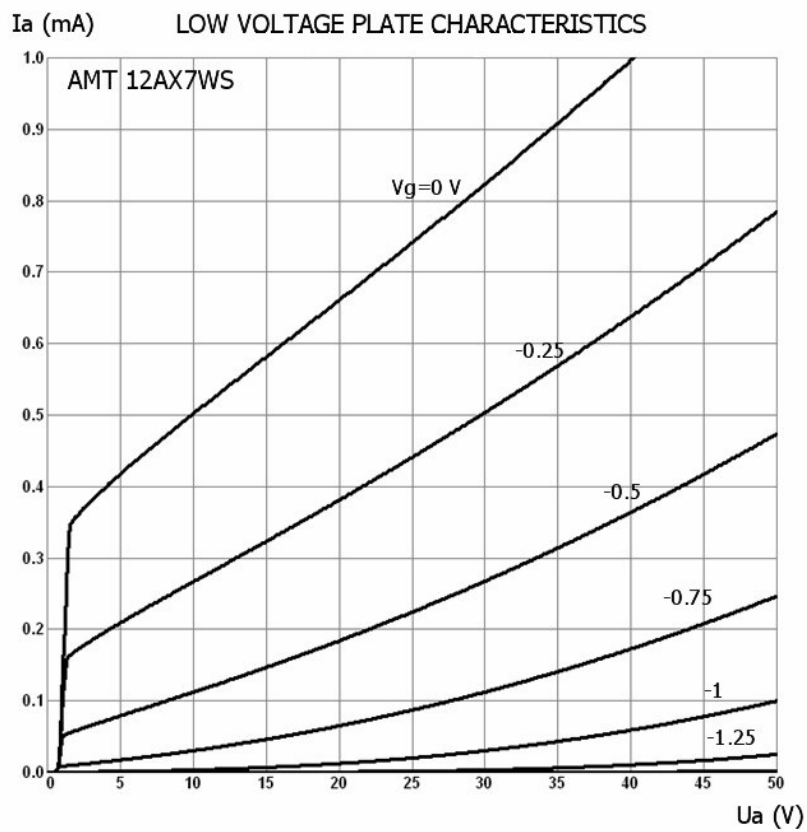


Рис.8. Начальная область выходных характеристик $I_a=f(U_a)$ ($U_g=0\dots-1.5V$)

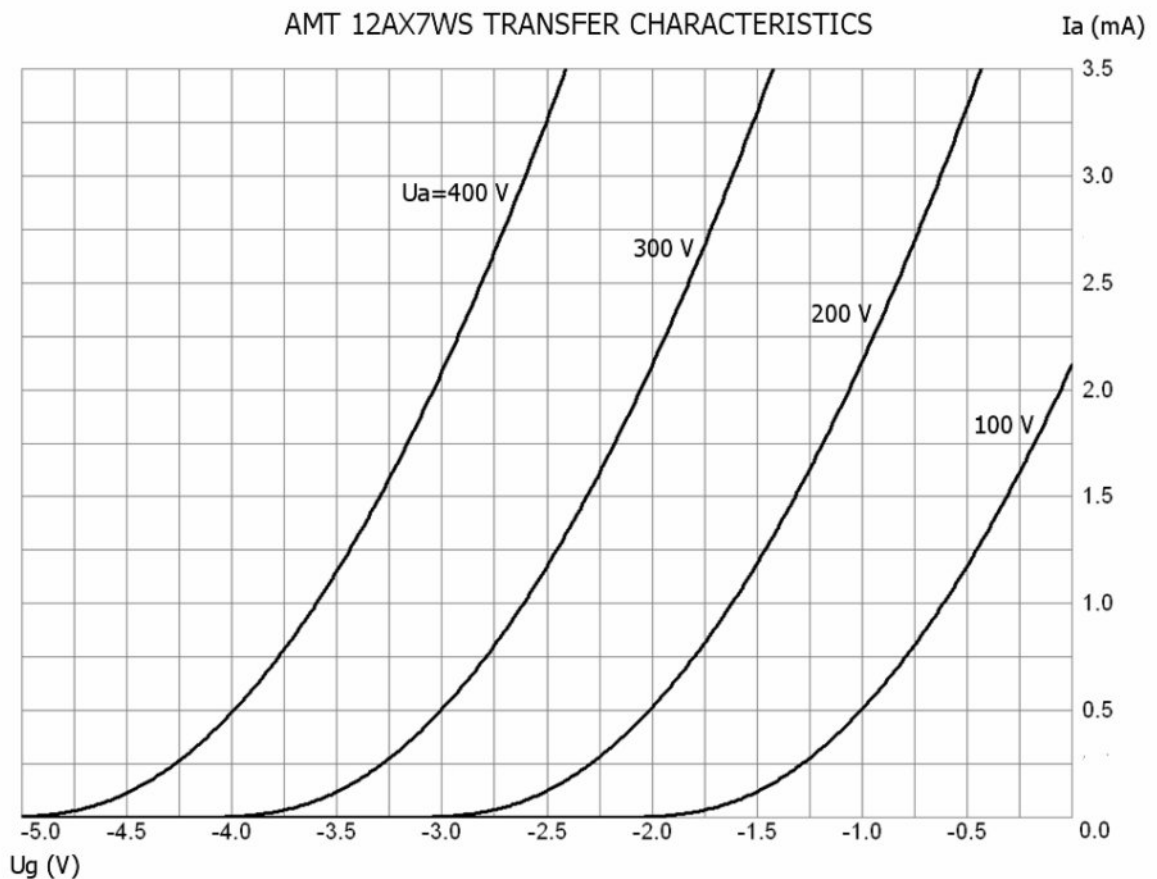


Рис.9. Передаточные характеристики АМТ 12АХ7WS

ЛИТЕРАТУРНЫЕ ИСТОЧНИКИ:

1. FETRON, solid state vacuum tube replacement. Teledyne semiconductor. June 1973.
2. World's only all FETRON RADIO & the OMEGA device. Dr. H. Holden. Dec 2011.
<http://www.worldphaco.com/uploads/WORLDFETRON.pdf>
3. Кемпф В. А. ПТ-эмуляция триодного ограничения.
<http://www.sugardas.lt/~igoramps/article68/article.htm>
4. Гришин В. А. Внутренняя обратная связь в электровакуумном триоде.
http://www.audioworld.ru/Books/Tubes/tub_02.html
5. H. Stockman, S.D. Inherent Feedback in Triodes. Wireless Engineer, April 1953. Page 29.
<http://www.next-tube.com/articles/Stockman/Stockman.pdf>
6. Крюков М. Г. Некоторые нюансы использования MOSFETов в качестве повторителей в ламповых гитарных усилителях.
<http://milas.spb.ru/~kmg/irf.html>