

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.7>

УДК 621.391.822

ФЛИККЕР-ШУМ. ОСОБЕННОСТИ, РАЗНООБРАЗИЕ И УПРАВЛЕНИЕ**А. С. Мацаев**

Статья поступила в редакцию 28 октября 2020 г.

Аннотация. Статья относится к области исследований шумовых флуктуаций или фликкер-шумов в электронных усилителях. Показано многообразие формы фликкер-шума в энергетическом и частотном измерении. Проявление фликкер-шумов не ограничивается сверхнизким частотным диапазоном, а при определённых условиях может распространяться на средние и высокие частоты. Освещаются некоторые области радиоэлектроники, подверженные воздействию или использующие свойства фликкер-шумов. Показывается, что фликкер-шумы имеют предельный уровень нарастания в соответствии с энергией и частотной полосой формирующими его тепловыми и дробовыми шумами. Показано, что для электронных усилителей фликкер-шум нецелесообразно аппроксимировать упрощённым соотношением $1/f$. Приводятся методы ликвидации или нивелирования фликкер-шума.

Ключевые слова: фликкер-шум, $1/f$ – аппроксимация, флуктуационный шум, тепловой шум, дробовый шум, нелинейность, дрейф, смещение, нулевая составляющая.

Abstract. The article refers to the field of research of noise fluctuations or flicker noises in electronic amplifiers. The variety of flicker noise in the energy and frequency dimension is shown. The manifestation of flicker noise is not limited to ultra-low frequency range, but under certain conditions can extend to medium and high frequencies. Some areas of radio electronics exposed or using flicker noise properties are illuminated. It is shown that flicker noises have a limit level of build-up in accordance with the energy and frequency band forming its thermal and fractional noises. It is shown that for electronic amplifiers flicker-noise is impractical to

approximate the simplified ratio of $1/f$. Methods of elimination or leveling of flicker noise are given.

Keywords: flicker-noise, $1/f$ - approximation, fluctuation noise, thermal noise, fractional noise, nonlinearity, drift, displacement, zero component.

Введение

Предыдущая статья [1] была посвящена определению физической сущности фликкер-шумов в электронных усилителях. Было показано, что на нелинейности эмиттерно-базового перехода транзистора любые сигналы, в том числе тепловые и дробовые шумы, подвергаются искажению с выделением дополнительной нулевой составляющей. Наведённая от нелинейности нулевая составляющая интегрируется, накапливается на разделительном конденсаторе и удерживается на время интеграции его цепи. Накопленный на разделительном конденсаторе постоянный потенциал приводит к дополнительному положительному смещению эмиттерно-базового перехода, что в свою очередь приводит к увеличению постоянной составляющей базового и соответственно коллекторного тока транзистора и пропорциональному ему увеличению усиления. В результате появляется усиленный сверхнизкочастотный шумовой сигнал или фликкер-шум, со всеми проявлениями случайной величины, поскольку образуется из случайного теплового и дробового шума.

То же самое можно изложить иначе. Приведённый к входу усилителя шум отделяется эмиттерно-базовым переходом транзистора от совокупного шумового генератора, - коллектора входного транзистора и всех последующих шумящих элементов электрической схемы, вплоть до нагрузки. От совокупного шумового генератора энергия шума через эмиттерно-базовый переход и пассивные цепи попадает на входной разделительный конденсатор, по существу, это аналоговый детектор. На разделительном конденсаторе накапливается постоянная или нулевая составляющая от воздействующих на аналоговый детектор шумов. Уровень накопленной нулевой составляющей определяется и изменяется в соответствии с энергией совокупного шумового

генератора, сформированного из теплового и дробового шумов, что и является фликкер-шумом.

Другими словами, воздействие сигнала на нелинейный элемент приводит к управляемому этим сигналом дрейфу рабочей точки за счёт добавления его нулевой составляющей к электродвижущей силе постоянного смещения. В том случае, если на нелинейный элемент кроме электродвижущей силы постоянного смещения воздействуют только тепловые и дробовые шумы, порождаемый ими шумовой дрейф рабочей точки и является фликкер-шумом.

Для анализа электрических величин и характеристик, в том числе шумов, как и прежде [1], используется техническое средство LTspiceXVII американской корпорации Linear Technology. Это позволяет в оценке физических величин и процессов положиться на авторитетное техническое средство и не отвлекаться от своих целей. Анализ шума здесь проводится с учётом шумового вклада всех элементов электрической схемы средней интеграции, в том числе учитывается вклад электрических соединений. Выбор этого технического средства дополнительно удобен тем, что позволит без значительных ресурсных затрат проверить результаты.

1. Особенности и разнообразие Фликкер-шума

На практике представляет интерес не только физика происходящих процессов, но и прикладные возможности её понимания и применения.

Далее объясняются некоторые особенности фликкер-шума на основе понимания физики происходящих процессов [1]. Приводятся различные практические, в том числе прикладные, варианты использования физики фликкер-шума. Формулируется понимание разновидностей и значимости флуктуирующих шумов.

Для дальнейших разбирательств удобно снова [1, 2] использовать электрическую схему усилителя “100W” рис.1 и его необходимые модификации.

От оригинала [2] электрическая схема рис.1 отличается изменением номинала резистора R16, - с 1 кОм до 10 кОм. Необходима такая замена, так

как замечено, что стабилизатор тока, выполненный на транзисторах Q9 и Q10 (с соответствующей обвязкой) после включения питающего напряжения V1 и V2 входит в нормальный режим стабилизации тока с некоторой задержкой в 8-10 мс. В зависимости от того, какой из источников питания включен первым, в течении этой задержки, эмиттерно-базовые переходы транзисторов Q7 и Q8 подвергаются воздействию обратных потенциалов в пределах 43 ± 2 В, что на порядок превышает допустимое значение для кремниевого транзистора. При номинале резистора R16 в 10 кОм такое явление полностью исключается.

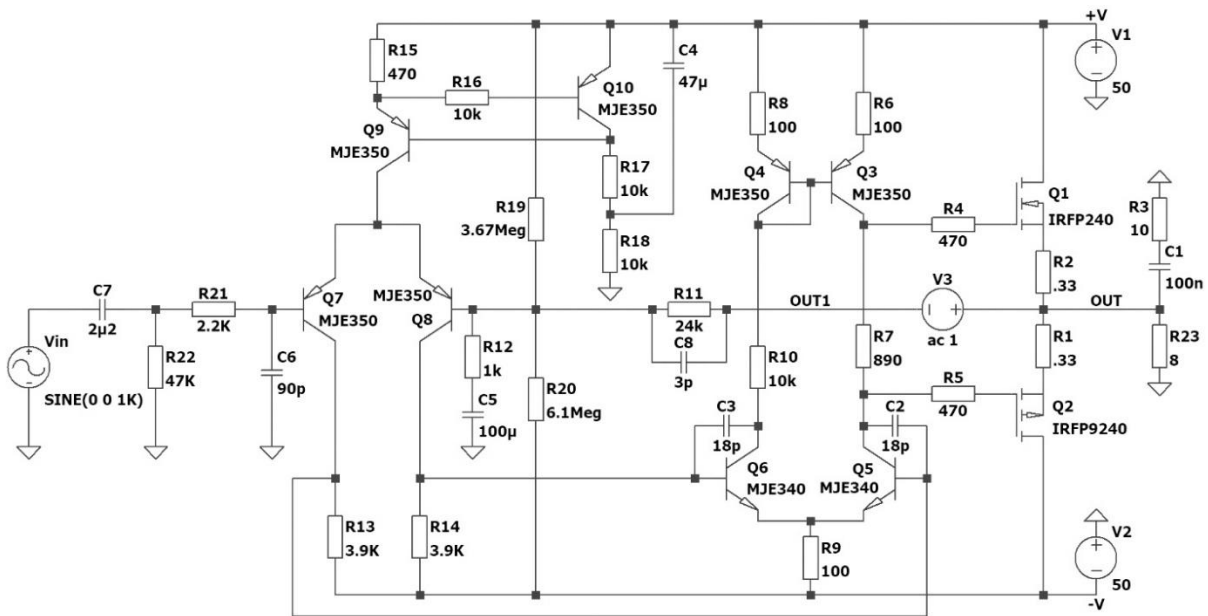


Рис. 1. Усилитель мощности “100W” фирмы Linear Technology.

Модифицируем или несколько изменим электрическую схему усилителя “100W”, как это показано на рис. 2 и назовём её “100WE”. Здесь исключены режекторные фильтры низких и верхних частот, выполненные на конденсаторах C5 для низких частот и C6 для высоких частот. Изменены номиналы балансирующих резисторов R19, R20 и к ним добавлен R24, номинал резистора R12 также изменён на 2 кОм, так чтобы суммарное сопротивление резисторов R19, R20, R24 и R12 осталось прежней величиной в 1 кОм, для удобства оперативного расчёта коэффициента усиления $K_y = (1\text{кОм} + R11)/1\text{кОм}$. В приведённом на рис. 2 варианте электрической схемы $K_y = 3$ и его легко можно изменить при необходимости.

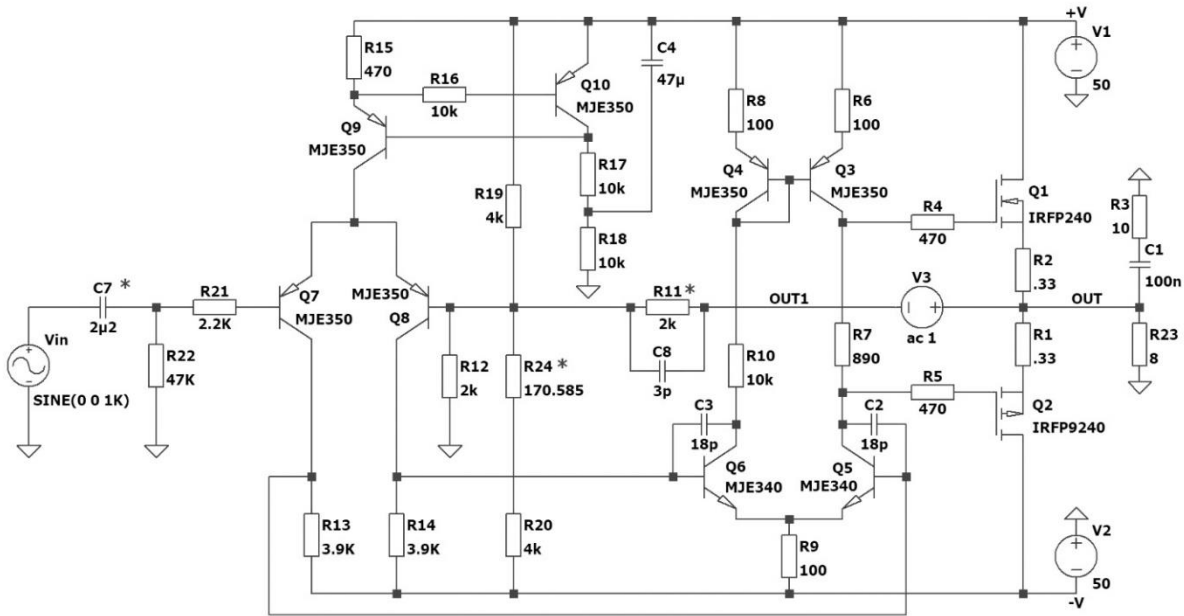


Рис. 2. Электрическая схема усилителя “100WE”.

Снова, как в работе [1, рис. 7] на рис. 3 демонстрируется семейство графиков шума усилителя “100WE” для разных значений конденсатора $C7$, только не эквивалентного входного шума, а шума на нагрузке усилителя. Интенсивность шумов увеличилась на коэффициент усиления $K_u = 3$ и важно учитывать, что это шум на нагрузке 8 Ом. Соотношение фликкер-шума к суммарным тепловым и дробовым шумам осталось прежней 11-ти кратной величиной.

Сейчас уместно обратить внимание на то, что реальный фликкер-шум весьма приближённо аппроксимируется линейным соотношением $1/f$, и только на очень малом участке графика. На самом деле фликкер-шум возрастает по экспоненте и далее по экспоненте асимптотически приближается к своему предельному уровню, определяемому [1] в соответствии с частотной полосой и энергетическим уровнем тепловых и дробовых шумов. Процесс нарастания фликкер-шума происходит для разных величин конденсатора $C7$ на разных частотах (рис.3).

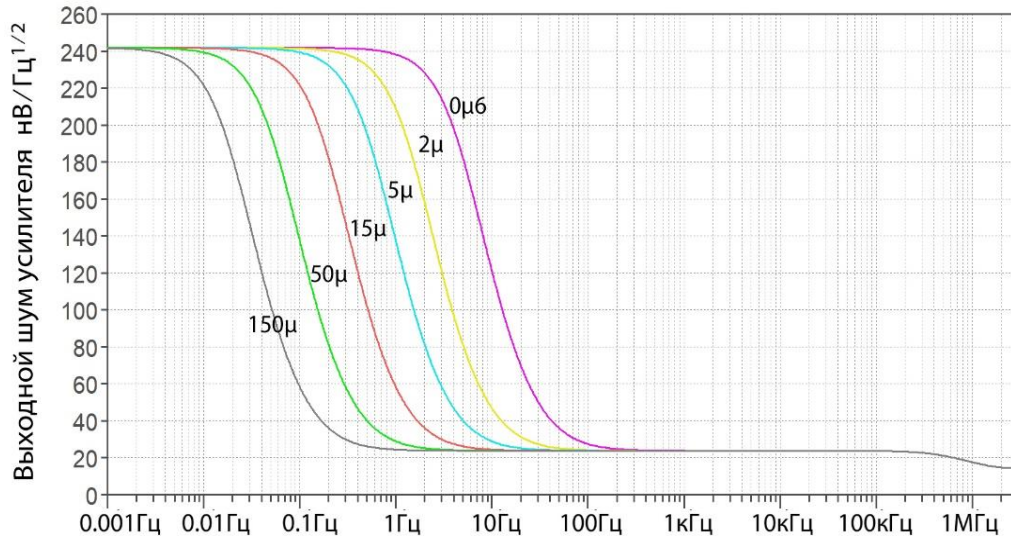


Рис. 3. График шума усилителя “100WE” для разных значений $C7$.

Для формирования плоского участка фликкер-шума необходимо и достаточно, чтобы фазовый сдвиг на конденсаторе $C7$ был близок 0° на соответствующих частотах анализируемого диапазона. Внутри интервала фазовых сдвигов $0^\circ - 90^\circ$, наблюдается нелинейное изменение уровня фликкер-шума от максимального значения к уровню тепловых и дробовых белых шумов. Там, где фазовый сдвиг конденсатора $C7$ близок или равен 90° , фликкер-шума нет. Здесь невозможно интегральное накапливание динамической постоянной составляющей тепловых и дробовых шумов, поскольку реактивное сопротивление $C7$ на этих частотах слишком мало, исключается накапливание несимметричного заряда на обкладках конденсатора.

Будем уменьшать величину конденсатора $C7$ и получим на рис. 4 расширенное семейство графиков фликкер-шума. На рис. 5 демонстрируется график шумов усилителя “100WE” только для одной величины конденсатора $C7 = 0\text{н}001$, здесь совокупный белый шум содержит 92% фликкер-шумов и только 8% приходится на тепловые и дробовые шумы. Это в основном белые фликкер-шумы в частотной полосе более мегагерца. На рис. 6 приводится осциллограмма этого шума.

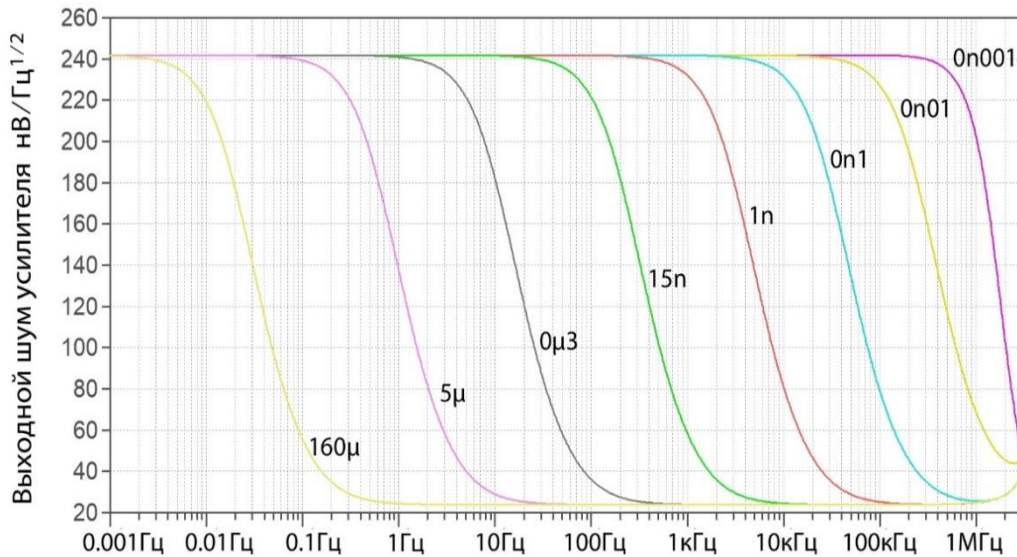


Рис. 4. Расширенный график шума усилителя для разных значений $C7$.

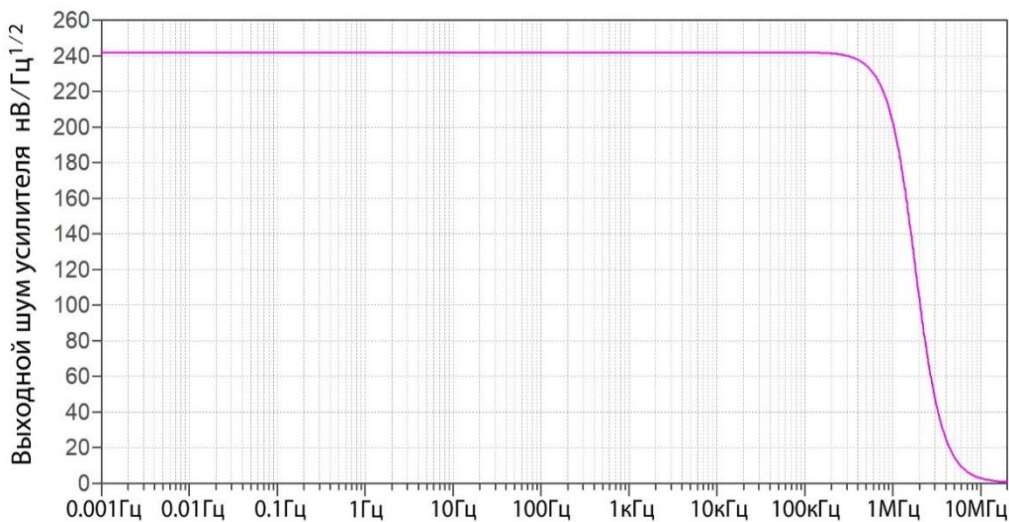


Рис. 5. График шума усилителя “100WE” для $C7 = 0n001$.

Увеличим коэффициент усиления до $K_y = 50$, для чего в усилителе “100WE” заменим номиналы регулировочных элементов на следующие значения: $R_{24} = 113.67495213 \text{ Ом}$; $R_{11} = 49 \text{ кОм}$. Снова получим график шумов рис. 7 усилителя “100WE”.

Теперь можно констатировать факт, что мы получили вполне конкурентноспособный генератор белого шума, который состоит на 92% из флуктуирующих шумов или фликкер-шумов. На рис. 8 приводятся сведения о

работе такого генератора белого шума в условиях изменения температуры окружающей среды от -30 до $+110$ °C с шагом в 20 °C.

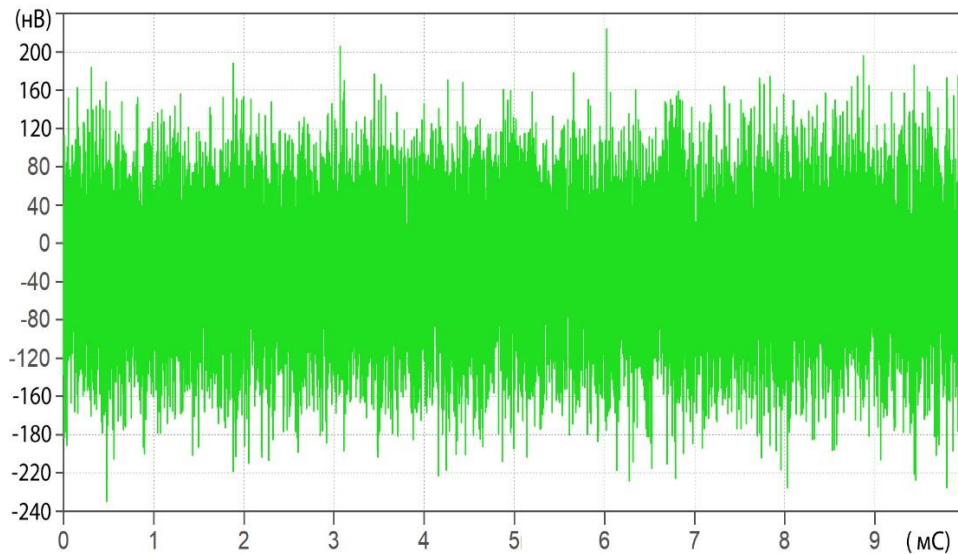


Рис. 6. Осциллограмма совокупного белого шума с содержанием 92% фликкер-шумов и 8% тепловых и дробовых шумов.

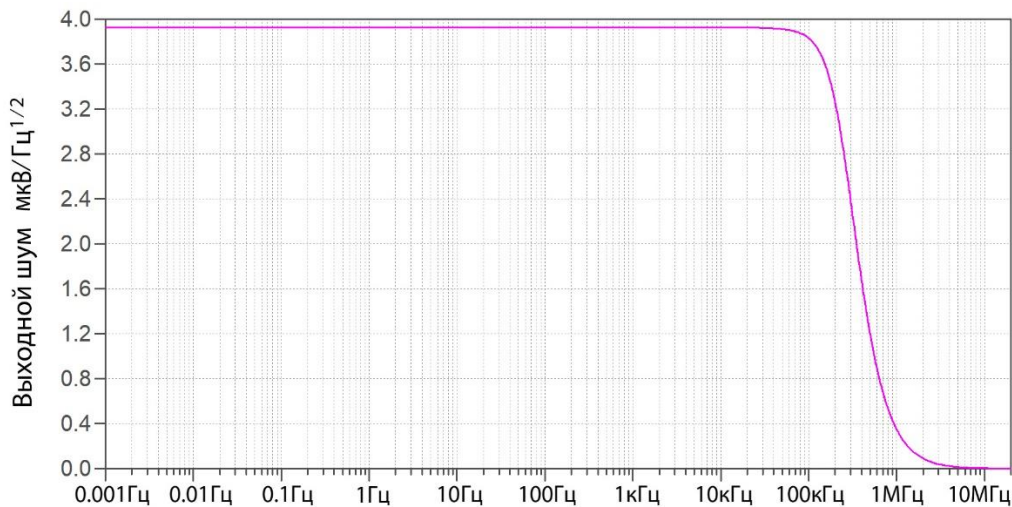


Рис. 7. Белый шум флюктуационного шумового генератора.

Следует отметить, что подобные генераторы шума интуитивно, без понимания физики формирования подобного широкополосного белого шума строились для своих нужд разработчиками разных организаций ещё в 70÷80

годы прошлого века. Технические решения с фактическим использованием широкополосного фликкер-шума также можно найти в работах [3-5].

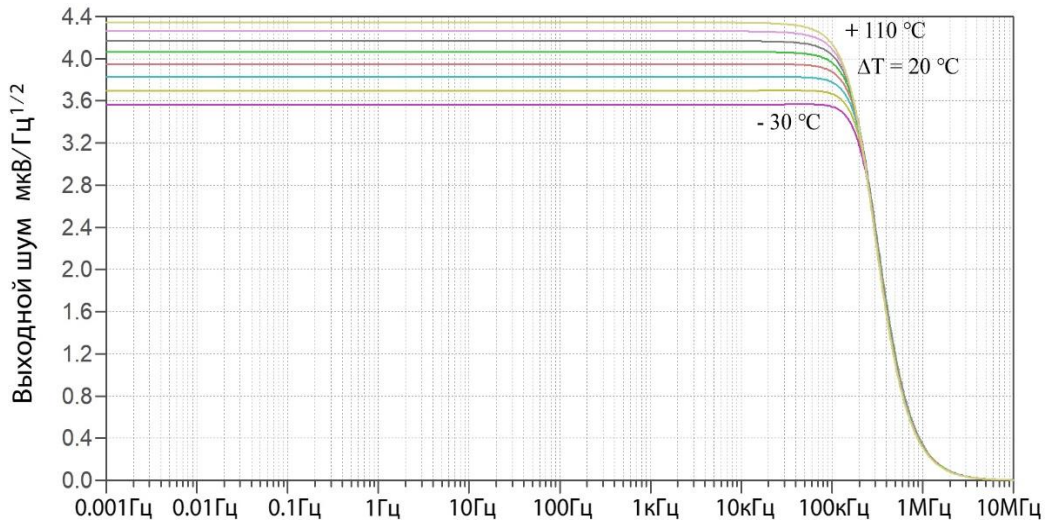


Рис. 8. Белый шум флюктуационного шумового генератора в диапазоне температур от -30 до +110 °C.

Понимание физики фликкер-шума [1] и управляемого сигналами дрейфа рабочей точки электронных устройств помогает решить некоторые проблемные задачи проектирования, реализации и регулирования различных радиоэлектронных устройств. Понимание факта и численного определения [1, 6] того, что воздействие сигнала на нелинейный элемент приводит к управляемому этим сигналом дрейфу рабочей точки за счёт добавления его нулевой составляющей к электродвижущей силе постоянного смещения, уже помогало [6] разобраться в некоторых вопросах устойчивости электронных устройств. Ранее, в своей работе [6] автору удалось получить простую и исключительно полезную зависимость $\alpha \geq k$ для условия соблюдения устойчивости по критерию Рауса-Гурвица в маломощных усилителях с глубокой положительной обратной связью, где α – коэффициент стабилизации постоянной составляющей коллекторного тока транзистора; k – коэффициент регенерации сигнала. Результаты полученного соотношения $\alpha \geq k$ полностью подтвердились экспериментально в широком диапазоне температурных, конструктивных и иных дестабилизирующих факторов.

Полагаем, что в будущем разработчиками радиоэлектронных устройств на основе понимания физики фликкер-шума и управляемой флуктуации точки смещения [1, 6] будут решены многие нерешаемые ранее проблемы, а некоторые задачи существенно упростятся.

Понимание физики фликкер-шума и управляемого сигналами дрейфа рабочей точки электронных устройств помогает решить некоторые проблемные задачи проектирования, построения и регулирования радиоэлектронных устройств. При необходимости появляется возможность избавиться от фликкер-шума, что будет показано далее.

2. Управление фликкер-шумом

Для исследования возможности избавления от фликкер-шума используем усилитель “100W” с некоторыми изменениями номиналов его элементов. Получим (см. рис. 9) семейство графиков выходного шума усилителя “100W” для условий применения разных номиналов ёмкости конденсатора $C7$.

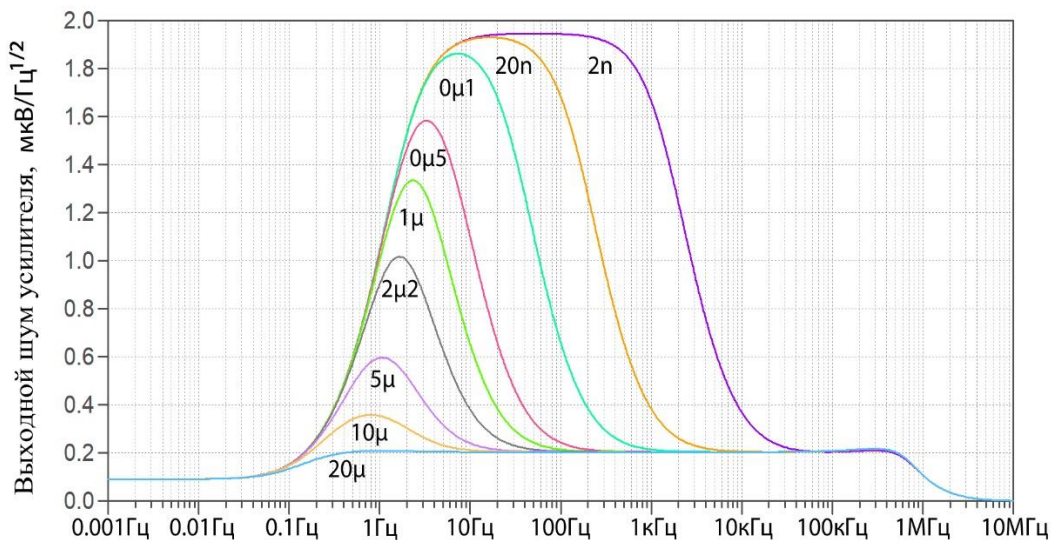


Рис. 9. Графики выходного шума усилителя “100W” для разных значений $C7$.

Увеличим ёмкость $C5$ в десять раз до 1000 мкФ и снова проведём анализ фликкер-шумов для разных номиналов ёмкости конденсатора $C7$, что отражается на графике рис.10. Левая граница семейства графиков фликкер-шумов сдвинулась в область нижних частот на один порядок. Если раньше на рис. 9 фликкер-шумы полностью нивелировались при номинале ёмкости $C7$ в

20мкФ, то теперь даже номинал ёмкости $C7$ в 160мкФ не уменьшает фликкер-шумы полностью.

Левый фронт частотного ограничения семейства характеристик фликкер-шумов формирует интегральная цепь $R12, C5$. Она просто давит нижние частоты, в том числе и фликкер-шум, если он попадает в зону подавления. Правый фронт частотного ограничения семейства характеристик фликкер-шумов формирует интегральная цепь $R22, C7$. Когда, постоянные времени этих интегральных цепей приближаются друг к другу, образуется колоколообразная форма фликкер-шума, когда они перекрываются, фликкер-шум нивелируется. Например, для ликвидации фликкер-шума в усилителе “100W” достаточно увеличить номинал ёмкости $C7$ до 21мкФ, или, не меняя ёмкость $C7$, уменьшить номинал ёмкости $C5$ до 10,5мкФ. В одном и другом случае получаем график, где фликкер-шум полностью нивелирован.

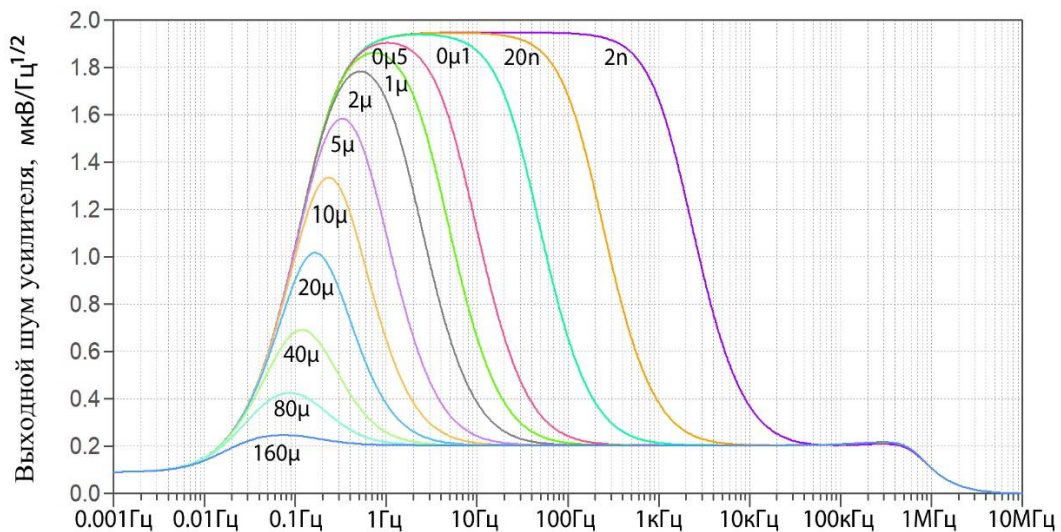


Рис.10. График эквивалентного входного шума усилителя “100W” для разных значений $C7$ и $C5=1000\text{мкФ}$.

На рис.11 приводится семейство графиков шумов усилителя “100W” при $C7=21\text{мкФ}$ и разных значениях коэффициента усиления, для чего меняется номинал $R11$. Здесь хорошо демонстрируется работа режекторного фильтра низких частот в области фликкер-шума. В этой области коэффициент усиления всегда остаётся близким к единице при разных значениях общего K_y .

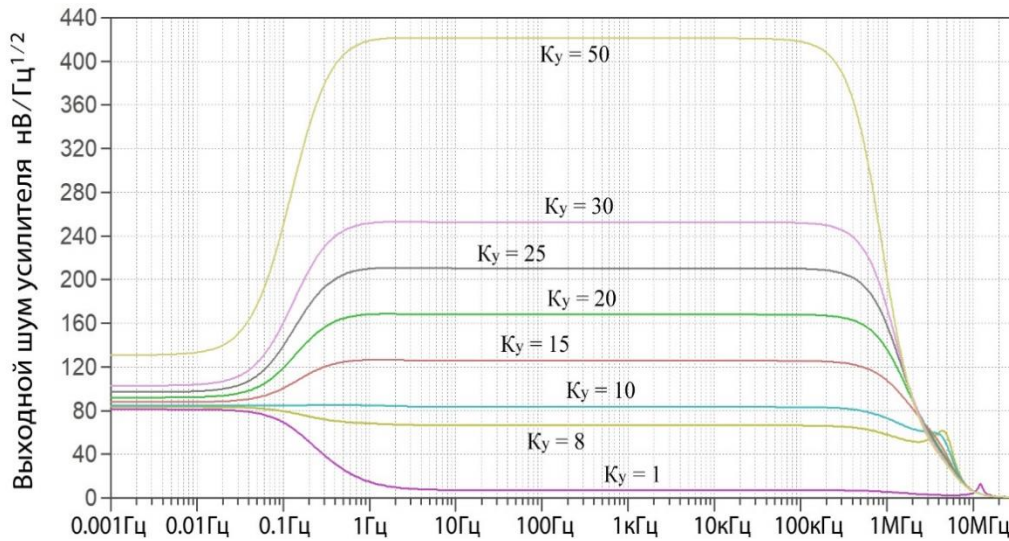


Рис. 11. Графики шума усилителя “100W” для разных K_y от 1 до 50.

Этот метод позволяет в усилителе полностью нивелировать фликкер-шумы для коэффициентов общего усиления, больших или равных соотношению приведённых ко входу тепловых и дробовых шумов к уровню приведённого ко входу фликкер-шума.

Назовем это первым методом нивелирования фликкер-шума.

Второй метод, самый радикальный, - необходимо избавиться от разделительной ёмкости, сделать усилитель гальваническим, как это сделано в усилителе “100WG” (рис.12). В таком усилителе фликкер-шумы полностью отсутствуют при любой допустимой температуре и любом допустимом коэффициенте усиления (рис. 13). Здесь нет элемента для накопления нулевой составляющей, сформированной на нелинейностях тепловыми и дробовыми шумами, соответственно нет шумового дрейфа рабочей точки или иначе фликкер-шума.

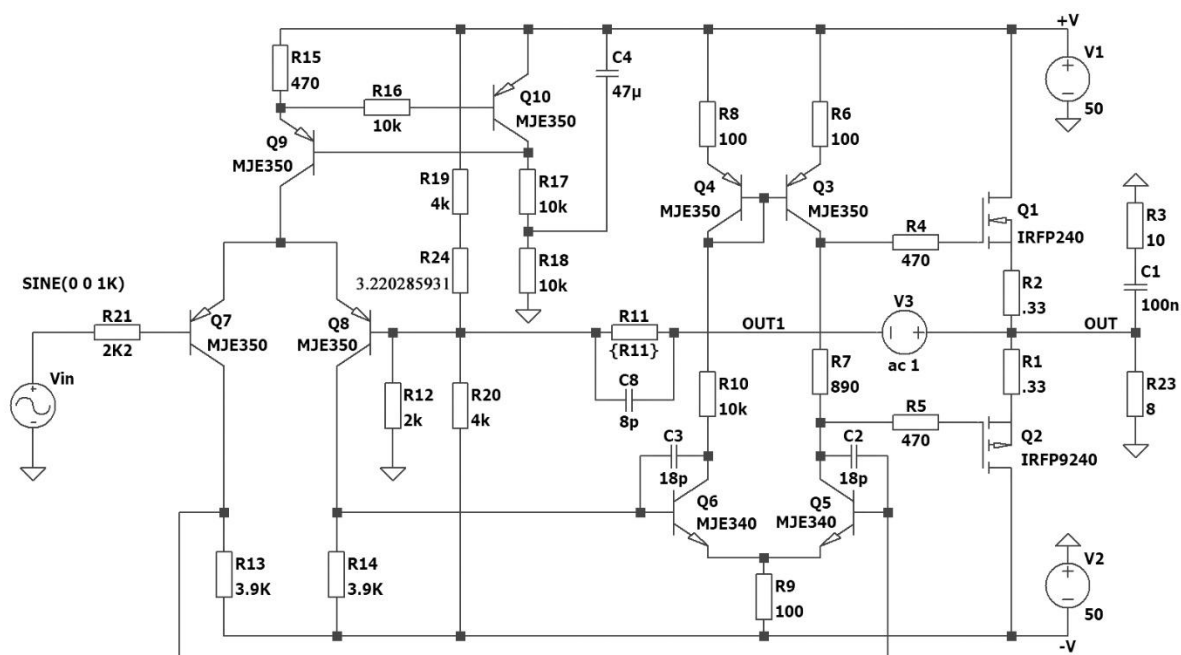


Рис. 12. Гальванический усилитель “100WG”.

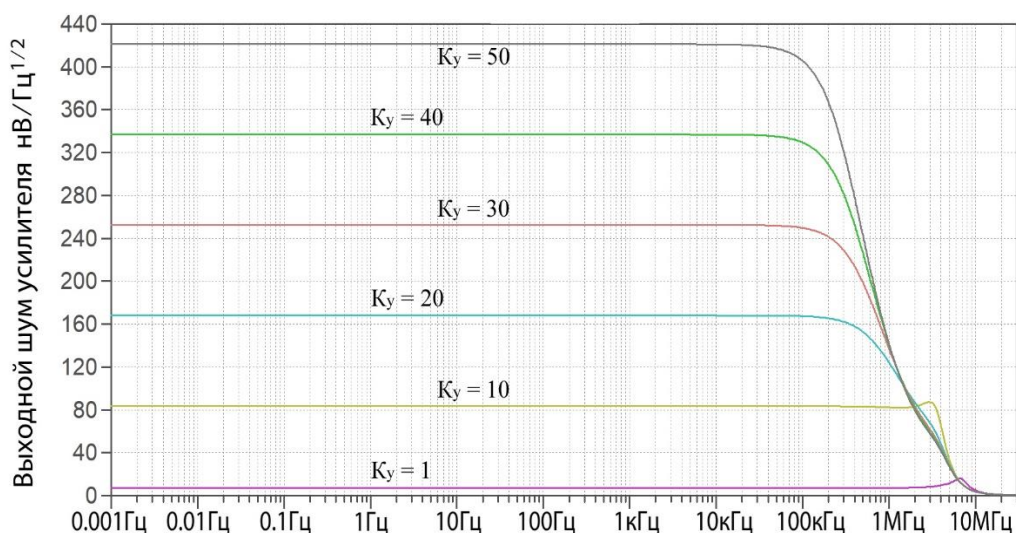


Рис. 13. Графики шума усилителя “100WG” для разных K_y от 1 до 50.

Третий метод, - вместо разделительной ёмкости $C7$ в усилителе “100WL” используется разделительный трансформатор, как это показано на рис.14. В этом случае, в цепях формирования напряжения смещения, так же как в предыдущем случае, нет элемента накопления нулевой составляющей и нет необходимых условий [1] для формирования фликкер-шума, что подтверждается графиками рис.15.

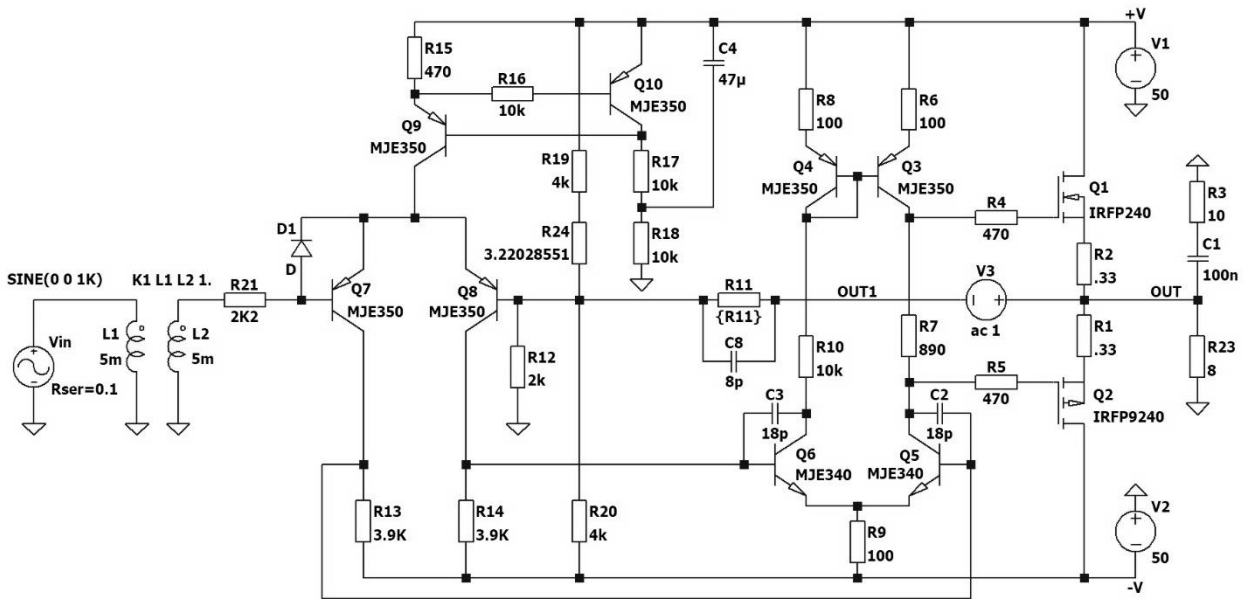


Рис. 14. Трансформаторный усилитель “100WL”.

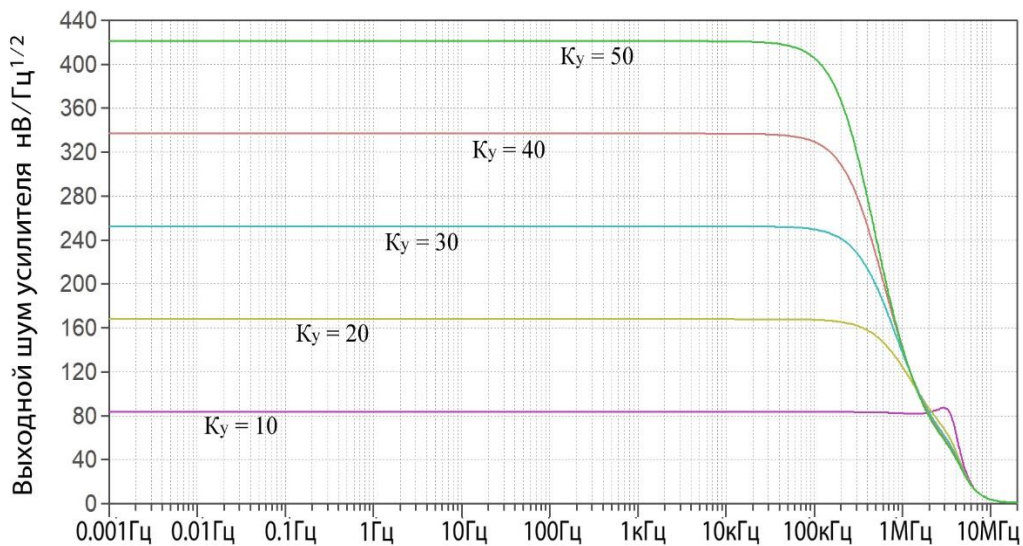


Рис. 15. Графики шума усилителя “100WL” для разных K_y .

Можно предложить ещё и четвёртый вариант избавления от фликкер-шума, причём с сохранением разделительной ёмкости $C7$, как это показано на рис.16 для электрической схемы усилителя “100WQ”. Здесь индуктивность $L1$ блокирует наведённую на разделительном конденсаторе $C7$ постоянную составляющую от тепловых и дробовых шумов транзистора $Q7$. Нулевая составляющая от теплового и дробового шумов заряжает обкладки

конденсатора $C7$, но не приводит к дрейфу рабочей точки транзистора $Q7$, а блокируется дросселем. В результате фликкер-шум не образуется.

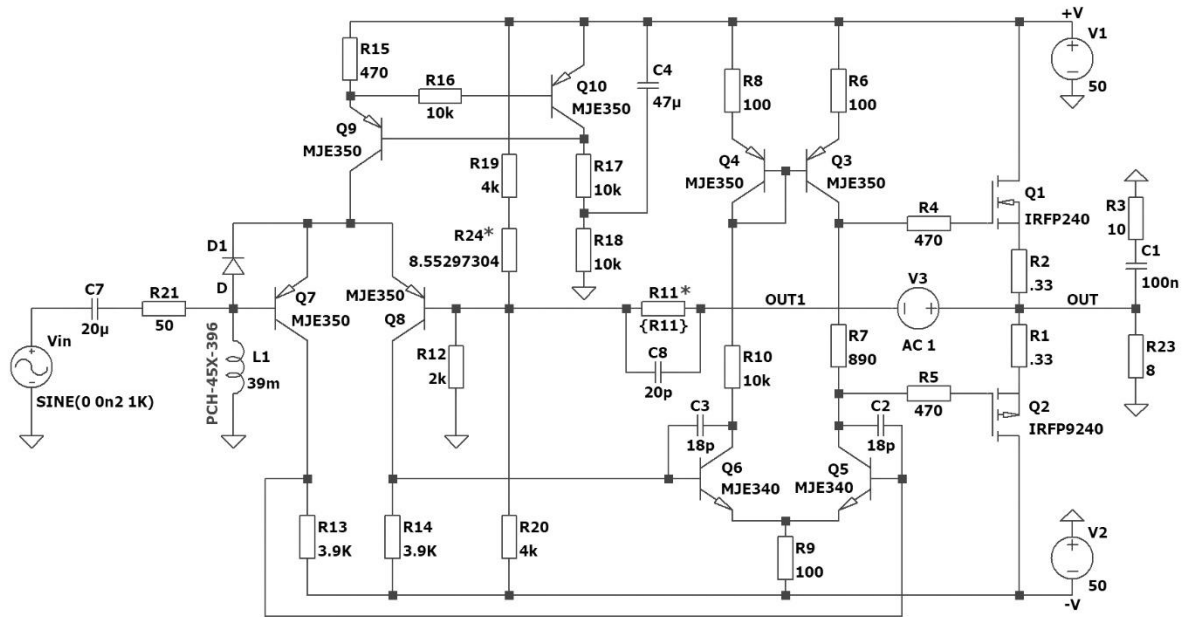


Рис. 16. Электрическая схема усилителя “100WQ”.

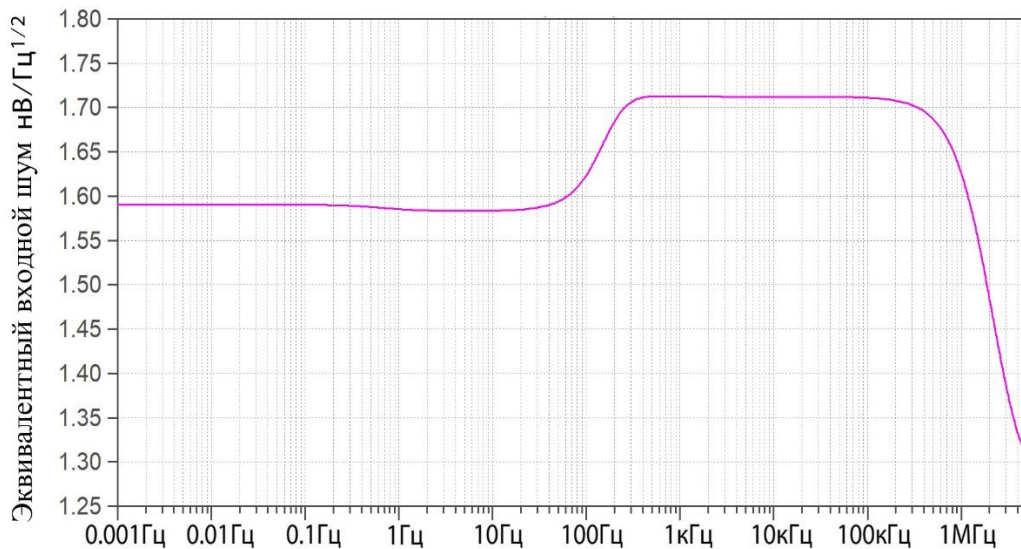


Рис. 17. График эквивалентного входного шума усилителя “100WQ”.

На рис.17 приводится график приведённого ко входу эквивалентного входного шума усилителя “100WQ”. Примечательно то, что эквивалентные входные тепловые и дробовые шумы этого усилителя в четыре раза ниже, чем в предыдущих ($7,1 \div 8,2 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$) электрических схемах. Хорошо видно шунтирующее воздействие дросселя на фликкер-шумы. На рис.18 приводится

семейство графиков выходного шума усилителя “100WQ” для коэффициентов усиления K_y в диапазоне от 1 до 50. Во всей частотной полосе, при коэффициентах усиления больших единицы, уровень выходного шума меньше в два раза, чем в предыдущих усилителях. Фликкер-шумы полностью отсутствуют.

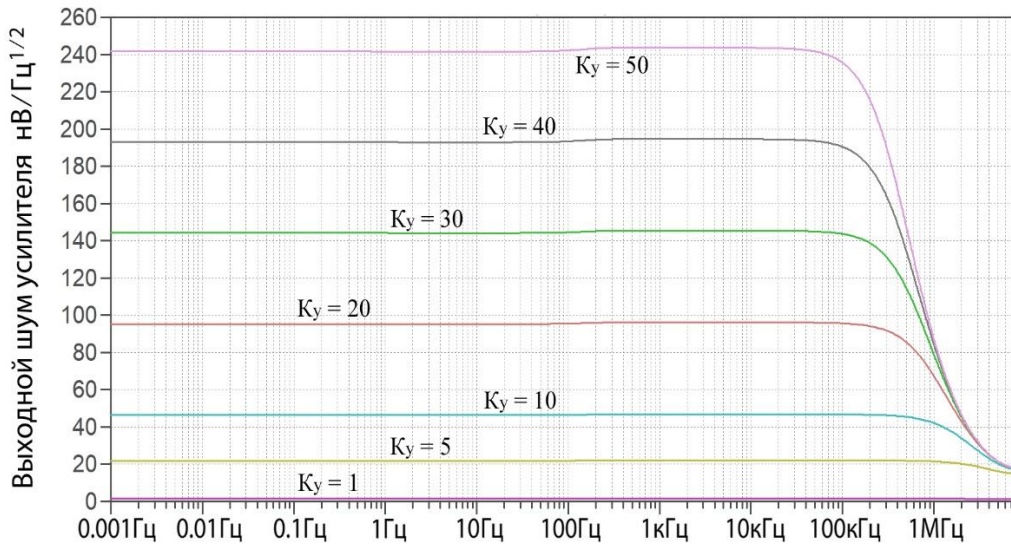


Рис. 18. Графики шума усилителя “100WQ” для разных K_y .

Выводы

Показанные четыре метода воздействия на фликкер-шум основываются на применении понимания его физики [1]. Несомненно, можно разработать и представить дополнительные технические методы и приёмы воздействия на уровень фликкер-шумов, как для целей исключения его проявления, так и для целей его увеличения и применения в специальных устройствах. Видятся значительные возможности применения полученных знаний в области изучения и строительства [6] заданной устойчивости и иных параметров различных электронных систем усиления, модуляции и иной обработки сигналов.

В статье показано многообразие формы фликкер-шума в энергетическом и частотном измерении. Освещены некоторые области радиоэлектроники, подверженные воздействию или использующие свойства фликкер-шумов. Показано, что проявление фликкер-шумов не ограничивается сверхнизким

частотным диапазоном, а может распространяться на средние и высокие частоты. Показано, что Фликкер-шумы имеют предельный уровень нарастания [1] в соответствии с энергией и частотной полосой формирующих его тепловых и дробовых шумов. Показано, что для электронных усилителей напряжения и мощности фликкер-шум нельзя аппроксимировать упрощённым соотношением $1/f$.

Приводятся методы ликвидации или нивелирования фликкер-шума.

Литература

1. Мацаев А.С. Физика фликкер-шума и модификация модели транзистора. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №7. <https://doi.org/10.30898/16841719.2020.7.15>
2. Библиотека LTspiceXVII [электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/ru/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
3. Лепеха Ю.П. Генератор шумовых сигналов. Патент RU2519565C2 от 10.06.2014г.
4. Иванов В.П. Устройство радиомаскировки ПЭМИН на основе сверхширокополосных генераторов шума. // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск “Информационная безопасность”. Раздел II. Комплексная защита объектов информатизации. 2007. №1(76).
5. Кадеев А.М., Фадеев Н.М. Генератор шумовых сигналов. Патент RU2097906C1 от 27.11.1997г.
6. Мацаев А.С. Стабилизация характеристик усилителя с положительной обратной связью. // Радиотехника. 1994. №6.

Для цитирования:

Мацаев А.С. Фликкер-шум. Особенности, разнообразие и управление. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.7>