

Измерение коэффициента подавления пульсаций линейными стабилизаторами напряжения

В. К. БИТЮКОВ, А. А. ИВАНОВ, Н. Г. МИХНЕВИЧ, В. А. ПЕТРОВ

Московский технологический университет, Москва,
Россия, e-mail: bitukov@mirea.ru

Исследована возможность измерения частотной зависимости коэффициента подавления пульсаций микросхемами линейных стабилизаторов напряжения с помощью современного осциллографа и генератора без применения специального дорогостоящего оборудования. При различных частотах изучено влияние амплитуды зондирующего синусоидального напряжения на искажение формы выходного сигнала стабилизатора. Рассмотрены вопросы возможного влияния на результаты измерений опций автоматического сканирования, разводки и компоновки платы, а также типов, номиналов и монтажа конденсаторов.

Ключевые слова: коэффициент подавления пульсаций, линейный стабилизатор напряжения, микросхема, частотная зависимость.

Possibility of measuring of frequency dependence of power supply rejection ratio of linear voltage regulators by using just reasonably priced conventional oscilloscope and external function generator without application of expensive special equipment is investigated. Effect of the value of probing voltage at different frequencies on distortion of the form of output signal is studied. The effects of using the automatic scanning options, the layout and assembling of the printed board and the values and types of capacitors are also considered.

Key words: power supply rejection ratio (PSRR), linear voltage regulator, integrated circuit, frequency dependence.

Микросхемы линейных стабилизаторов напряжения (ЛСН), как правило, ослабляют пульсации напряжения различных источников питания. В случае питания от сети на вход ЛСН попадают пульсации выпрямленного напряжения сети. Большое значение могут иметь электромагнитные наводки на входную цепь, которые оказывают влияние даже при питании ЛСН от аккумуляторной батареи. Линейные стабилизаторы также используются для подавления пульсаций импульсных источников питания, выполняя функцию активного сглаживающего фильтра. Для количественной характеристики уменьшения пульсаций напряжения введен специальный параметр k_f , который зависит от частоты f и рассчитывается по формуле [1, 2]:

$$k_f = 20 \lg(U_{\text{вх}} / U_{\text{вых}}), \quad (1)$$

где $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вых}}$ — амплитуды пульсаций напряжения синусоидальной формы с частотой f на выходе и входе линейного стабилизатора напряжения. При такой записи параметр k_f , измеряемый в децибелах, является отрицательным. Наряду с (1) параметр k_f также определяют как

$$k_f = 20 \lg(U_{\text{вх}} / U_{\text{вых}}). \quad (2)$$

Соотношение (2) приведено, например, в [3—5] и использовано в настоящей статье.

Существуют расхождения и в названии параметра k_f . В англоязычной литературе наиболее часто этот параметр называют power supply rejection ratio (PSRR) в связи с тем, что исторически основной вклад в пульсации напряжения на входе ЛСН вносили пульсации выпрямленного сетевого напряжения источника питания. Однако в настоящее время обычная электрическая сеть не всегда является первичным источником питания, существуют и другие источники пульсаций напряжения на входе.

В отечественной литературе параметр k_f также имеет различные определения. В технических характеристиках микросхем ЛСН используют такие термины, как «коэффициент подавления пульсаций» или «коэффициент сглаживания пульсаций». Последнее название закреплено в стандарте [5]. Этот документ действовал с 01.01.1988 по 01.01.1993. Затем ограничение по сроку действия было снято по протоколу Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации, и стандарт актуализирован 15.10.2015. В настоящей работе будем использовать термин «коэффициент подавления пульсаций», определяемый формулой (2) и измеряемый в децибелах.

Очень часто описания технических характеристик микросхем ЛСН либо не содержат данных по k_f , либо данные указаны при частоте 100 или 120 Гц без уточнения условий измерений, либо просто ошибочные. Например, в таблице электрических характеристик микросхемы регулируемого ЛСН LM317L, широко применяемой и выпускаемой различными производителями, для k_f приведены данные только для одного режима, в котором входное напряжение составляет 15 В, выходное 10 В, ток нагрузки 40 мА и частота 120 Гц [6]. Между тем влияние перечисленных выше режимных параметров, особенно частоты, может быть очень существенным. Для близкой по основным параметрам отечественной микросхемы ЛСН КР142ЕН2 приведена частотная зависимость k_f , однако входное и выходное напряжения и ток нагрузки, при которых она получена, не описаны [7]. Если предположить, что на k_f оказывают большое влияние характеристики конденсаторов, обычно подключаемых как к делителю выходного напряжения в цепи обратной связи, так и параллельно нагрузке, то следует, что разработчики источников вторичного электропитания должны самостоятельно исследовать частотные характеристики предполагаемых к использованию микросхем. При этом исследования нужно про-

водить в условиях и при схемных решениях, соответствующих условиям работы стабилизаторов.

Методы измерений коэффициента подавления пульсаций. Все существующие методы измерений коэффициента подавления пульсаций k_f сложны и требуют значительных временных затрат, поскольку из-за большого значения k_f приходится измерять выходное синусоидальное напряжение порядка 1 мВ и менее. В связи с этим результаты зависят от условий измерений, компоновки измерительного оборудования, используемых электронных компонентов схемы подключения объекта исследования, разводки печатной платы, электрических и механических воздействий окружающей среды.

Для измерений k_f необходимо во входную цепь питания постоянным напряжением микросхемы ЛСН инжектировать переменное синусоидальное напряжение определённой частоты и измерить отношение амплитуд напряжения этой частоты на входе и выходе микросхемы. При проведении таких измерений приходится иметь дело с большим набором дискретных частот во всём исследуемом диапазоне (от единиц герц до нескольких мегагерц).

В настоящее время наиболее распространённым методом таких измерений является использование анализатора цепей совместно с источником питания постоянного напряжения. Анализатор цепей является селективно чувствительным прибором, что позволяет измерять сигналы порядка десятка микровольт на выходе ЛСН. Однако метод работает лишь в случае, когда к выходу ЛСН не подключена нагрузка либо ток нагрузки очень мал. Поэтому в документации на микросхемы, как правило, приведены данные по k_f , полученные при отключенной нагрузке. Однако k_f очень часто уменьшается с увеличением тока нагрузки. Чтобы обеспечить измерения k_f при большой силе тока нагрузки, применяют дополнительные устройства, называемые инжекторами, с выхода которых ЛСН получает необходимое постоянное напряжение, модулированное синусоидальным напряжением от анализатора цепей. Примером таких устройств является инжектор Picotest J2120A [8, 9]. К инжектору подводится постоянное напряжение для питания ЛСН, а анализатор цепей подаёт зондирующее синусоидальное напряжение, которое он же измеряет на входе и выходе микросхемы ЛСН и рассчитывает k_f . Сканирование в необходимом частотном диапазоне осуществляется автоматически с заданными амплитудой входного синусоидального напряжения и шагом по частоте. Кроме анализатора цепей и инжектора для питания микросхемы требуется источник постоянного напряжения с шумом на выходе, много меньшим зондирующего напряжения.

Наиболее сложным вопросом является создание инжектора. Существующие инжекторы основаны на различных принципах суммирования. В некоторых из них для суммирования применяют инжекционный трансформатор. Такой трансформатор является очень чувствительным устройством, но имеет ограниченную ширину полосы пропускания и насыщается или разрушается при низких значениях постоянного тока. Другой тип устройств основан на использовании суммирующего операционного усилителя [3, 9, 10]. Важным достоинством данного типа инжекторов является их возможность при применении прецизионных аудиоусилителей проводить высокоточные измерения в низкочастотной области вплоть до нескольких герц. Однако такие усилители имеют ограничения по постоянному току и напряжению питания ЛСН.

Современные осциллографы, например InfiniiVision X-Series компании Keysight Technologies [11], можно использовать для автоматических измерений частотной зависимости k_f . Они имеют встроенный модуль генератора сигналов произвольной формы, являющийся источником синусоидального напряжения, которое суммируется с напряжением питания микросхем ЛСН с помощью инжектора Picotest J2120A. Для проведения измерений требуется лицензионное программное обеспечение Power Measurement Option. Перед началом измерений устанавливаются начало и конец сканируемого частотного диапазона и амплитуда синусоидального зондирующего напряжения. Максимальный частотный диапазон 100 Гц — 20 МГц. Максимально измеряемое значение $k_f = 70$ дБ. Алгоритм программы измерений не описан. Главное достоинство такой методики заключается в малых затратах времени на сканирование и получении результатов в виде графика зависимости k_f от частоты. Недостатками описанного метода следует признать постоянство амплитуды входного синусоидального напряжения при измерениях на различных частотах, необходимость использования специального инжектора и невозможность оценить погрешности полученных результатов. Эти недостатки преодолены в методике, предложенной в настоящей работе.

Методика измерений и схема измерительной платы. В связи с тем, что осциллограф является основным измерительным прибором для исследований любой радиотехнической аппаратуры, в том числе источников вторичного электропитания, а чувствительность современных осциллографов позволяет измерять синусоидальные напряжения с размахом менее 1 мВ, целью настоящей работы было создание методики измерений k_f осциллографом. При этом предполагалось использовать в качестве источника зондирующего напряжения внешний стандартный функциональный генератор, а в качестве источника постоянного напряжения — источник питания. Такая аппаратура должна была обеспечивать возможность измерений в любом практически важном частотном диапазоне вплоть до 25 МГц без применения каких-либо дополнительных инжекторов.

В основу метода положено суммирование постоянного (DC) и переменного синусоидального (AC) напряжений с помощью индуктивности и конденсатора.

Для проведения измерений была создана специальная плата, схема которой показана на рис. 1. Для суммирования постоянного U_1 (DC) и переменного U_2 (AC) напряжений использовали дроссель L_1 индуктивностью 15 мГн и конденсатор C_1 ёмкостью 9,4 мкФ. Постоянное напряжение от источника питания и переменное напряжение от генератора суммировались и поступали на вход $U_{вх}$ ЛСН. Входной и выходной конденсаторы C_2 и C_4 ёмкостью 0,1 мкФ предусмотрены схемой включения исследуемого ЛСН, в качестве которого использовалась микросхема LM317L модификации N [12]. Микросхема LM317 часто используется как типовая для отработки техники измерений k_f [13]. Тип конденсаторов и их ёмкость установлены в соответствии с рекомендациями [12]. Выходное напряжение $U_{вых}$ регулировалось переключением переключки S_1 резисторов R_1 , R_2/R_3 , R_4 , подключённых к клемме регулирования ADJ в цепи обратной связи. Три положения переключки позволяли получать на выходе напряжения 5; 10; 15 В. Конденсатор C_3 ёмкостью 10 мкФ, байпасный по отношению к резисторам, регулирующим выходное напряжение, является очень важным компонентом для обеспечения подавления пульсаций и шумов в области высоких частот.

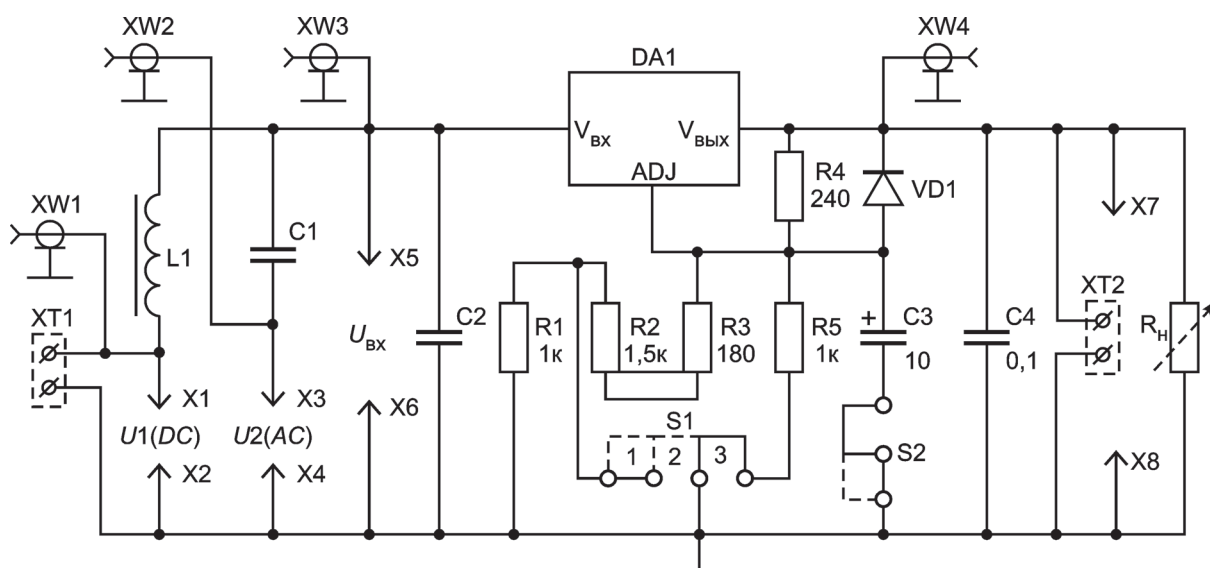


Рис. 1. Схема платы для измерений коэффициента подавления пульсаций на входе ЛСН

Постоянное напряжение поступало в схему измерений от источника питания GPS-3303 компании Good Will, а переменное синусоидальное напряжение — от генератора сигналов произвольной формы AFG3022 компании Tektronix. Измерения производили с помощью осциллографа GDS-72202 компании Good Will. Ток нагрузки регулировали 15 резисторами, включёнными в цепь нагрузки. На схеме это показано условно как переменный резистор R_H . Надо отметить, что конденсатор $C1$ предотвращал закорачивание источника постоянного напряжения $U1(DC)$ через источник $U2(AC)$, а дроссель $L1$ — источника переменного напряжения $U2(AC)$ через источник $U1(DC)$.

Поступающее от источника питания постоянное напряжение подавалось либо через клеммы $XT1$, либо через коаксиальный разъём $XW1$, его значение контролировалось мультиметром Agilent 34405A, который был подключен к

штырьковым выводам $X1, X2$. Этот же мультиметр контролировал постоянное напряжение на выходе либо при подключении к клеммам $XT2$, либо к штырькам $X7, X8$. Синусоидальное напряжение от генератора AFG3022 поступало в схему через коаксиальный разъём $XW2$.

При исследовании k_f большое значение имеет подключение осциллографа к входу и выходу микросхемы. Стандартные пробники 1:1 были подключены к штырьковым контактам на плате. При этом всегда образовывался больший или меньший петлевой контур, на котором могли появляться наводки от внешних электромагнитных полей. Особенно вредны такие наводки на выходе. Поэтому места подключения $X5, X6$ и $X7, X8$ сигнального и «земляного» зажимов пробников располагались как можно ближе. Кроме того, была обеспечена возможность подключения измерительных кабелей осциллографа через коаксиальные разъемы $XW3, XW4$.

Выбор напряжения генератора. Увеличить малую амплитуду синусоидального сигнала на выходе стабилизатора при измерении k_f можно, увеличив амплитуду напряжения на входе, так как генератор AFG3022 может выдавать синусоиду с амплитудой 10 В. Однако использование данного значения приводит к перегрузке усилителя рассогласования микросхемы и искажению формы сигнала на выходе.

На рис. 2 показана зависимость формы переменного напряжения $U_{ВЫХ}$ на выходе ЛСН от времени t при разных амплитудах напряжения U_r генератора (кривые 2—4) для режима, реализованного при следующих параметрах: постоянное напряжение на входе стабилизатора 15 В, постоянное напряжение на выходе 10 В, сила тока нагрузки 100 мА, частота напряжения генератора 140 кГц, конденсатор $C3$ — выключен. Напряжение на входе (кривая 1) — идеальная синусоида. Небольшое отклонение $U_{ВЫХ}$ от синусоиды наблюдается уже при $U_r = 3$ В (кривая 3), при U_r , равном 5 и 6 В, формы $U_{ВЫХ}$ сильно искажаются. Использование (2) предполагает, что форма $U_{ВЫХ}$, как и форма сигнала на входе, является синусоидальной. Поэтому для каждой частоты входного сигнала следует устанавливать такую амплитуду напряжения генератора, при которой дисторсии выходного сигнала не наблюдается. В настоящей работе при описанных выше параметрах в диапазоне частот 20—100 Гц измерения про-

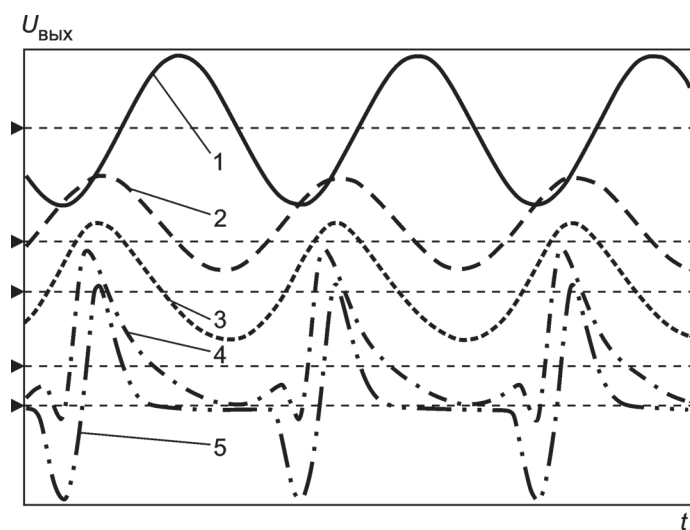


Рис. 2. Зависимость формы сигнала $U_{ВЫХ}$ на выходе ЛСН от времени t при различных амплитудах U_r напряжения генератора: 1 — форма сигнала на входе стабилизатора; 2, 3, 4, 5 — $U_r = 0,5; 3,0; 5,0; 6,0$ В, соответственно; ► — нулевые уровни соответствующих сигналов

водили при амплитуде $U_r = 5$ В, при 200 Гц — $U_r = 3$ В, при 300 Гц — $U_r = 2$ В, при частотах 400—500 Гц $U_r = 1$ В, а 600—700 Гц $U_r = 0,5$ В. В последнем случае $U_{\text{вых}}$ было немного больше 1 мВ и при измерениях осциллографом использовалось осреднение с числом измерений, равным 256. В диапазоне 800 Гц — 100 кГц амплитуда напряжения на генераторе устанавливалась равной 1 В, при этом амплитуда сигнала на выходе стабилизатора с увеличением частоты увеличивалась, сначала медленно, а потом быстрее, и при 100 кГц уже достигала 32 мВ. В диапазоне 700 кГц — 25 МГц можно было устанавливать на генераторе амплитуду, равную 10 В. Таким образом, для рассматриваемого режима работы стабилизатора наиболее сложной при измерениях оказалась область частот 600—700 Гц. В режимах, отличающихся силой тока нагрузки, ёмкостью конденсаторов на выходе и в цепи обратной связи, входным и выходным напряжением, искажения формы пульсаций $U_{\text{вых}}$ могут наблюдаться при других U_r . Это необходимо отслеживать при проведении экспериментов.

Влияние ёмкости конденсаторов С3, С4 и силы тока нагрузки на частотную зависимость коэффициента подавления пульсаций. В технических характеристиках производителя микросхемы LM317L-N [12] для k_f приведены лишь две частотные зависимости в интервале от 10 Гц до 1 МГц при входном напряжении 15 В, выходном 10 В, силе тока нагрузки 40 мА, при наличии в цепи регулирования байпасного конденсатора ёмкостью 10 мкФ и без него. Данный конденсатор может быть установлен для достижения высоких значений k_f . Также отмечено, что дополнительно можно установить конденсатор на выходе для улучшения переходных характеристик, но его влияние на k_f не описано.

На рис. 3 представлены результаты, полученные в настоящей работе. В случае отсутствия обоих конденсаторов С3, С4 (кривые 2, 4) зависимости k_f от частоты вплоть до 2,5 МГц являются монотонными, как при нагрузке, так и при её отсутствии. В этом частотном диапазоне k_f меньше при подключении нагрузки 100 мА. Немонотонности наблюдаются лишь при более высоких частотах. При подключении конденсатора С4 в области высоких частот появляются три максимума. Их появление, во всяком случае двух наибольших из них, можно связать с влиянием конденсатора С4, поскольку они имеют место как при конденсаторе С3, так и при его отсутствии. Конденсатор С4 играет очень важную роль в обеспечении достаточно больших значений k_f при высоких частотах, поскольку при увеличении частоты импеданс выходного конденсатора уменьшается. Конденсатор С3 оказывает влияние на коэффициент k_f , существенно увеличивая его при частотах менее 500 кГц (см. рис. 3, кривые 1, 3). Кривые 1, 3 получены при токе нагрузки 100 мА, но в первом случае конденсатор С3 включен, а во втором — выключен. Максимум около 22 МГц, возможно, связан с паразитной ёмкостью платы и пробника, поскольку на кривых 2, 4, относящихся к режимам с отключенным С4, при частотах больше 20 МГц тоже начинается увеличение k_f . Влияние нагрузки можно обнаружить, сопоставив кривые 2, 4. Оба случая относятся к вариантам схемы, в которых отсутствуют конденсаторы С3, С4, т. е. они характеризуют микросхему ЛСН. При подключенной нагрузке во всей области частот подавление пульсаций меньше.

Анализ полученных результатов. Подавление пульсаций микросхемой LM317 изучено больше, чем другими мик-

росхемами, однако для её модификации LM317L-N, исследованной в настоящей работе, имеются лишь данные [12]. На рис. 4 показано сравнение данных, полученных в настоящей работе, с данными [12], а также с результатами для более ранней модификации микросхемы LM317. В [12, 13, 15, 16] графики зависимости k_f от частоты представлены в виде малоразмерных рисунков, и показанные на рис. 4 точки являются результатом оцифровки кривых, имеющихся в оригиналах. Все данные относятся к подавлению пульсаций микросхемой, т. е. на выходе и в схеме обратной связи конденсаторы отсутствуют. Максимум около 137 кГц не коррелирует с остальными данными и, возможно, является следствием ошибки эксперимента [12]. Данные [14] для более ранней модификации LM317 такого максимума не содержат.

Качественно характер изменения k_f удовлетворительно согласуется с частотой, хотя результаты получены в разных лабораториях, в разное время, с помощью различной техники и на микросхемах различных партий. Наибольшие расхождения наблюдаются при частотах менее 10 кГц. Погрешности измерений нигде не приведены. В [12] приведён возможный разброс значений k_f для микросхемы LM317L-N с конденсатором С3 ёмкостью 10 мкФ при частоте 120 Гц. Согласно этим данным типичное значение составляет 80 дБ, минимальное 66 дБ.

Количественное расхождение данных в области частот меньше 10 кГц весьма значительно. Это свидетельствует о том, что требуется метрологическая проверка методик измерений на аттестованных установках наивысшей точности с использованием стандартизованных образцов микросхем.

Оценка инструментальной погрешности измерений является очень сложной задачей, так как погрешность зависит не только от частоты, но и от схемы измерительной платы, расположения отдельных элементов и подключения

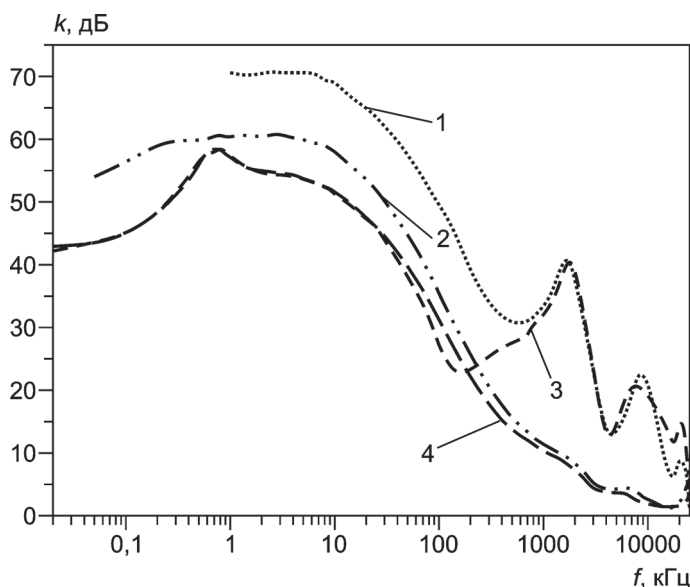


Рис. 3. Коэффициент подавления пульсаций при различных подключениях конденсаторов и нагрузки:

1 — с конденсаторами С3, С4 при токе нагрузки 100 мА; 2 — без конденсаторов С3, С4 и без нагрузки; 3 — без конденсатора С3, при наличии С4 и токе нагрузки 100 мА; 4 — без конденсаторов С3, С4 с током нагрузки 100 мА

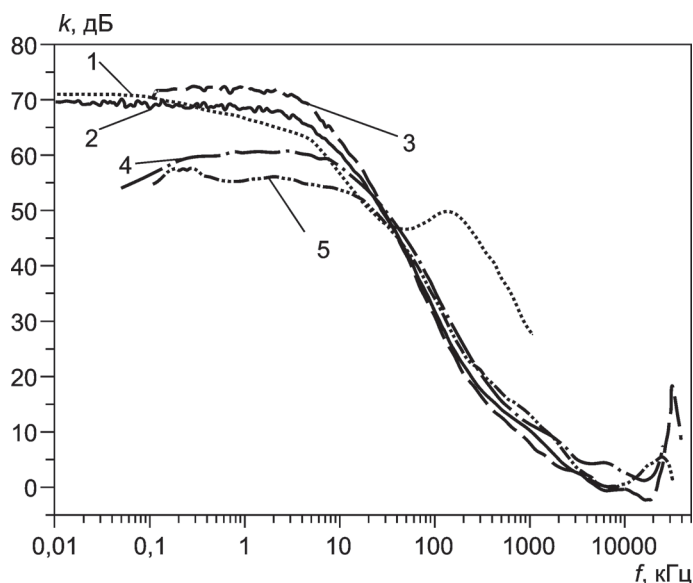


Рис. 4. Коэффициент подавления пульсаций микросхемой LM317 по данным различных работ: 1, 2, 3 — [12], [15], [16], соответственно; 4 — результаты настоящей работы; 5 — [13]

пробников, амплитуды синусоидального напряжения на входе в ЛСН. В настоящей работе оценена только случайная погрешность, обусловленная измерением осциллографом сигналов на входе и выходе ЛСН. Оценки были сделаны для схемы без нагрузки с подключенным конденсатором СЗ, что привело к наиболее низким уровням сигнала на выходе ЛСН. В диапазоне от 20 Гц до 1,2 МГц, когда при некоторых частотах амплитуда выходного напряжения лишь немного превышала 1 мВ, при 256 осреднениях измеряемых сигналов, случайная погрешность измерений k_f не превышала 0,5 %. При дальнейшем увеличении частоты и уменьшении k_f погрешность увеличивалась и при 16 МГц составляла 1,1 %.

Выводы. В большинстве случаев для измерений k_f достаточно имеющихся у разработчиков средств измерений — современного осциллографа и генератора. Хотя осциллограф в данном случае не обеспечивает такой точности, как низкочастотный анализатор цепей, при уровне k_f ниже 70 дБ точность получаемых результатов является достаточной при отсутствии дополнительных затрат на измерительное оборудование.

Опции автоматического сканирования, имеющиеся в некоторых осциллографах, не могут обеспечить необходимой точности из-за использования зондирующего напряжения постоянной амплитуды. Напряжение при различных частотах необходимо выбирать, имея в виду получение возможно большей амплитуды сигнала на выходе без искажения его

формы вследствие дисторсии. Разводка и компоновка платы, а также типы, номиналы и монтаж конденсаторов, применяемых при измерениях k , должны быть близки к параметрам, рекомендованным производителями микросхем.

Литература

1. Lee B. S. Understanding the Terms and Definitions of LDO Voltage Regulators // Texas Instruments Application Report SLVA079.1999. P. 1—13.
2. Improved Power-Supply Rejection for Linear Regulators // Maxim Integrated, Application Note. 2002. N. 883. P. 1—7.
3. Pithadia S., Lester S. LDO PSRR Measurement Simplified // Texas Instruments Application Report SLAA414. 2009. P. 1—5.
4. Pithadia S. LDO Noise Demystified // Texas Instruments Application Report SLAA412. 2009. P. 1—5.
5. ГОСТ 26949—86. Микросхемы интегральные. Методы измерения электрических параметров непрерывных стабилизаторов напряжения.
6. LM317L3-Terminal Adjustable Regulator // Texas Instruments SLCS144E-July 2004 — Revised October 2014. P. 1—14.
7. Новаченко И. В., Петухов В. М., Блудов И. П., Юровский А. В. Микросхемы для бытовой радиоаппаратуры: Справочник. М.: КУБК-а, 1996.
8. J2120 Line Injector [Официальный сайт] www.picotest.com (дата обращения: 08.02.2016)
9. Wong K. Demystifying PSRR Specifications for LDOs // How2Power Today. 2013. October Issue. P. 1—11.
10. PSRR and Measurement of PSSR in Class-D Audio Amplifiers and LDOs // Skyworks Solutions, Application Note, September 24, 2012. P. 1—7.
11. Keysight Technologies Power Supply Rejection Ratio (PSRR) Measurements Using Keysight InfiniiVision X-series Oscilloscopes // Application Note 5992-0594EN, 2015. P. 1—7.
12. LM317L-N 3-Terminal Adjustable Regulator // Texas Instruments SNVS775J-March 2000 — Revised March 2013. P. 1—16.
13. Rice J., Sandler S. Techniques for accurate PSRR measurements // Analog Application Journal. 2013. 4 quarter issue. P. 19—21.
14. LM317 3-Terminal Adjustable Regulator // Texas Instruments SLVS044V-September 1997 — Revised February 2013. P. 1—13.
15. Hammerle F., Sandler S. Power Supply Rejection Ratio Measurement Using the Bode 100 and the Picotest J2120 Line Injector // Bode 100 Application Note. 2011. P. 1—9.
16. Sandler S. How do I pick the best voltage regulator for my circuit? // Power Electronics. 2013. Sep. 3. P. 1—9.

Дата принятия: 15.02.2016.