

Усилитель мощности с микроконтроллерной системой управления

В предыдущих номерах журнала была описана конструкция предварительного усилителя с микроконтроллерной системой управления. В этой статье описывается конструкция усилителя мощности (УМ), который предназначен для совместного использования с указанным предварительным усилителем, хотя он может использоваться и с любым другим предварительным усилителем или даже без него. В последнем случае сигнал с линейного выхода лазерного проигрывателя можно подать на вход УМ через простейший регулятор громкости.

Усилитель мощности является неотъемлемой частью любого звуковоспроизводящего комплекса и в то же время – наиболее простым его компонентом. Действительно, требования к УМ просты: плоская АЧХ в рабочем диапазоне частот, достаточная линейность, широкий динамический диапазон. Современный уровень развития схемотехники позволяет реализовать УМ с очень хорошими параметрами. Однако очень часто значение параметров УМ переоценивают. На практике два любых, правильно спроектированных УМ звучат совершенно одинаково. Если же какой-то УМ имеет специфичное, особенное звучание, это говорит лишь об одном: вносимые таким УМ искажения велики и хорошо заметны на слух. Единственный параметр, по которому отличаются современные УМ, – это выходная мощность. И этот параметр как раз порой недооценивается. Считается, что для домашнего использования достаточна мощность 20–35 Вт, тем более, если доверять рекламе, большинство УМ такому условию удовлетворяют. Если речь идет о средней мощности, то такое утверждение справедливо. Но реальный музыкальный сигнал имеет пики, превышающие средний уровень мощности в 10–20 раз. Поэтому, чтобы при средней мощности 20 Вт получить неискаженное воспроизведение пиков сигнала, необходимо иметь мощность УМ порядка 200 Вт. И еще. Акустические системы имеют сложный характер полного сопротивления. Оно зависит от частоты и на некоторых частотах может быть меньше номинального значения в 3–4 раза. УМ должен иметь возможность работать без искажений на такую низкоомную нагрузку. Например, если номинальное сопротивление акустической системы составляет 4 Ом, то УМ должен нормально работать на нагрузку сопротивлением 1 Ом. Это требует очень больших выходных токов. Тут следует заметить, что приведенное утверждение об одинаковости звучания разных УМ справедливо лишь при небольшой выходной мощности. В то же время большинство распространенных УМ промышленного изготовления не обеспечивают неискаженную передачу пиков сигнала даже при уровне комнатного прослушивания. Дорогие высококачественные УМ зачастую спроектированы

очень неграмотно, их вычурная схемотехника приводит к неудовлетворительной линейности. Таким образом, для высококачественного звуковоспроизведения УМ должен быть достаточно мощным и иметь возможность работать на низкоомную нагрузку. Как уже говорилось ранее, современный уровень развития схемотехники позволяет реализовать УМ с достаточно высокими параметрами для того, чтобы он не являлся доминирующим источником нелинейности во всем диапазоне выходных мощностей. В 1989 г. Николаем Суховым была предложена схема УМ высокой верности [1], который имел достаточные параметры. С тех пор ничего принципиально лучшего создано не было, так как дальнейшее улучшение характеристик никаких преимуществ уже не дает. Последующее усовершенствование УМ может идти лишь по пути увеличения выходной мощности, повышения технологичности конструкции, удешевления, улучшения потребительских качеств. В данной статье основное внимание будет уделено системе управления. Основные принципы построения УМ высокой верности изложены в [2].

Внешний вид передней панели усилителя показан на рис. 1. Усилитель выполнен в корпусе формата Midi, его габаритные размеры 348x180x270 мм, вес – около 20 кг. Встроенный микроконтроллер позволяет управлять усилителем с помощью ИК пульта ДУ (общего с предварительным усилителем). Кроме того, микроконтроллер осуществляет измерение и индикацию выходной мощности, температуры радиаторов, реализует отключение по таймеру и обрабатывает аварийные ситуации. Усилитель имеет отдельный дежурный источник питания, что позволяет ему находиться в режиме

“Standby”, когда основные источники питания выключены. На задней панели усилителя установлены розетки, предназначенные для подключения других компонентов комплекса. Эти розетки имеют независимое отключение, что позволяет с пульта ДУ обесточить весь комплекс.

Кнопка “Power” на передней панели усилителя обеспечивает полное отключение от сети. Фактически эта кнопка отключает от сети только дежурный источник питания. Основные источники питания включаются с помощью реле, обмотки которых питаются от дежурного источника. Поэтому при отключенной кнопке “Power” гарантированно обесточены все схемы усилителя.

При нажатии кнопки “Power” усилитель включается. Процесс включения происходит следующим образом. Сразу включается дежурный источник, о чем свидетельствует светодиод “Duty”. Спустя некоторое время, необходимое для сброса микроконтроллера, включается питание на внешние розетки и зажигается светодиод “Ext”. Затем зажигается светодиод “Main”, и происходит первый этап включения основных источников. Основные трансформаторы включаются через ограничительные резисторы, которые предотвращают начальный бросок тока из-за разряженных конденсаторов фильтра. Конденсаторы постепенно заряжаются, и когда измеренное напряжение питания достигнет установленного порога, ограничительные резисторы исключаются из цепи. При этом зажигается светодиод “Operate”. Если за отведенное время напряжение питания не достигло установленного порога, процесс включения усилителя прерывается и включается индикация аварии. Если включение основных источников прошло успешно, то микроконтроллер проверяет состояние системы защиты. В случае отсутствия аварийных ситуаций, микроконтроллер разрешает включение реле нагрузки и зажигает светодиод “Load”.

Кнопка “Standby” осуществляет управление дежурным режимом. Короткое нажатие кнопки переводит усилитель в дежурный режим или, наоборот, включает усилитель. На практике может понадобиться включить внешние розетки, оставив УМ в дежурном режиме. Это требуется, например, при прослушивании фонограмм на стереотелефоны или при перезаписи без звукового контроля. Внешние розетки

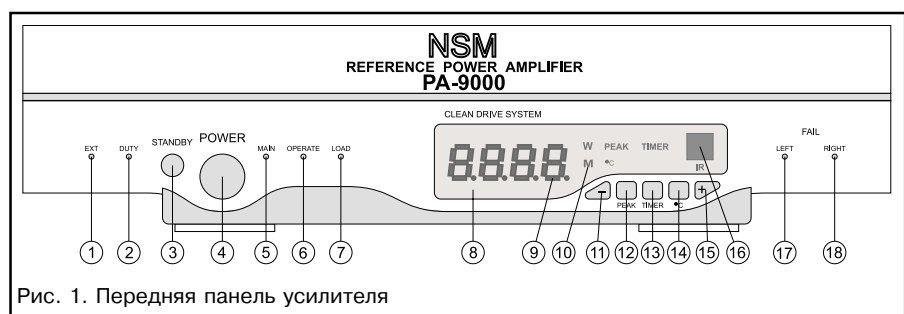


Рис. 1. Передняя панель усилителя

можно независимо включать-выключать длинным (до звукового сигнала) нажатием кнопки "Standby". Вариант, когда УМ включен, а розетки выключены, смысла не имеет, поэтому не реализуется.

На передней панели размещен 4-разрядный дисплей и 5 кнопок управления отображением. Дисплей может работать в следующих режимах (рис. 2а):

- отключен;
- индикация средней выходной мощности;
- индикация квазипиковой выходной мощности;
- индикация состояния таймера;
- индикация температуры радиаторов.

Сразу после включения УМ дисплей отключен. Включить дисплей можно нажатием одной из кнопок: "Peak", "Timer" или "C" – на передней панели.

Кнопка "Peak" включает отображение выходной мощности и переключает режим средняя/квазипиковая мощность. В режиме индикации выходной мощности на дисплее загорается "W", а для квазипиковой мощности – еще и "Peak". Выходная мощность индицируется в ваттах с дискретностью 0,1 Вт. Измерение производится методом перемножения тока и напряжения на нагрузке, поэтому показания действительны для любого допустимого значения сопротивления нагрузки. Удержание кнопки "Peak" до звукового сигнала выключает дисплей.

Кнопка "Timer" выводит на дисплей текущее состояние таймера, при этом загорается буква "M". Таймер позволяет задавать интервал времени, по истечении которого усилитель переходит в дежурный режим и внешние розетки отключаются. Нужно отметить, что при использовании этой функции другие компоненты комплекса должны допускать отключение питания "на ходу". Для тюнера и CD-плеера это всегда допустимо, а вот у некоторых кассетных дек при отключении питания ЛПМ может не переходить в режим "Стоп". Для таких дек отключение питания во время воспроизведения или записи недопустимо. Однако такие деки встречаются крайне редко. Таймер может быть запрограммирован на следующие интервалы (рис. 2б): 5, 15, 30, 45, 60, 90 и 120 минут. Если таймер не используется, его можно перевести в состояние "Off". Задание интервала таймера осуществляется кнопками "+" и "-" в режиме индикации таймера. Если таймер был запущен, то на дисплее всегда горит "Timer" и включение индикации таймера показывает текущее состояние, т.е. сколько минут осталось до выключения. В такой ситуации интервал можно продлить нажатием кнопки "+".

Кнопка "C" включает отображение температуры радиаторов, при этом загорается символ "C". На каждом радиаторе установлен отдельный термометр, но на дисплей выводится максимальное значение температуры. Эти же термометры используются для управления вентилятором и для температурной защиты выходных транзисторов усилителя.

На передней панели расположены два

светодиода для индикации аварии: "Fail Left" и "Fail Right". При срабатывании защиты в одном из каналов УМ загорается соответствующий светодиод, а на дисплее индицируется буквенное наименование сработавшей защиты (рис. 2в). При этом усилитель переходит в дежурный режим. В усилителе реализованы следующие виды защит:

- от перегрузки по току выходного каскада УМ;
- от постоянной составляющей на выходе УМ;
- от аварии источника питания;
- от пропадания сетевого напряжения;
- от перегрева выходных транзисторов.

Защита от перегрузки по току реагирует на превышение током выходного каскада заданного порога. Спасает она не только АС, но и выходные транзисторы, например, при коротком замыкании на выходе усилителя. Эта защита триггерного типа, после ее срабатывания нормальная работа УМ восстанавливается лишь после его повторного включения. Так как от этой защиты требуется высокое быстродействие, она реализована аппаратно. На дисплее индицируется как "IF".

Защита от постоянной составляющей на выходе УМ реагирует на постоянную составляющую выходного напряжения УМ, превышающую примерно 2 В. Она защищает АС, реализована также аппаратно. На дисплее индицируется как "dcF".

Защита от аварии источника питания реагирует на падение напряжения питания любого плеча ниже заданного уровня. Существенное нарушение симметрии питающих напряжений может вызвать появление на выходе УМ постоянной составляющей, что опасно для АС. На дисплее индицируется как "UF".

Защита от пропадания сетевого напряжения реагирует на выпадение нескольких периодов сетевого напряжения подряд. Предназначение этой защиты – отключить нагрузку до того, как напряжение питания упадет и начнется

переходный процесс. Реализована аппаратно, микроконтроллер лишь считывает ее состояние. На дисплее индицируется как "prF".

Защита от перегрева выходных транзисторов реализована программно, она использует информацию с термометров, которые установлены на радиаторах. На дисплее индицируется как "tF".

Пульт ДУ [3] имеет три кнопки, предназначенные для управления УМ. Кнопка "Standby" на пульте полностью дублирует аналогичную кнопку на панели. Кнопка "Display" позволяет переключать режим дисплея по кольцу (рис. 2а). Удержание кнопки "Display" до звукового сигнала выключает дисплей. Кнопка "Mode" позволяет менять временной интервал таймера (рис. 2б), т.е. заменяет кнопки "+" и "-".

За основу описываемого усилителя взята схема УМ высокой верности Николая Сухова [1]. Принципиальная схема основной платы усилителя приведена на рис. 3. По сравнению с оригинальной конструкцией в усилитель были внесены небольшие изменения. Изменена схема стабилизации тока покоя. В оригинальной конструкции вместе с выходными транзисторами на радиаторах был установлен транзистор – датчик температуры, который задавал напряжение смещения выходного каскада. При этом учитывалась температура только выходных транзисторов. Но температура предоконечных транзисторов, ввиду довольно большой рассеиваемой на них мощности, также значительно повышалась во время работы. Да и любой другой элемент УМ может довольно сильно нагреваться во время работы, так как в одном корпусе с компонентами находятся все источники тепла (радиаторы выходных транзисторов, трансформаторы и т.д.). В результате ток покоя мог возрасти в несколько раз при нагреве УМ. Решение этой проблемы было предложено Алексеем Беловым [4]. Обычно для температурной стабилизации тока покоя выходного каскада УМ используют следующую схему (рис. 4а). Напряжение

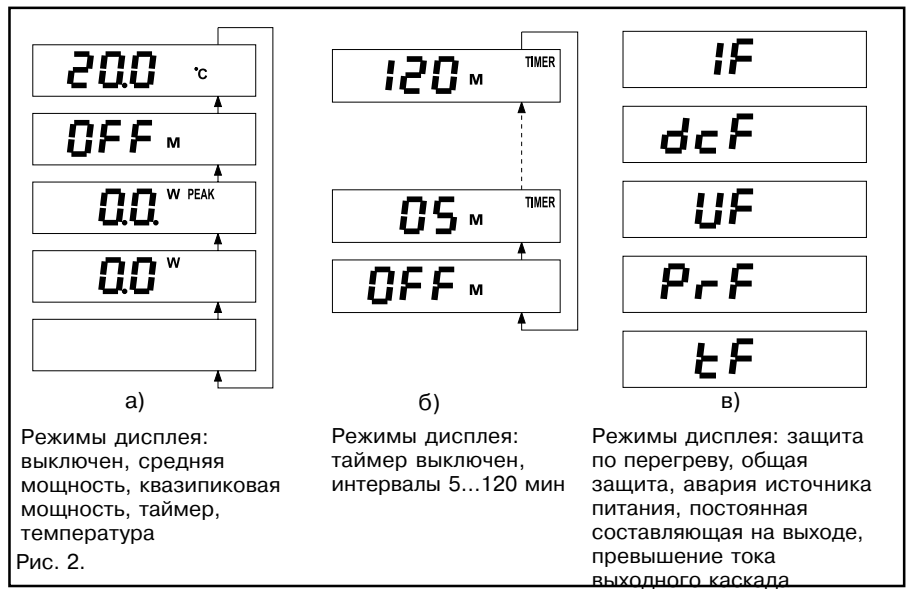


Рис. 2.

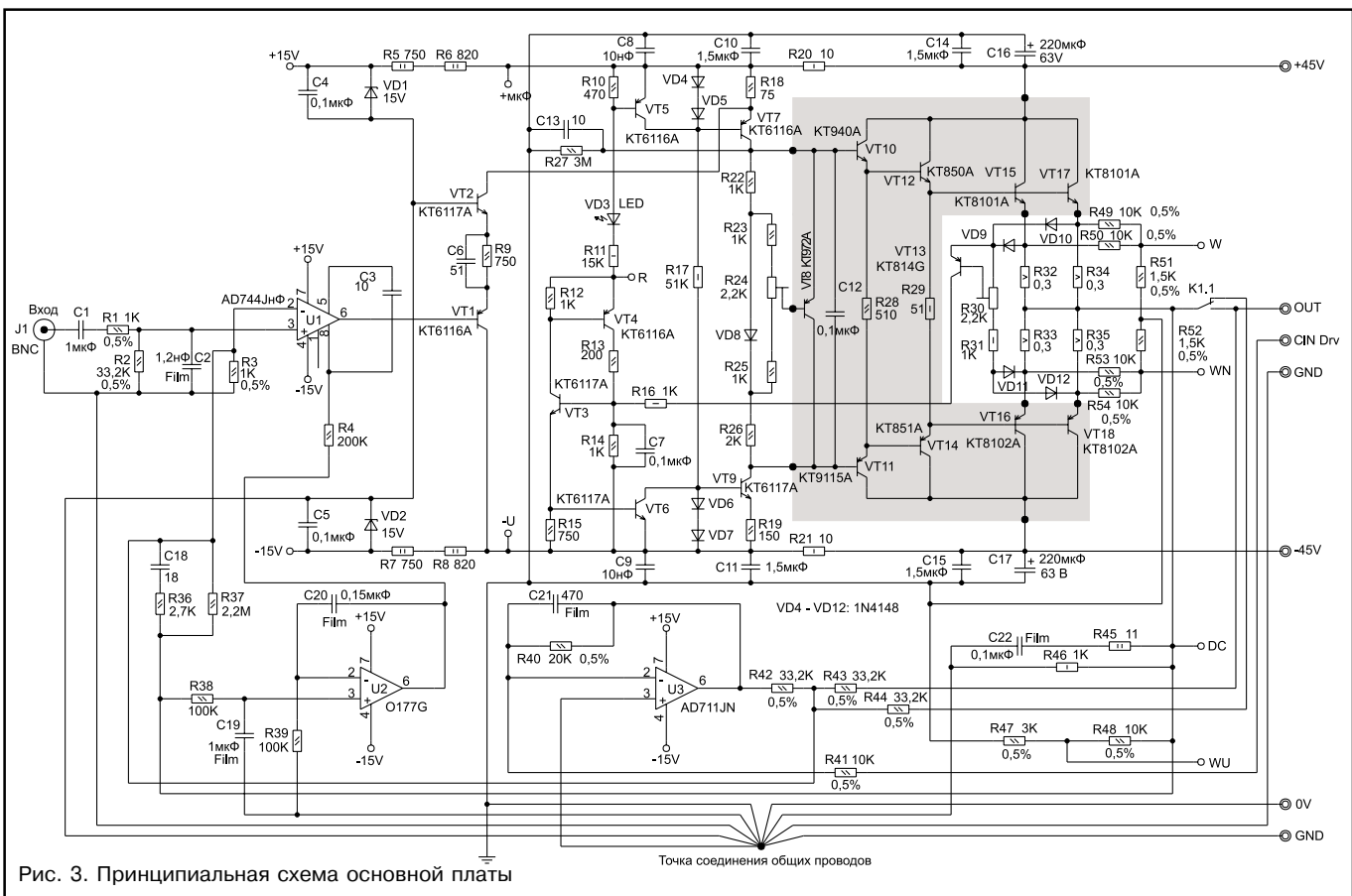


Рис. 3. Принципиальная схема основной платы

смещения прикладывается к точкам А и В. Оно выделяется на двухполюснике, который состоит из транзистора VT1 и резисторов R1, R2. Начальное напряжение смещения устанавливают резистором R2. Транзистор VT1 обычно закрепляют на общем с VT6, VT7 радиаторе. Стабилизация осуществляется следующим образом. При нагревании транзисторов VT6, VT7 уменьшается падение напряжения на переходе база-эмиттер, что при фиксированном напряжении смещения приводит к увеличению тока покоя. Но вместе с этими транзисторами нагревается и VT1, что вызывает уменьшение падения напряжения на двухполюснике, т. е. уменьшение тока покоя. Недостатком такой схемы является то, что температура переходов остальных транзисторов, входящих в составной эмиттерный повторитель, не учитывается. Чтобы ее учесть, температура переходов всех транзисторов должна быть известной. Проще всего сделать ее одинаковой. Для этого достаточно все транзисторы, входящие в составной эмиттерный повторитель, установить на общий радиатор. При этом для получения тока покоя, не зависящего от температуры, напряжение смещения составного эмиттерного повторителя должно иметь температурный коэффициент такой же, как у шести включенных последовательно р-п-переходов. Приближенно можно считать, что прямое падение напряжения на р-п-переходе линейно уменьшается с коэффициентом К, равным приблизительно 2,3 мВ/°С. У составного эмиттерного повторителя этот коэффи-

циент равен 6 К. Обеспечить такой температурный коэффициент напряжения смещения – задача двухполюсника, который включается между точками А и В. Двухполюсник, показанный на рис. 4а, имеет температурный коэффициент, равный $(1 + R2/R1)K$. При регулировке тока покоя резистором R2 меняется и температурный коэффициент, что не совсем правильно. Простейшим практическим решением может служить схема, показанная на рис. 4б. В этой схеме температурный коэффициент равен $(1 + R3/R1)K$, а начальный ток покоя задается положением движка резистора R2. Падение напряжения на резисторе R2, который зашунтирован диодом, можно считать практически постоянным. Поэтому регулировка начального тока покоя не влияет на температурный коэффициент. С такой схемой при нагреве УМЗЧ ток покоя изменяется не более чем на 10–20%. Для того чтобы все транзисторы составного эмиттерного повторителя можно было разместить на общем радиаторе, они должны иметь корпуса, для этого приспособленные (транзисторы в корпусах ТО-92 не подходят). Поэтому в УМ применены другие типы транзисторов, более современные.

Выходные транзисторы заменены на KT8101А, KT8102А, которые имеют более высокую граничную частоту коэффициента передачи тока. У мощных транзисторов довольно ярко выражен эффект падения коэффициента передачи тока при росте тока коллектора. Этот эффект является крайне нежелательным для УМ, так

как ему приходится работать при больших выходных токах. Для уменьшения влияния этого эффекта в выходном каскаде применено параллельное включение двух транзисторов (и это минимум, который можно себе позволить).

Для нормальной работы защиты от перегрузок по току добавлена схема выделения максимального значения напряжения на диодах VD9–VD12 (рис. 3), так как теперь приходится снимать падение не с двух, а с четырех эмиттерных резисторов.

Другие транзисторы составного эмиттерного повторителя – KT850А, KT851А (корпус ТО-220) и KT940А, KT915А (корпус ТО-126). В схеме стабилизации тока покоя использован составной транзистор KT973А.

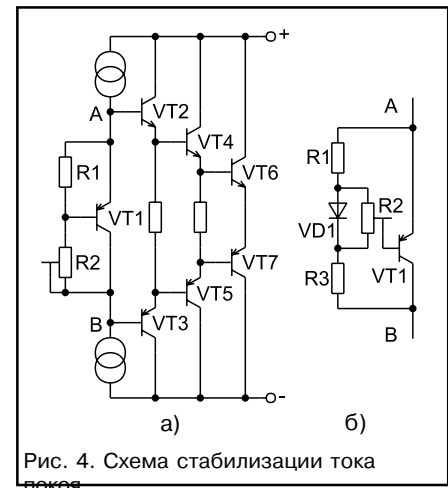


Рис. 4. Схема стабилизации тока покоя

Произведена и замена ОУ на более современные. Основной ОУ U1 заменен на AD744, который обладает повышенным быстродействием и хорошей линейностью. ОУ U2, который работает в схеме поддержания нулевого потенциала на выходе УМЗЧ, заменен на ОР177, обладающий низким смещением нуля (не более 15 мкВ). Это позволило отказаться от подстроечного резистора регулировки смещения. Нужно отметить, что из-за особенностей схемотехники AD744 ОУ U2 должен обеспечивать выходное напряжение, близкое к напряжению питания. Поэтому не все типы прецизионных ОУ подойдут. ОУ U3, который работает в схеме компенсации импеданса соединительных проводов АС, заменен на AD711. Параметры этого ОУ не столь критичны, поэтому был выбран дешевый ОУ с достаточным быстродействием и довольно низким смещением нуля. В результате этих замен понадобилось несколько скорректировать номиналы цепей частотной коррекции. Емкость конденсатора С13 уменьшена до 10 пФ. Параллельно этой емкости включена паразитная емкость [коллектор транзистора VT8] – [корпус]. Эта емкость зависит от примененной изолирующей прокладки и может быть соизмеримой с С13. Поэтому рекомендуется использовать для VT8 толстую керамическую прокладку.

В схему добавлены резисторные делители R49–R51, R52–R54 и R47, R48, которые служат для снятия сигналов тока и

напряжения для схемы измерения мощности.

Изменена реализация земляных цепей. Поскольку теперь каждый канал усилителя полностью собран на одной плате, отпала необходимость во множественных земляных проводах, которые должны соединяться в одной точке на шасси. Специальная топология печатной платы обеспечивает звездообразную разводку земляных цепей. Звезда земли соединяется одним проводником с общим выводом источника питания. Нужно заметить, что такая топология годится лишь при полностью отдельных источниках питания левого и правого каналов.

В оригинальной схеме усилителя петля обратной связи по переменному току охватывает и контакты реле, которые подключают нагрузку. Эта мера принята для уменьшения влияния нелинейности контактов реле. Однако при этом возможны проблемы с работой защиты по постоянной составляющей. Дело в том, что при включении усилителя питание подается

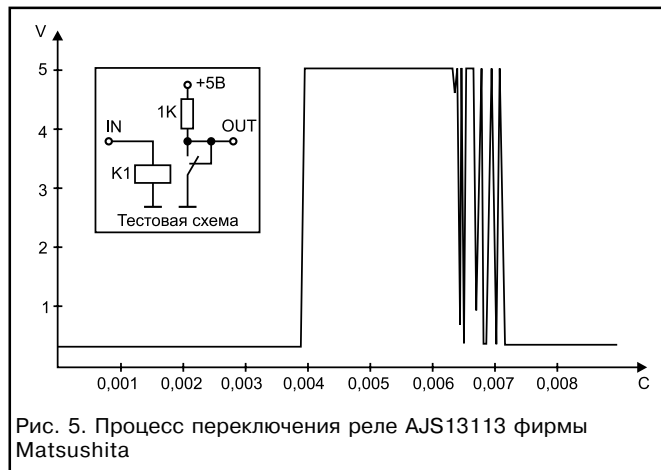


Рис. 5. Процесс переключения реле AJS13113 фирмы Matsushita

раньше, чем включается реле нагрузки. В это время на входе УМ может присутствовать сигнал, а коэффициент передачи усилителя, вследствие разорванной петли обратной связи, очень велик. В таком режиме УМ ограничивает сигнал, а схема компенсации напряжения смещения неспособна поддержать на выходе УМ нулевое значение постоянной составляющей. Поэтому еще до подключения нагрузки обнаруживается, что на выходе УМ присутствует постоянная составляющая, и срабатывает система защиты. Устранить этот эффект очень просто, если использовать реле с переключающими контактами. Нормально-замкнутые контакты должны замыкать петлю ООС точно так же, как и нормально-разомкнутые. При этом при срабатывании реле обратная связь остается разорванной только на очень короткое время (рис. 5), в течение которого защита сработать не успеет.