# МОДУЛЬ SOFT-START ДЛЯ ЛАМПОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ.

Применение систем мягкого включения (soft-start) давно стало правилом хорошего тона в полупроводниковых усилителях мощности. Практически ни одно заслуживающее внимание устройство, описания которых были опубликованы в последние несколько десятилетий, не обходилось без выполненных в том или ином виде систем soft-start.

С другой стороны, большинство систем мягкого включения современных «каменных» усилителей обеспечивают только защиту от перегорания сетевых предохранителей и от обгорания контактов выключателя питания. В особо тяжёлых случаях - защиту от «выбивания» автоматического предохранителя в квартирном щитке ☺. При грамотном выборе диодов выпрямителя классического трансформаторного источника питания необходимость в их защите от пусковых токов отсутствует. Современные диоды Шоттки способны выдержать импульсные токи, куда более значительные, чем способна отдать в нагрузку в режиме КЗ вторичная обмотка трансформатора питания.

В отличие от классических трансформаторных, в импульсных источниках питания выпрямитель подключен непосредственно к сети, которую по отношению к выпрямителю можно рассматривать как идеальный источник напряжения. Вследствие этого, защита диодов выпрямителя и других чувствительных компонентов от чрезмерных пусковых токов является необходимой. Массовый переход промышленности на выпуск импульсных источников питания, как более экономичных в части потребления энергии, так и более дешёвых в производстве, привел к бурному развитию специальных электронных компонентов специально предназначенных для ограничения пусковых токов (Inrush current limiters) – термисторов с отрицательным (NTC) или положительным (PTC) температурным коэффициентом.

Термисторы NTC предназначены для организации пассивной схемы ограничения пусковых токов, (passive ICL) при которой термистор включается в разрыв цепи заряда конденсаторов источника питания. При протекании пускового тока термистор быстро нагревается, его сопротивление падает и в таком состоянии NTC-термистор практически не влияет на дальнейшую работу источника питания. Основными недостатками пассивной системы ограничения пусковых токов на NTC-термисторах является зависимость эффективности ограничения от окружающей температуры, а также инерционность, обусловленная необходимостью остывания термистора.

Активные системы ограничения пусковых токов (active ICL) построены по принципу включения в цепь заряда конденсаторов фильтра ограничительного резистора, зашунтированного нормально разомкнутыми контактами электромеханического реле. Спустя время, необходимое для заряда конденсаторов, внешняя схема управления включает реле и ограничительный резистор замыкается накоротко. Схема формирования задержки срабатывания реле в может быть различной, иногда вместо реле применяют полупроводниковые приборы. PTC-термисторы предназначены для замены постоянного резистора в источниках питания с активной системой ограничения пусковых токов и позволяют организовать дополнительную защиту от короткого замыкания.

В радиолюбительской литературе и на специализированных форумах в интернете описано множество различных конструкций систем мягкого включения, предназначенных для полупроводниковых усилителей мощности. Подавляющее большинство таких устройств построено по схеме active ICL с постоянным резистором в качестве ограничительного элемента.

К сожалению, любители ламповой техники зачастую пренебрегают применением в свих конструкциях системами мягкого включения. Бытует мнение, что задержка подачи анодного напряжения усилительных каскадов, обеспечивающаяся временем прогрева

катодов кенотрона выпрямителя питания, решает все проблемы. Возможно, что проблему с «перегоранием пробок» такой подход действительно решает.

Электровакуумные приборы, не смотря на кажущуюся «неубиваемость» по сравнению с полупроводниками, требуют гораздо бережного обращения в процессе эксплуатации. Для безопасного включения лампового усилителя простого ограничения пускового тока явно недостаточно. В целях обеспечения длительного срока службы электронных ламп крайне желательно обеспечить правильную последовательность подачи как питающих напряжений, так и напряжений усиливаемого сигнала.

Если в транзисторном усилителе все требующиеся для нормальной работы усилительного каскада питающие напряжения могут быть поданы одновременно, то для ламповых усилителей необходимо, как минимум, задержать подачу анодного напряжения на время прогрева катодов усилительных радиоламп. Многие считают, что такая задержка автоматически обеспечивается при применении кенотронов в выпрямителе анодного источника питания. В действительности, время запуска кенотронов обычно составляет 5-7 секунд для ламп с косвенным накалом и 1-2 секунды для прямонакальных ламп. Прогрев катодов большинства усилительных ламп с косвенным накалом занимает до 15-20 секунд, что значительно больше, чем обеспечивается кенотронной задержкой.

Кроме задержки подачи анодного напряжения, для продления срока службы радиоламп крайне желательно, чтобы выход на режим по постоянному току происходил в отсутствие напряжения сигнала. В процессе измерения параметров большого количества различных радиоламп было замечено, что при «горячем» включении радиолампы в панель прогретого измерительного прибора у тестируемой лампы наблюдается ускоренная деградация активного слоя катода, сопровождаемая осаждением материала катода на стекло баллона. Осаждение происходит буквально «на глазах» в момент прогрева лампы, одного запуска бывает достаточно, чтобы оставить довольно значительные «отметины». В отсутствии измерительного сигнала эффект не наблюдается. На Рисунке 1 стрелками показаны хорошо различимые следы от разового «горячего» включения ламп 6SL7GT в измерительный прибор. Аналогичный эффект «под сигналом» наблюдается и в ламповых усилителях.

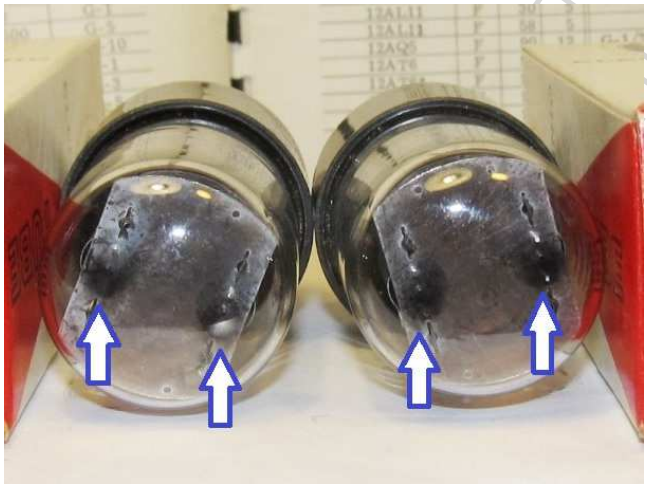


**Рис. 1.**

Принципиальная схема модуля включения и защиты, спроектированная с учетом вышеуказанных требований, показана на Рисунке 2. Кроме собственно мягкого старта, устройство обеспечивает защиту подключенных акустических систем от переходных процессов, происходящих в момент включения усилителя, а также контроль температуры внутри корпуса и, при необходимости, управление 12-и вольтовым вентилятором охлаждения.

Все необходимые для работы модуля последовательности управляющих сигналов формируются микроконтроллером IC1 PIC16F690 фирмы Microchip, что позволило максимально упростить схему, не жертвуя функциональными характеристиками. При подключении модуля к сети или при нажатии кнопки питания SW1, МК считывает величину напряжения с движков подстроечных резисторов VR1-VR5 и, в зависимости от полученного

результата, устанавливает необходимые временные интервалы между этапами. Непосредственное управление реле осуществляет микросхема IC2, представляющая из себя сборку из семи транзисторов Дарлингтона с цепями защиты. Источник питания модуля особенностей не имеет.

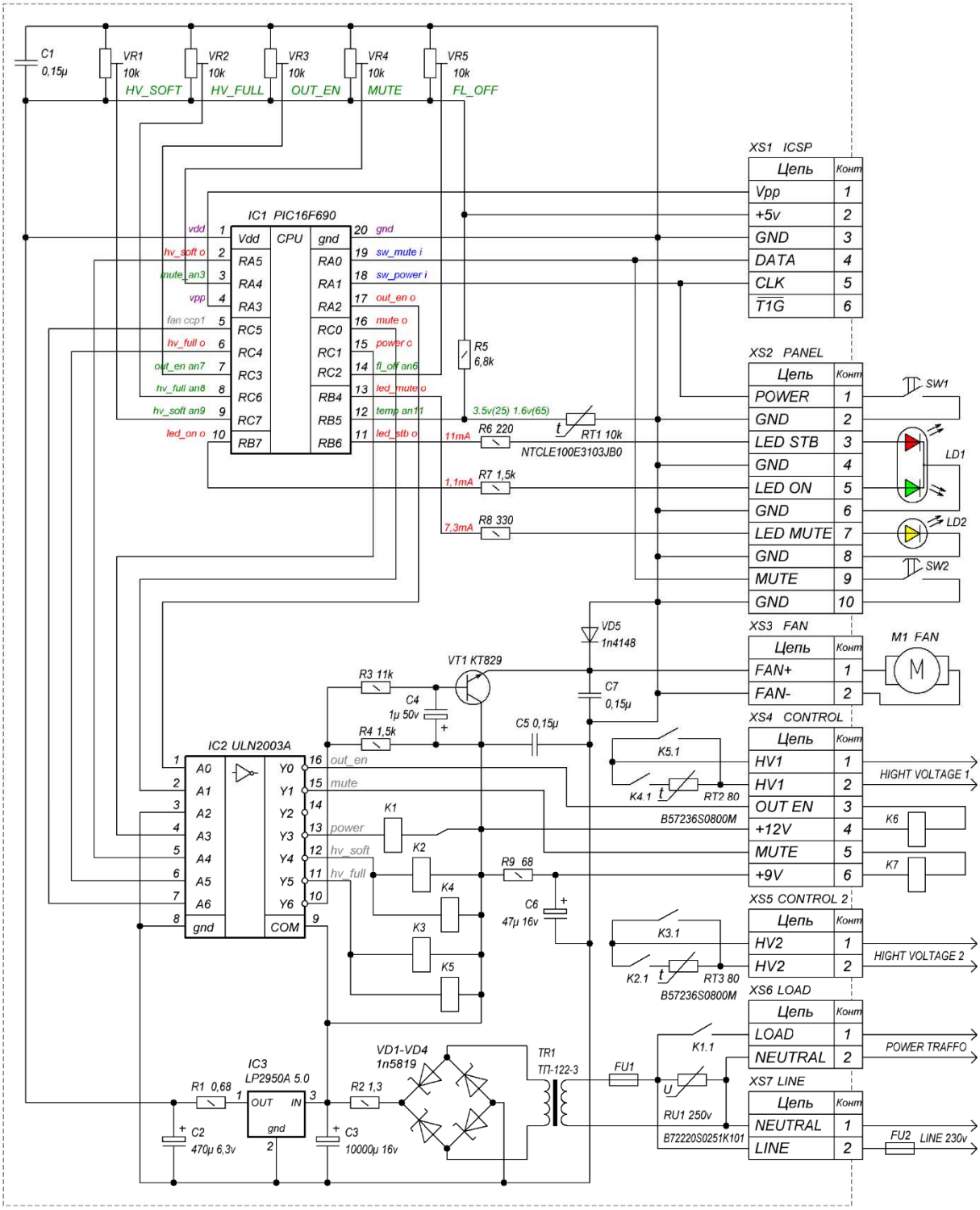



**Рис.2**

Делитель напряжения R5 - RT1 предназначен для мониторинга температуры внутри корпуса усилителя. В качестве измерительного элемента применен терморезистор NTCLE100E3 производства фирмы Vishay. Приятным бонусом при использовании МК стала

возможность исключительно просто организовать пропорциональное управление 12-и вольтовым вентилятором охлаждения, что может оказаться крайне полезным для защиты от перегрева обладающих высоким тепловыделением ламповых усилителей. Формирование сигнала для управления скоростью вращения вентилятора осуществляется модулем ECCP микроконтроллера, настроенного на выдачу сигнала ШИМ с частотой более 60 КГц, которая находится далеко за порогом звукового диапазона. Сигнал ШИМ через инвертор поступает на ФНЧ с частотой среза 16 Гц, выполненный на элементах R4 и C4, и далее на эмиттерный повторитель на транзисторе VT1. Таким образом на вентилятор охлаждения подается регулируемое от 4 до 10 вольт постоянное напряжение, которое не создает помех работе усилителя. Как было сказано выше, программой МК предусмотрена возможность полного отключения режима ШИМ управления вентилятором.

Для уменьшения возможных помех от работы вентилятора, рекомендуется располагать последний в корпусе усилителя как можно дальше от слаботочных цепей. Хорошим решением будет установить керамический конденсатор ёмкостью 0,1-1 мкф непосредственно на выводы электродвигателя.

Токоограничивающие резисторы R6-R8 подобраны экспериментальным путём для обеспечения близкой интенсивности свечения светодиодов индикации. С большой долей вероятности, при использовании отличных от примененных автором светодиодов «made_in_china», номиналы резисторов придется подобрать или рассчитать заново.

Варистор RU1 обеспечивает защиту компонентов усилителя от опасных скачков сетевого напряжения.

Все детали модуля, за исключением реле блокировки, смонтированы на печатной плате габаритами 80 х 101 мм. Максимально допустимое коммутируемое напряжение анодного питания определяется параметрами примененных реле К1-К5 и составляет 400

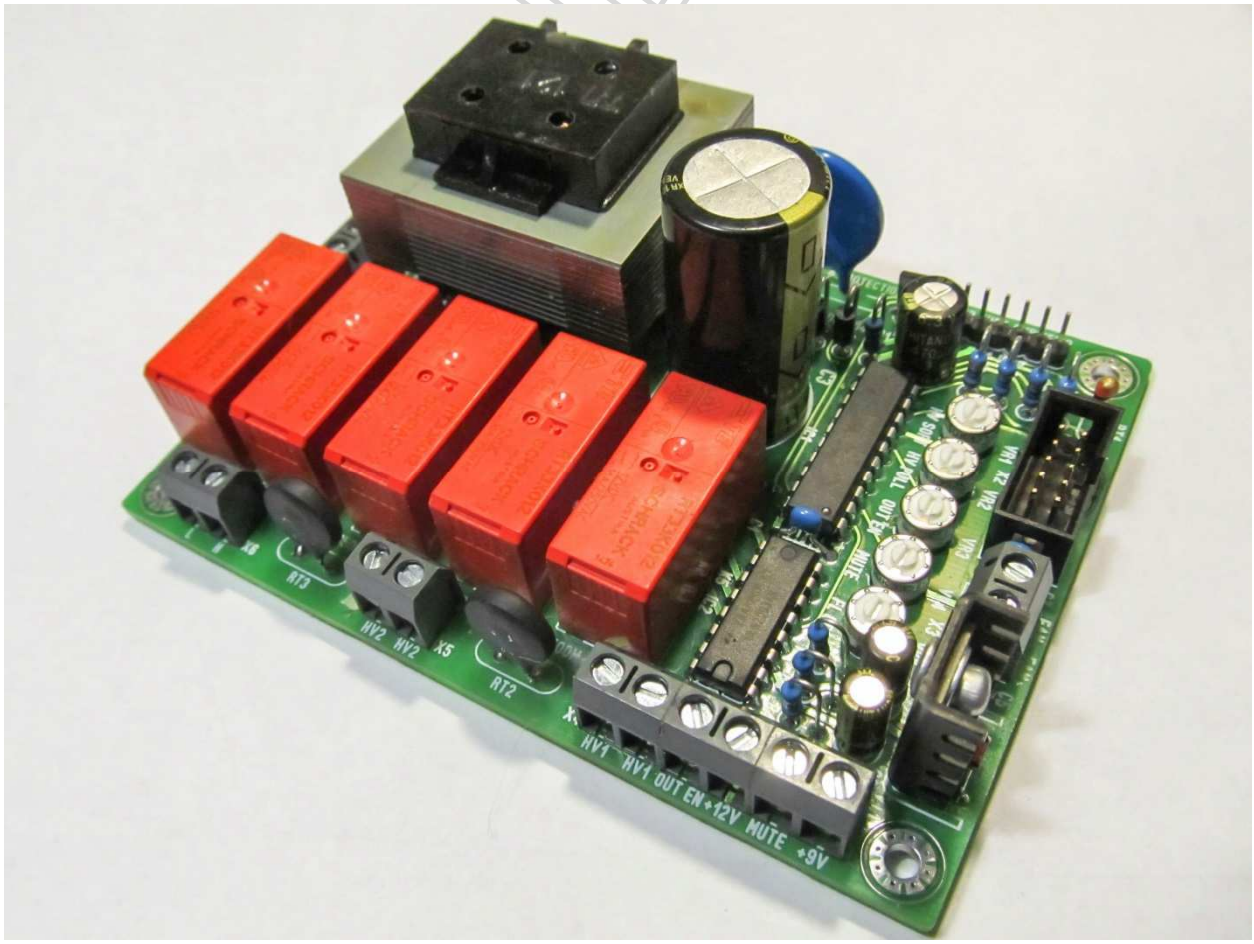



**Рис.3**

вольт AC при импульсном токе до 80 ампер, что потребовало применения специальных мер по повышению электрической прочности при проектировании и изготовлении печатной платы. В устройстве использованы австрийские силовые реле TE Connectivity серии SCHRACK RT33K012, предназначенные для применения в системах ограничения пусковых токов. Фото смонтированного модуля представлены на рис.3.

Печатная плата рассчитана на установку микросхем IC1 и IC2 в корпусах DIP, IC3 в корпусе TO39, транзистора VT1 в TO220, диодов VD1-VD4 в DO41 и VD5 в DO-35. В конструкции модуля применены выводные металлопленочные резисторы MF-25 и электролитические конденсаторы серий EXR, ESX производства HITANO, подстроечные резисторы PV32P фирмы Murata, варистор RU1 и NTC термисторы RT2, RT3 от TDK-EPCOS, винтовые клеммы DECA.

Выбор типа трансформатора для питания модуля зависит от тока потребления вентилятора охлаждения. С трансформаторами НПК «Комплекс» типа ТП-112-3, ТП-112-5 возможно подключение производительного 120-мм вентилятора с током потребления до 500мА. С ТП-121-17 или ТП121-18 - до 300 мА. Если необходимость в вентиляторе отсутствует, или планируется вентилятор с током потребления не более 100-150 мА, то можно применить стандартные герметичные трансформаторы типа BV EI-38 от HAHN, ERA или другого производителя, как с одной, так и с двумя вторичными обмотками. Напряжение вторичных обмоток под нагрузкой – 8,5 – 9,5 вольт переменного тока. Печатная плата позволяет установить любой из вышеперечисленных трансформаторов питания.

Реле К6 и К7 блокировки сигнала по входу следует располагать в как можно ближе ко входу первого каскада усилителя, либо к входным разъёмам. Для исключения возможных наводок на входные цепи, напряжение питание на катушки реле подается через RC-фильтр на элементах R9 и C6. К материалу контактов реле блокировок особых требований не предъявляется. В авторском экземпляре применены малогабаритные сигнальные реле HK4100F-DC9V-SHG производства фирмы с интересным названием HUI KE. HK4100F-DC9V являются китайским «клоном» реле SY-9-K от TAKAMISAWA.

Блокировка сигнала по выходу осуществляется реле К8 и К9 производства TE Connectivity, тип SCHRACK V23092-A1012. Реле смонтированы на отдельных печатных платах, предназначенных для установки непосредственно на выходные акустические разъёмы. Межосевое расстояние – от 19 до 25мм. Как и в случае с К6 и К7, к материалу контактов реле особых требований не предъявляется.

Алгоритм работы устройства приведен в Приложении 1. Некоторые из возможных вариантов подключения модуля к усилителю показаны в Приложении 2.

*Николай Кочановский*
*Санкт-Петербург*
*2016г.*

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Алгоритм работы модуля.**

После подачи напряжения питания устройство находится в режиме «STANDBY» (ожидание). В этом режиме кнопка «MUTE» (тихо) не оказывает воздействия на работу устройства. По нажатию кнопки включения питания «POWER» устройство реализует следующую процедуру включения усилителя:

- Происходит измерение температуры внутри корпуса усилителя. Если $t^o$ находится вне рабочего диапазона от 5°С до 55°С, то включение невозможно. Если $t^o$ в пределах рабочего диапазона, то подается сетевое напряжение питания на накальный или анодно-накальный трансформатор. Срабатывает реле К1. Включается индикация, соответствующая процедуре включения усилителя. Если $t^o$ >35 °С, то подается питание на вентилятор охлаждения. Скорость вращения вентилятора зависит от температуры внутри корпуса.
- По истечении регулируемой от 0,1 до 64 секунд задержки происходит подключение анодных трансформаторов или анодных обмоток анодно-накальных трансформаторов к нагрузке через токоограничивающие термисторы. Срабатывают реле К2 и К4.
- По истечении регулируемой от 0,1 до 32 секунд задержки происходит подключение анодных трансформаторов или анодных обмоток анодно-накальных трансформаторов к нагрузке минуя токоограничивающие термисторы. Срабатывают реле К3 и К5.
- Отключаются реле К2 и К4. По истечении регулируемой от 0,1 до 32 секунд задержки происходит разблокировка усилителя по выходу. Срабатывают внешние реле К6 с нормально замкнутым контактами.
- По истечении регулируемой от 0,1 до 32 секунд задержки происходит разблокировка усилителя по входу. Срабатывают внешние реле К7 с нормально замкнутым контактами. Усилитель переходит в режим «ON» (включено).

Измерение температуры при работе устройства происходит постоянно. Если в процессе работы $t^o$ внутри корпуса оказывается ниже 5°С, то происходит автоматическое безопасное выключение усилителя и включается режим «COLD» (холодно), что сопровождается соответствующей индикацией. Включение устройства станет возможно только после того, как температура поднимется выше 5 °С и устройство автоматически перейдет в режим «STANDBY» (ожидание).

Если $t^o$ становится выше 55 °С, что означает что вентилятор охлаждения даже на максимальной скорости вращения не может обеспечить поддержания стабильной температуры внутри корпуса усилителя, включается индикатор перегрева «HOT» (жарко). При достижении температуры 65 °С происходит автоматическое безопасное выключение усилителя с отключением вентилятора охлаждения и индикацией режима «ALARM» (авария). Спустя минуту после того, как температура внутри корпуса снизится до 55 °С устройство автоматически перейдет в режим «STANDBY» (ожидание).

Режим «STOP» предназначен для экстренного, минуя все задержки, безопасного выключения устройства. Режим активируется при удержании любой из кнопок более трех секунд в нажатом состоянии и сопровождается соответствующей индикацией. В выключенном состоянии, либо в режимах аварийного отключения, вызов режима «STOP» невозможен. Устройство автоматически перейдет в режим «STANDBY» (ожидание) из «STOP» по истечении одной минуты после отпускания нажатой кнопки и при условии, что температура внутри корпуса находится в диапазоне от 5°С до 55°С. В противном случае,

режим «STANDBY» (ожидание) будет автоматически включен спустя минуту, после того, как температура внутри корпуса установится в указанных выше пределах.

В режимах «STANDBY», «COLD», «ALARM» и «STOP» вентилятор охлаждения всегда выключен. В рабочих режимах скорость вращения вентилятора зависит от температуры внутри корпуса. Диапазон регулировки напряжения питания вентилятора от 4 до 10 вольт постоянного тока при изменении $t^o$ от 35°C до 55°C. При желании, можно отключить управление вентилятором охлаждения. Для этого, при включении модуля управления в сеть необходимо удерживать нажатой кнопку «MUTE» не менее двух секунд. МК сохранит выбор в энергонезависимой памяти. Алгоритм работы модуля сохранится, за исключением того, что напряжение питания на вентилятор подаваться не будет. Повторное включение управления вентилятором осуществляется путём удержания нажатой более двух секунд кнопки «POWER» при включении модуля в сеть. Если нет необходимости использовать защиту по температуре, достаточно либо выпаять терморезистор RT1 из платы модуля, либо закоротить его накоротко. В первом случае вентилятор будет включатся на полную скорость в рабочих режимах, во втором – не будет включаться ни в каком из режимов работы.

Модуль реагирует на кратковременное, менее трех секунд, нажатие кнопки «MUTE» (тихо) только в режиме «ON» (включено). При этом снимается питание с внешних реле К7, что сопровождается включением соответствующего светодиода. Нормально замкнутые контакты реле замыкают входной сигнал на «землю» и блокируют прохождение сигнала на усилитель. Режим отключается повторным нажатием кнопки «MUTE» (тихо).

Кратковременное нажатие на кнопку «POWER» в режиме «ON» (включено) либо в процессе выполнения процедуры включения приводит к переходу устройства к процедуре плавного выключения усилителя с соответствующей индикацией режима работы. При этом сперва отключаются реле К7 разблокировки по входу, спустя 0,1 секунду отключатся реле К6 разблокировки по выходу, сработают реле К3 и К5, включая в цепь анодного питания токоограничивающие термисторы. Через 0,1 секунды отключатся реле К2 и К5, спустя ещё 0,1 секунду вновь отключатся реле К3 и К5, снимая анодное напряжение с усилителя. По истечении регулируемой задержки от 0,1 до 64 секунд происходит отключение накального или анодно-накального трансформатора от сети и включается режим «STANDBY» (ожидание). Повторное нажатие кнопки «POWER» в процессе выполнения процедуры выключения усилителя приведет к переходу к процедуре включения.

Установленные на плате устройства подстроечные резисторы позволяют оперативно регулировать время задержки между моментами срабатывания реле. Дискретность регулировки составляет 0,5 секунды. Увеличение времени задержки происходит при вращении движков резисторов по часовой стрелке, уменьшение – при вращении против часовой стрелки.

- Резистор VR1 «HV_SOFT» позволяет установить время задержки от 0,1 до 64 секунд с момента нажатия кнопки «POWER» до момента срабатывания реле К2 и К6 подачи анодного питания через токоограничивающие термисторы.
- Резистор VR2 «HV_FULL» позволяет установить время задержки от 0,1 до 32 секунд с момента подачи анодного питания через токоограничивающие термисторы до момента срабатывания реле К3 и К5 замыкающих термисторов накоротко.
- Резистор VR3 «OUT_EN» позволяет установить время задержки от 0,1 до 32 секунд с момента подачи анодного питания минуя токоограничивающие термисторы до момента срабатывания реле К6 и разблокировки усилителя по выходу.

- Резистор VR4 «MUTE» позволяет установить время задержки от 0,1 до 32 секунд с момента разблокировки усилителя по выходу до момента срабатывания реле К7 и разблокировки усилителя по входу.
- Резистор VR5 «FL_OFF» позволяет установить время задержки от 0,1 до 64 секунд с момента отключения анодного питания до момента отключения реле К1 и отключения напряжения накала ламп.

**Изменения во временах задержки вступают в силу ТОЛЬКО после нажатия кнопки включения «POWER».**

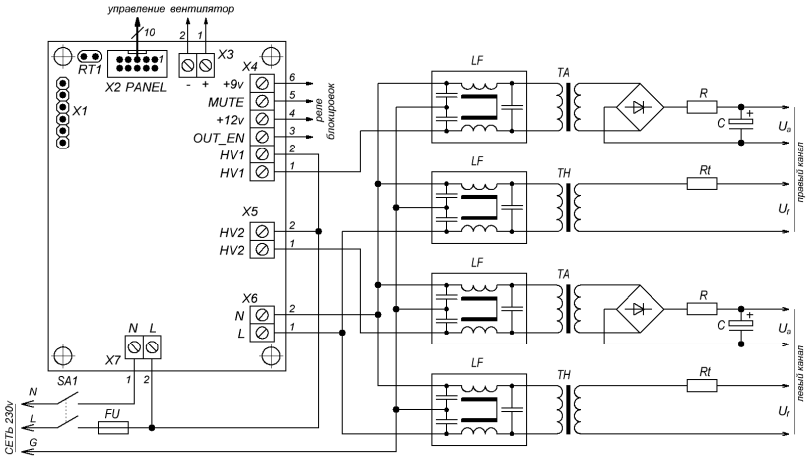
Светодиодные индикаторы позволяют организовать интуитивно понятное и наглядное отображение режимов работы модуля. Период мигания светодиодов во всех режимах составляет примерно одну секунду, что удобно для отсчета времени. Возможны следующие сочетания:

- Светодиод «**POWER**» светится красным – режим «STANDBY» (ожидание).
- Светодиод «**POWER**» мигает красным – режим «ALARM» (авария). Температура внутри корпуса превысила 65 °С.
- Светодиод «**POWER**» светится зеленым – режим «ON» (включено). Температура внутри корпуса не превышает 55 °С.
- Светодиод «**POWER**» мигает с зеленого на желтый – режим «ON» (включено). Температура внутри корпуса превышает 55 °С.
- Светодиод «**POWER**» мигает с зеленого на красный – режим «COLD» (холодно). Температура внутри корпуса ниже 5 °С.
- Светодиод «**POWER**» мигает с красного на желтый – режим «STOP».
- Светодиод «**POWER**» мигает желтым в сочетании со светящимся желтым светодиодом «**MUTE**» - выполняется процедура плавного включение усилителя.
- Светодиод «**POWER**» мигает зеленым в сочетании со светящимся желтым светодиодом «**MUTE**» - выполняется процедура плавного выключение усилителя.
- Светодиод «**POWER**» светится желтым – одна из кнопок нажата и удерживается в нажатом состоянии во время подключения модуля к сети – режим программирования включением вентилятора.
- Светодиод «**MUTE**» светится желтым в сочетании со светящимся зеленым светодиодом «**POWER**» - режим «ON» (включено) + «MUTE» (тихо). Температура внутри корпуса не превышает 55 °С, подача сигнала на усилитель заблокирована.
- Светодиод «**MUTE**» светится желтым в сочетании со мигающим с зеленого на желтый светодиодом «**POWER**» - режим «ON» (включено) + «MUTE» (тихо). Температура внутри корпуса превышает 55 °С, подача сигнала на усилитель заблокирована.

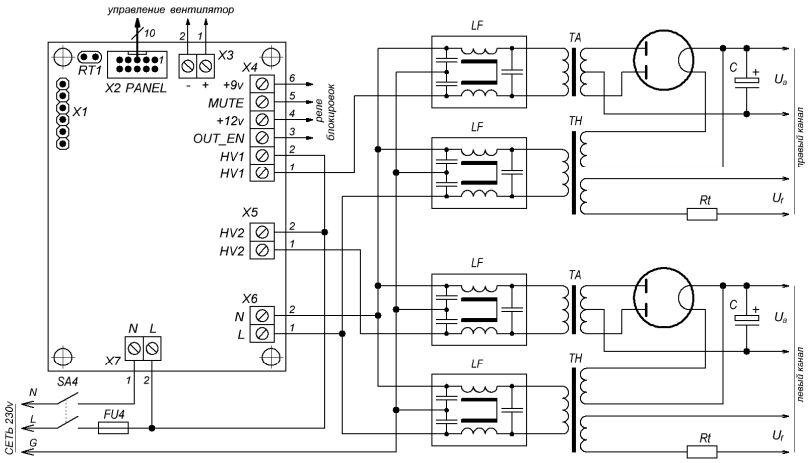
Другие возможные продолжительные сочетания свечения или мигания индикаторов модуля являются следствием либо неисправности модуля, либо ошибок при монтаже устройства и у автора не проявлялись.

*Николай Кочановский*
*Санкт-Петербург*
*2016г.*

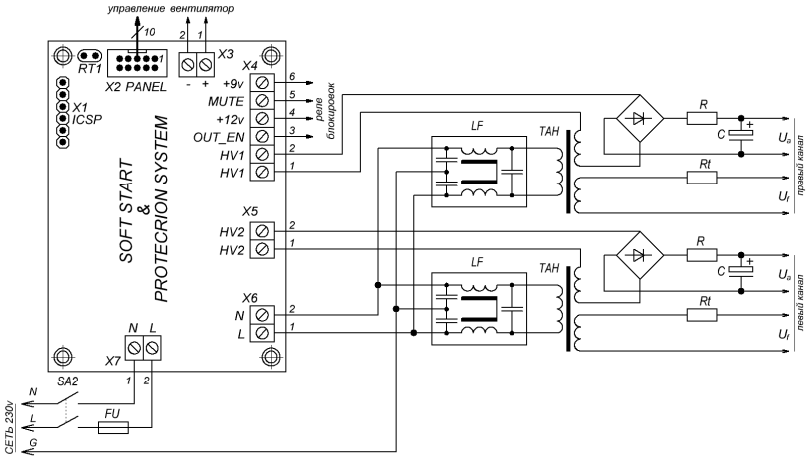
## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Варианты подключения модуля к усилителю.



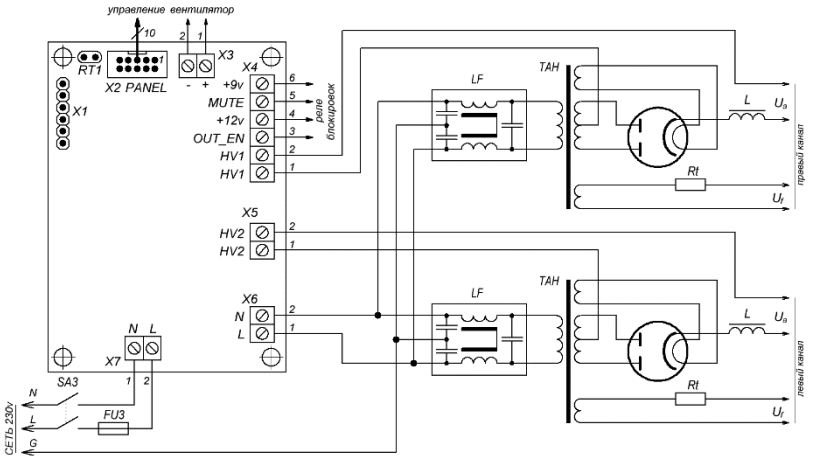

*В КАЖДОМ КАНАЛЕ ОТДЕЛЬНЫЙ АНОДНЫЙ И ОТДЕЛЬНЫЙ НАКАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОРЫ, ПОЛУПРОВОДНКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ*



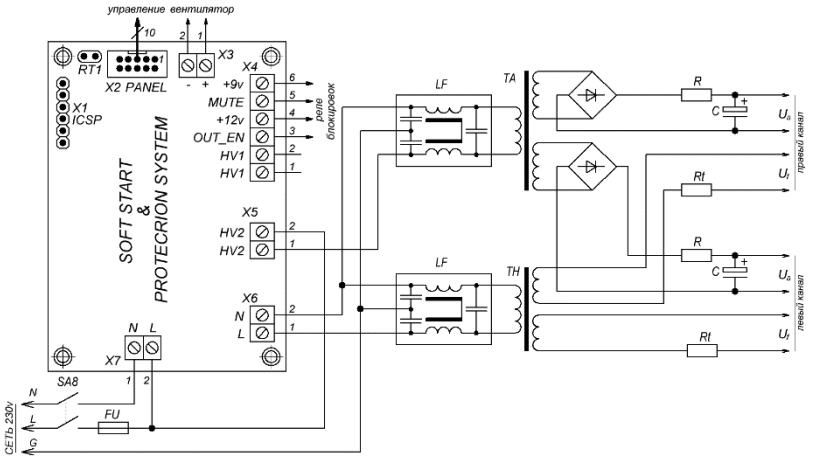

*В КАЖДОМ КАНАЛЕ ОТДЕЛЬНЫЙ АНОДНЫЙ И ОТДЕЛЬНЫЙ НАКАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОРЫ, КЕНОТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ*



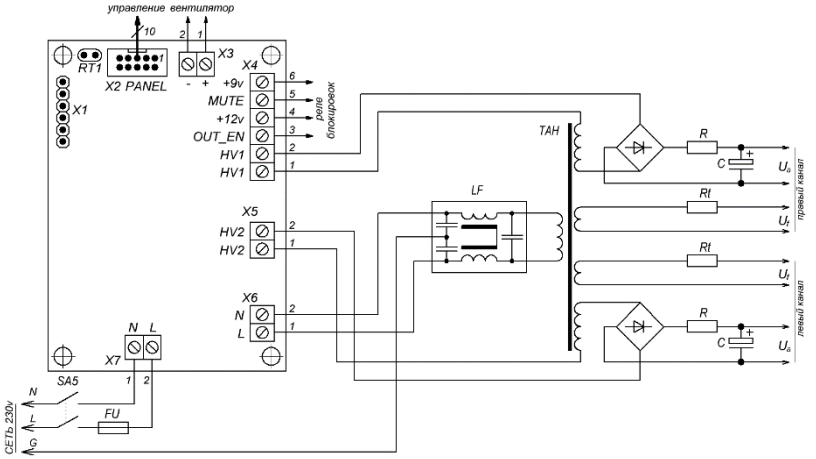

*В КАЖДОМ КАНАЛЕ ОТДЕЛЬНЫЕ АНОДНО-НАКАЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ*



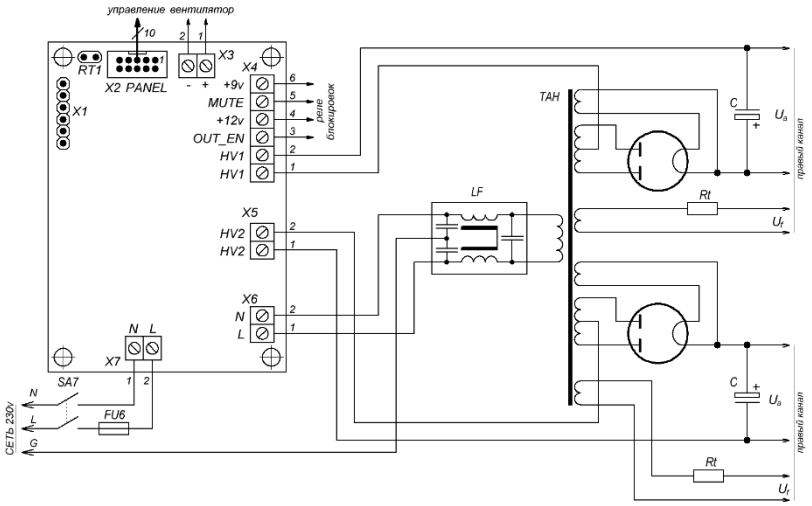

*В КАЖДОМ КАНАЛЕ ОТДЕЛЬНЫЙ АНОДНО-НАКАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР, КЕНОТРОННЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ*



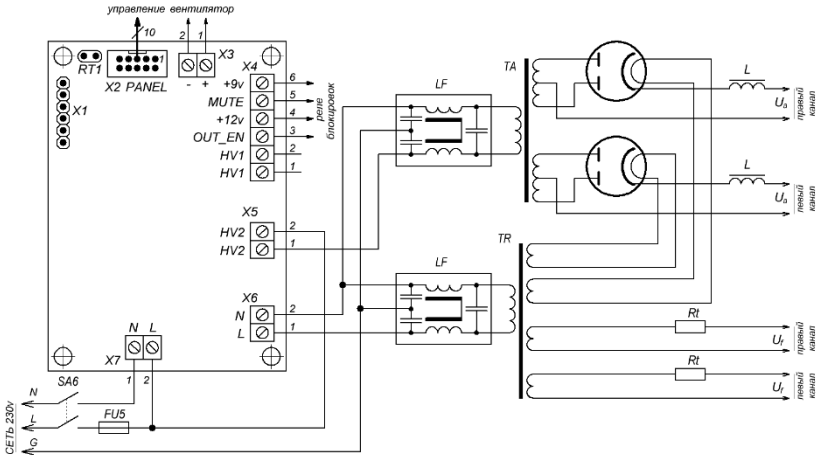

*РАЗДЕЛЬНЫЕ АНОДНЫЙ И НАКАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОРЫ ДВА КАНАЛА, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ*



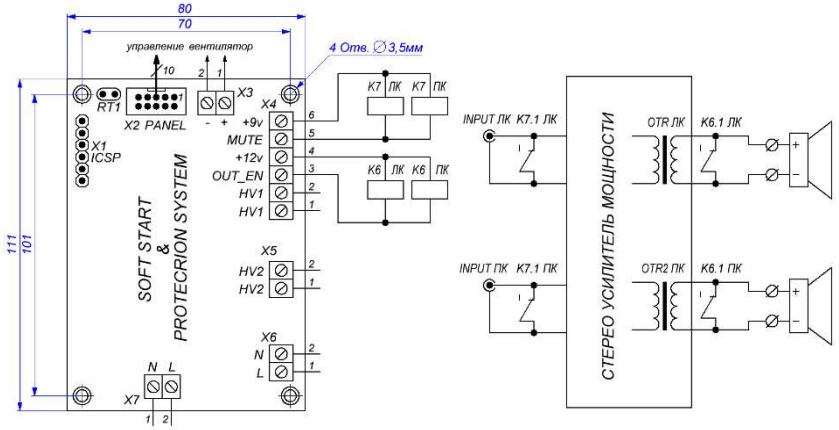

*ОДИН ОБЩИЙ АНОДНО-НАКАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР НА ДВА КАНАЛА, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ*




ОДИН ОБЩИЙ АНОДНО-НАКАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР НА ДВА КАНАЛА, КЕНОТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ




РАЗДЕЛЬНЫЕ АНОДНЫЙ И НАКАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОРЫ ДВА КАНАЛА, КЕНОТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ




ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ МОДУЛЯ И ПОДКЛЮЧЕНИЕ РЕЛЕ БЛОКИРОВОК К УСИЛИТЕЛЮ