

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Ю.Ю. Моргунов, А.Г. Якунин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул

Статья посвящена разработке электронной нагрузки, необходимой в лаборатории разработчика радиоэлектронной аппаратуры для исследования работы различных силовых модулей, в основном – источников питания. От известных решений предлагаемое устройство отличается тем, что оно ориентировано на работу с персональным компьютером, когда величина нагрузки и динамика ее изменения во времени управляется с применением интерфейсных средств виртуальной лаборатории.

Ключевые слова: разработка электронной аппаратуры, силовая электроника, виртуальная лаборатория, электронная нагрузка

При разработке электронных схем DC-DC, AC-DC и DC-AC преобразователей, различных блоков питания источников тока и т.п. возникает необходимость проверять их нагрузочные характеристики. При исследовании таких схем необходимо учитывать многие факторы. В частности, электронная нагрузка должна уметь имитировать сложную электронную систему, которая может иметь множество различных состояний и режимов (полное функционирование, частичное функционирование или состояние сна), влияющих на потребляемый системой ток. При этом динамика потребления тока также может варьироваться в широких пределах – от статического потребления до потребления в импульсном режиме с шириной спектра до нескольких мегагерц.

Промышленные электронные нагрузки в состоянии справиться с такими задачами, однако, громоздкость и сложность их электронных схем не применима для использования в виртуальной лаборатории. Как известно, основным требованием, предъявляемым к используемому в виртуальной лаборатории оборудованию, является его максимальная компактность, простота и дешевизна в сочетании с расширенными функциональными возможностями за счет их управления и контроля средствами вычислительной техники.

Большинство типовых схем электронных нагрузок основано на стабилизации падения напряжения на специальном шунте, который включен последовательно с нагрузкой. Снимаемое с него напряжение через обратную связь управляет работой транзистора, регулирующего протекающий через нагрузку ток,

за счет чего решается проблема его температурного дрейфа и зависимость величины тока от приложенного к нагрузке напряжения. Пример практической реализации такой схемы, приведен на рисунке 1 [1].

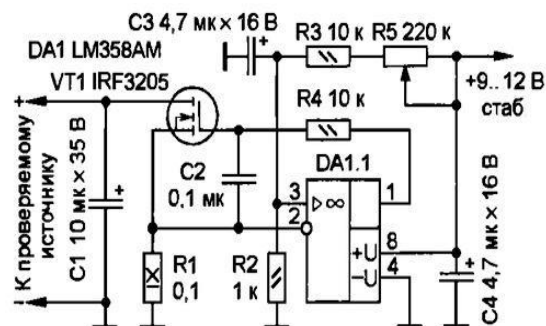


Рисунок 1 – Схема электронной нагрузки на операционном усилителе и полевом транзисторе

Однако ни данное, ни другие подобные схемотехнические решения не могут быть использованы в виртуальной лаборатории, потому как представляют собой регулируемые статические источники постоянного тока. И подключение таких схем к компьютеру не должно ограничиваться одной лишь возможностью задавать силу протекающего через нагрузку тока программным путем с помощью интерфейса пользователя, а не с помощью переменного резистора.

В предлагаемом решении полагается, что помимо режима управляемого источника тока нагрузка может работать и в режиме управляемого сопротивления, что для многих

применений гораздо более актуально. Такой режим предполагает, что при изменении напряжения, подводимого к электронной нагрузке, протекающий через нее ток будет изменяться пропорционально приложенному напряжению. Очевидно, такой режим в принципе не может быть реализован представленной на рисунке 1 схемой, так как на ее выходе установлен балластный конденсатор, вызывающий протекание по нагрузке больших токов, возникающих при переходных процессах в моменты резкого изменения напряжения на нагрузке. Кроме того, наличие конденсатора в цепи обратной связи также исключает возможность динамического изменения величины протекающего через нагрузку тока.

Применение быстродействующих средств вычислительной техники позволяет достаточно просто программным путем реализовывать и иные режимы работы нагрузки, например, имитировать ее емкостный или индуктивный характер. Для этого достаточно изменять протекающий через нагрузку ток пропорционально производной или интегралу по времени от приложенного к нагрузке напряжения. Аналогичным образом можно имитировать и иные виды нелинейной нагрузки. Например, можно легко реализовать отсроченную реакцию нагрузки на поступающие на нее скачки напряжения, обусловленную инерционностью средств защиты электронной схемы, которую моделирует электронная нагрузка.

Не представляет сложности и моделирование с помощью виртуализированной электронной нагрузки иных видов подключаемых к испытываемому устройству электронных схем. Например, можно имитировать скачки тока, сопровождающие смену режима работы запитываемого от испытываемого источника напряжения электронного устройства, возникновение в нагрузке коротких замыканий или обрыва по цепям питания.

Целью данной работы явилась разработка виртуализированной электронной нагрузки, способной поддерживать все перечисленные режимы и имеющей следующие технические характеристики:

- максимальный ток нагрузки – 10А;
- максимальное напряжение на нагрузке 20В;
- время фронта (спада) импульса тока нагрузки, не более 1 мкс;
- время реакции нагрузки на скачки подаваемого на нее напряжения, не более – 3 мкс.

Структурная схема такой виртуализированной нагрузки представлена на рисунке 2 и включает персональный компьютер с управляющей программой (ПК), микроконтроллерный блок управления (МК) и собственно электронную нагрузку (ЭН).



Рисунок 2 – Структурная схема виртуализированной электронной нагрузки

Программное обеспечение ПК управляет не только данной нагрузкой, но и всей виртуальной лабораторией в соответствии с вводимыми пользователем данными. Блок управления, реализованный на микроконтроллере STM32F405RG. Программное обеспечение МК, аналогично, управляет как другими модулями виртуальной лаборатории [2], так и величиной протекающего через нагрузку тока посредством подачи в ЭН напряжения $U_{упр}$ в соответствии с алгоритмом, задаваемым ПК, а также на основании поступающей из ЭН информации о величине фактически протекающего через ЭН тока $I_{ш}$, приложенного к ней напряжения $U_{н}$ и температуры радиатора регулирующего элемента T .

Структурная схема собственно блока управления показана на рисунке 3.

Измерение температуры необходимо для контроля работы регулирующего элемента ЭН, на котором будет рассеиваться значительная мощность при приложении к нагрузке предельных значений токов и напряжений. Конечно, эту мощность можно было бы найти и расчетным путем, однако это бы заняло часть вычислительных ресурсов контроллера и, соответственно, уменьшило время реакции нагрузки на внешние возмущения. К тому же расчет позволяет лишь грубо оценить фактическую температуру, так как для точного расчета нужно знать условия охлаждения радиатора, конфигурацию и конструкцию корпуса, а также температуру окружающей среды. Для контроля температуры использовался NTC терморезистор B57045-K102-K, 1.0 кОм $\pm$ 10% фирмы EPC, включенный по мостовой схеме.

Данные с электронной нагрузки поступают на два аналого-цифровых преобразователя (АЦП) микроконтроллера. Первый АЦП измеряет только напряжение, пропорциональное протекающему через нагрузку току. Второй АЦП через мультиплексор поочередно измеряет напряжение, подаваемое на электронную нагрузку, и температуру радиа-

тора регулирующего элемента. Измерение температуры происходит с интервалом 5с и при напряжении, соответствующем $+75^{\circ}\text{C}$, срабатывает система защиты электронной нагрузки от перегрева регулирующего элемента.

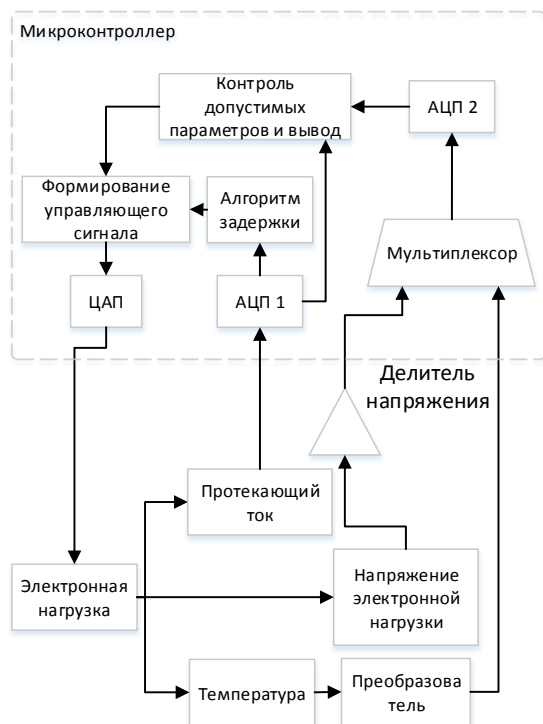


Рисунок 3 – Структурная схема управляющего модуля виртуализированной электронной нагрузки

После получения информации о токе и напряжении на регулирующем элементе рассчитывается задержка подачи управляющего сигнала и формируется сам управляющий сигнал, поступающий на ЭН. Как уже было отмечено, задержка используется лишь в тех случаях, когда требуется имитация замедленной реакции подключенной к источнику питания схемы на подаваемые на нее перепады напряжения. В основном же требуется максимальное быстродействие обратной связи, и, соответственно, быстрый алгоритм и быстрое вычислительное ядро микроконтроллера. Поскольку сигнал управления формируется не только на основании проходящего через нагрузку тока, но и по значению поданного на нагрузку напряжения, а также с учетом температуры радиатора, то при превышении этих параметров предельных значений система предупреждает пользователя о возникновении перегрузки и запирает регулирующий элемент.

Принципиальная электрическая схема собственно электронной нагрузки, способной поддерживать все перечисленные ранее режимы работы системы, приведена на рисунке 4. Главным ее отличием от приведенной на рисунке 1 схемы является применение незаземленного измерительного шунта и его перенос в цепь положительного полюса. С одной стороны, такое решение требует применения повышенных напряжений питания из-за высоких уровней синфазных сигналов, а также применения операционного усилителя с высокой степенью подавления синфазных помех. С другой стороны, такое включение позволяет заземлить регулирующий элемент, что благоприятно сказывается на его управляющих свойствах и быстродействии. К тому же при этом исключается протекание через шунтирующий резистор емкостных и прочих паразитных емкостных токов, создаваемых скачками управляющего напряжения.

В качестве дифференциального усилителя, усиливающего падение напряжения на шунтирующем резисторе, пропорционального проходящему через нагрузку току, был использован прецизионный малошумящий инструментальный усилитель AD620 [3]. При правильно разведенной печатной плате данных усилитель позволяет измерять ток от 1 мА, при сопротивлении шунта всего 0.1 Ом.

В качестве регулирующего элемента электронной нагрузки был выбран полевой транзистор IRLZ34N [4], поскольку он имеет очень малое сопротивление открытого канала (0.035 Ом) и позволяет в импульсе коммутировать ток до 100А, что крайне важно при использовании ЭН в режиме имитации коротких замыканий. Кроме того, его максимально допустимый постоянный ток стока составляет 30А при напряжении сток – исток не менее 55 В, чего вполне достаточно для большинства практических применений. Поскольку, как видно из сток-затворных характеристик этого транзистора (рисунок 4) для его полного закрывания может потребоваться нулевое, или даже отрицательное напряжение на затворе, особенно при повышенных температурах, для управления таким транзистором потребовался операционный усилитель с биполярным несимметричным питанием, в качестве которого был использован операционный усилитель LM321MF [5]. Главными требованиями, предъявляемым к этому усилителю, являются высокое быстродействие, поскольку он входит в петлю обратной связи, а также высокая нагрузочная способность и нечувствительность к пиковым перегрузкам,

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

поскольку в процессе работы ему приходится постоянно перезаряжать емкость между за-

твором и истоком полевого транзистора.

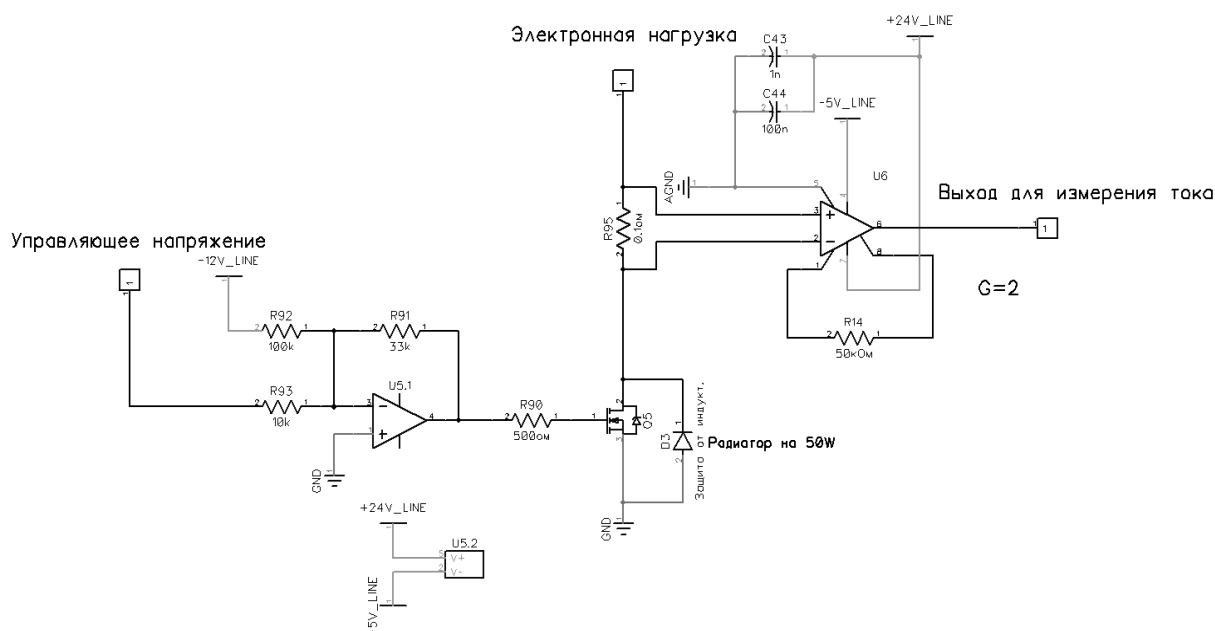


Рисунок 4 – Схема электронной нагрузки

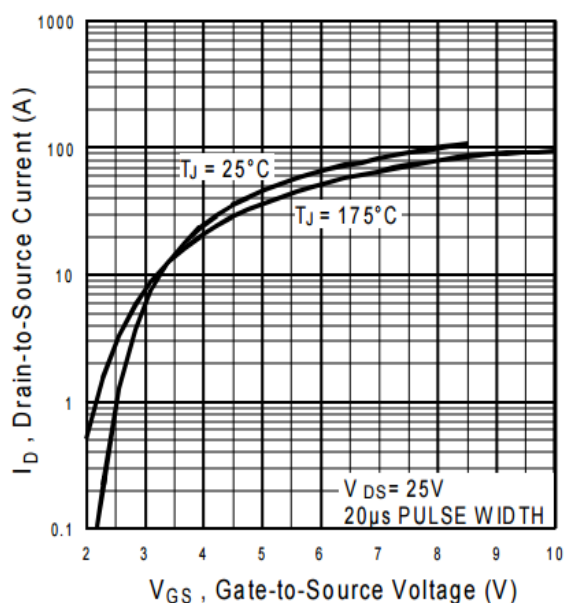


Рисунок 5 – График зависимости тока от напряжения на затворе полевого транзистора

Резисторы R91, R92 и R93 задают диапазон управляющего напряжения, подаваемого на затвор полевого транзистора. При номиналах, указанных на схеме, диапазон выходного напряжения составляет от 2.5 до 4 В. Резистор R95 выполняет функцию измерительного шунта, резистор R14 задает коэффициент усиления.

эффицент усиления для инструментального усилителя U6, резистор R90 ограничивает ток заряда затвора транзистора, а супрессор D3 служит для защиты ЭН от выбросов э.д.с. самоиндукции при наличии в исследуемой схеме индуктивных элементов.

Выводы

В результате проделанной работы была разработана схема электронной нагрузки с полностью цифровым управлением как через встроенный микроконтроллерный блок управления, так и через интерфейс размещенной в персональном компьютере программы виртуальной лаборатории. В ней предусмотрена программно-аппаратная защита от токовых перегрузок и повышенной температуры регулирующего элемента, а также аппаратная защита от выбросов напряжения источников питания, содержащих индуктивные элементы. Главной же особенностью разработанного устройства являются его широкие функциональные возможности по возможности имитации самых разных типов нагрузок и схем с изменяемой во времени величиной потребляемого тока или нагрузочного сопротивления.

В тоже время применение цифрового управления, а также выбранный тип регулирующего элемента и способа его управления ограничивают динамические свойства данного устройства, не позволяя его использовать

для исследования, например, усилителей звуковых частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нечаев И.И. Защита блока питания от КЗ. Журнал Радио, 1989, №7, С. 95.
2. Разработка программно-аппаратного комплекса для виртуальной лаборатории разработчика электронной аппаратуры [Электронный ресурс], – Режим доступа: http://new.elib.altstu.ru/diploma/download_vkr/id.
3. Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier [Электронный ресурс], – Режим доступа: [http://www.analog.com/media/en/technical-](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf)

[documentation/data-sheets/AD620.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf).

4. IRLZ34N, HEXFET Power MOSFET [Электронный ресурс], – Режим доступа: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irlz34n.pdf>.

5. LM321 Low Power Single Operational Amplifier [Электронный ресурс], – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/snos935c/snos935c.pdf>.

Моргунов Юрий Юрьевич – магистрант; Якунин Алексей Григорьевич - д.т.н., профессор, тел.: (3852) 29-07-18, e-mail: yakunin @agtu.secna.ru.