

Опасность последовательного включения электронных нагрузок

для увеличения напряжения

Боб Золло (Bob Zollo)

Многие современные электронные устройства, такие как полупроводниковые приборы на основе карбида кремния, системы преобразования постоянного напряжения, автомобильные подсистемы питания, работают при высоких напряжениях. Если устройство может выступать в роли источника напряжения, то для его тестирования необходима электронная нагрузка (ЭН). Но если напряжения достигают 400, 600 и даже 1000 В, сложно найти ЭН, рассчитанные на такие напряжения. Для решения этой проблемы может возникнуть мысль о последовательном их включении. Однако большинство представленных на рынке ЭН не поддерживает безопасного последовательного соединения. Рассмотрим данный вопрос подробнее.

Как работает электронная нагрузка?

Большинство ЭН может работать в режиме постоянного тока (ПТ) или постоянного напряжения (ПН). Некоторые ЭН предлагают режим постоянного сопротивления, постоянной мощности и даже постоянного импеданса, но все эти режимы являются производными режимами от базовых ПТ или ПН. Режим ПТ используется для нагрузки источников постоянного напряжения, таких как преобразователи. Режим ПН используется для нагрузки источников постоянного тока.

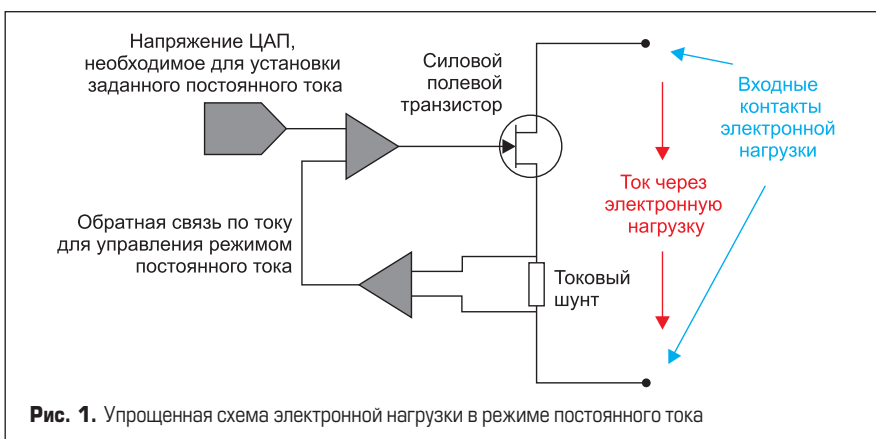


Рис. 1. Упрощенная схема электронной нагрузки в режиме постоянного тока

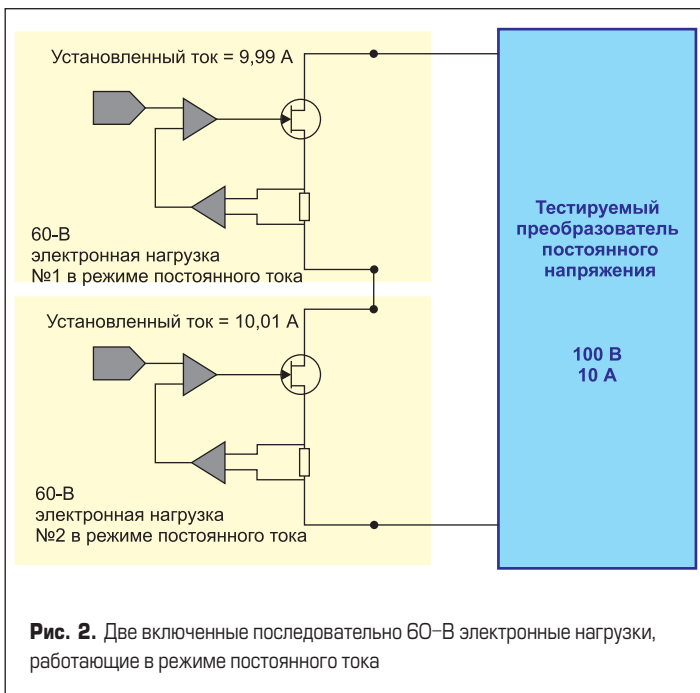
Если внимательно взглянуть на схему программируемой ЭН, работающей в режиме ПТ (рис. 1), то можно увидеть, что такая ЭН управляет протекающим через нее током, изменяя сопротивление $R_{си}$ полевого транзистора. Реальный ток измеряется с помощью резистивного датчика (токового шунта). Падение напряжения на шунте усиливается, сравнивается с напряжением ЦАП, используемым для настройки ЭН на нужный постоянный ток, и подается на затвор полевого транзистора для создания регулируемого постоянного тока. Если ток слишком велик, цепь обратной связи изменяет напряжение на затворе так, чтобы увеличить сопротивление $R_{си}$ и уменьшить протекающий ток. Если ток слишком мал, цепь обратной связи изменяет напряжение на затворе так, чтобы уменьшить сопротивление $R_{си}$ и увеличить протекающий ток. Если ЭН не способна потребить достаточный ток для достижения заданного значения, то цепь обратной связи полностью откроет полевой транзистор и установит $R_{си}$ на минимальное значение, фактически превратив полевой транзистор в перемычку. Максимальный ток описывается формулой:

$$I = V/R,$$

где V равно выходному напряжению преобразователя $V_{вых}$, а $R = R_{си_откр}$ полевого транзистора + $R_{шунта}$. При достижении этого предела ЭН выйдет из режима стабилизации постоянного тока, поскольку не сможет пропускать через себя запрограммированный ток, перейдя в нерегулируемый режим, близкий к короткому замыканию между входными контактами. Это близкое к короткому замыканию сопротивление равно минимальному сопротивлению ЭН и часто называется «минимальным сопротивлением» или «сопротивлением короткого замыкания».

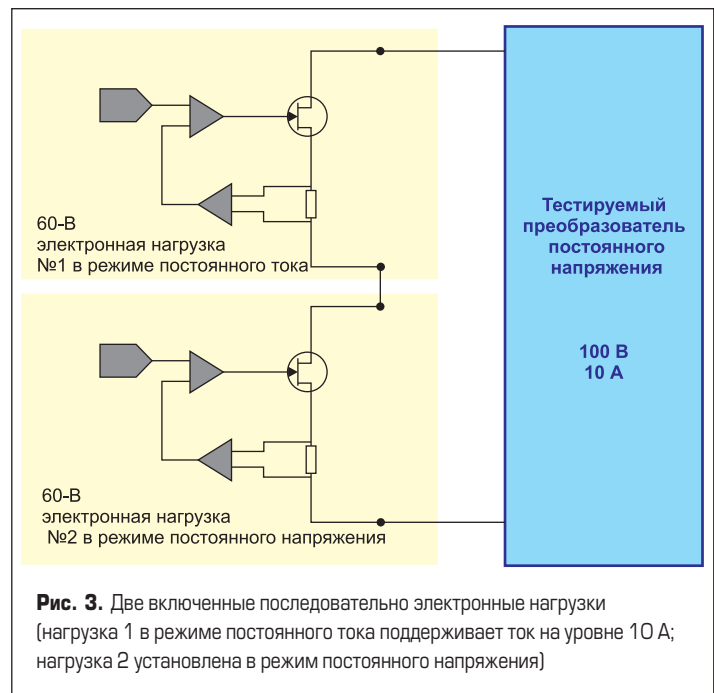
Последовательное включение электронных нагрузок

Каждая ЭН имеет максимальное входное напряжение, например 60 В. Если преобразователь постоянного напряжения имеет на выходе напряжение



100 В и ток 10 А, то возникает соблазн включить две 60-В ЭН последовательно, как показано на рис. 2. Каждую ЭН нужно настроить на ток 10 А, поскольку они включены последовательно, и через них будет протекать одинаковый ток. Однако в связи с погрешностью программирования, они никогда не будут настроены на совершенно одинаковые токи. В результате нагрузка 1 может настроиться на ток 9,99 А, а нагрузка 2 — на ток 10,01 А. Когда начнет протекать ток, нагрузка 1, настроенная на меньший ток, ограничит его до этого значения и успешно перейдет в режим стабилизации постоянного тока. В это время нагрузка 2, настроенная на больший ток, будет стараться потребить больше тока, снижая свое сопротивление $R_{сн}$, но не сможет достичь запрограммированных 10,01 А, поскольку нагрузка 1 ограничивает ток до 9,99 А. В результате нагрузка 2 перейдет в нерегулируемый режим, близкий к короткому замыканию. Поскольку это короткое замыкание, напряжение на нагрузке 2 станет близким к 0 В. Это значит, что все 100 В будут приложены к нагрузке 1. Такое чрезмерное напряжение вызовет отключение нагрузки 1 и может даже повредить ее входные цепи. Хотя в приведенном примере показаны две ЭН, описанная ситуация справедлива и для большего числа нагрузок.

Мы хотели показать, что невозможно использовать несколько последовательно включенных устройств, пытающихся управлять одним и тем же током. Возможно, вам придет мысль перевести одну нагрузку в режим постоянного тока, а остальные в режим постоянного напряжения, чтобы только одна нагрузка могла регулировать ток. Но в такой



ситуации проблема возникнет при намеренном отключении ЭН или при переходе одной из нагрузок в режим защиты и неожиданном ее отключении. Как только ток прервется, любая ЭН, находящаяся в режиме постоянного тока, перейдет в режим короткого замыкания (минимального возможного сопротивления), пытаясь пропустить через себя максимально возможный ток. Тем временем любая ЭН, находящаяся в режиме постоянного напряжения, перейдет в режим размыкания (максимального возможного сопротивления), пытаясь достичь запрограммированного падения напряжения на сопротивлении $R_{сн}$ полевого транзистора даже при отсутствии тока. Это приведет к тому, что высокое выходное напряжение преобразователя будет приложено к ЭН с максимальным сопротивлением в соответствии с получившимся делителем напряжения, образованным последовательно включенными ЭН (рис. 3).

Закключение

Опасно включать электронные нагрузки последовательно, если тестируемое устройство может подать большее напряжение, чем то, на которое рассчитана каждая ЭН, поскольку в нештатной ситуации все напряжение приложится к одной ЭН. Поэтому единственный безопасный способ последовательного включения ЭН заключается в применении нагрузок, рассчитанных на полное напряжение тестируемого устройства, но в этом случае нет смысла включать нагрузки последовательно.