

Особенности работы импульсных преобразователей с ШИМ-контроллером

в режиме перегрузки и короткого замыкания на выходе

Описаны способы защиты импульсных стабилизирующих преобразователей напряжения от перегрузок по току, улучшения потребительских характеристик и повышения их надежности.

Анатолий Миронов

В [1] подробно описаны особенности работы импульсных стабилизирующих преобразователей напряжения (ИСПН) с одно- и двухтактными ШИМ-контроллерами типа UC3842, UC3825 и их аналогами в качестве узлов регулирования в режиме малой нагрузки и холостого хода (ХХ), приведены схемы узлов ИСПН, позволяющие устранить нежелательные эффекты этих режимов для нагрузки. В статье рассмотрен другой, не менее важный режим работы ИСПН на основе указанных контроллеров — режим перегрузки по току и короткого замыкания (КЗ) на выходе.

Если режим ХХ задается параметрами нагрузки ИСПН, то режим перегрузки по току и КЗ реализуется не только нагрузкой, но каждый раз, например при запуске ИСПН, независимо от параметров нагрузки или при скачкообразном увеличении тока

нагрузки и практически определяет надежность преобразователя. ИСПН, спроектированный без учета перечисленных особенностей, может устойчиво работать в установившемся режиме, но мгновенно выйти из строя при включении.

Указанные контроллеры появились относительно давно, но продолжают пользоваться у разработчиков заслуженным вниманием и популярностью. Современные контроллеры (например, серии LM5000) отличаются от названных тем, что те же или похожие алгоритмы управления и защиты ИСПН реализуются с меньшим количеством навесных элементов.

Как и в [1], для определенности выбран класс ИСПН с широтно-импульсным принципом регулирования выходного напряжения, хотя рассмотренные способы реализации защиты от перегрузок можно распространить и на ИСПН, построенные на иных принципах стабилизации выходного напряжения.

Типовая схема ИСПН с управлением ШИМ-контроллером и организацией цепей защиты показана на рис. 1. Остальные цепи ИСПН условно не показаны.

Во время включения ИСПН контроллер К сначала не работает. Его потребление незначительно (0,1–1 мА). Ключ Кл закрыт. Через внешние цепи (на рис. 1 не показаны) заряжается конденсатор $C_{П}$. Когда его напряжение достигает напряжения включения $U_{ВКЛ}$, все узлы контроллера включаются, его потребление увеличивается до 5–40 мА, начинается периодическая работа ключа Кл. Во время работы контроллер К питается от дополнительной обмотки трансформатора или дросселя трансформаторно-выпрямительного узла ТВУ, напряжение которой выпрямляется диодом V1 и сглаживается конденсатором $C_{П}$. Частота работы контроллера определяется частото задающим конденсатором $C_{Ч}$. Каждый период работы контроллер с выхода OUT подает открывающее напряжение на затвор ключа Кл, который за-

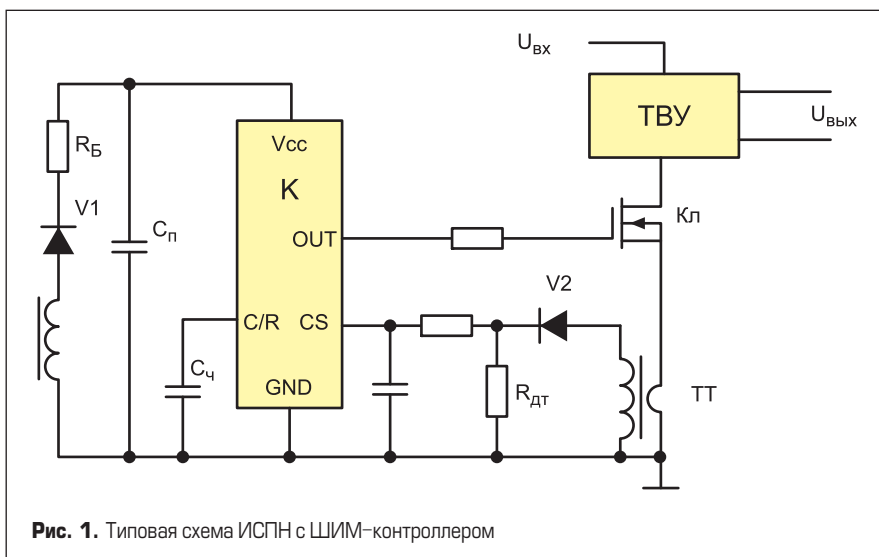


Рис. 1. Типовая схема ИСПН с ШИМ-контроллером

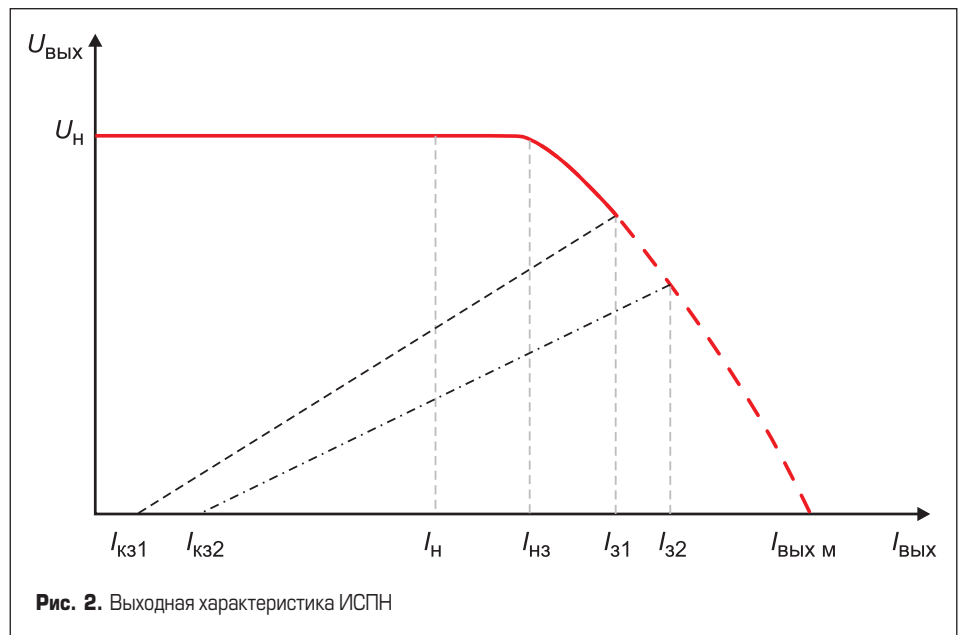
крывается либо по окончании управляющего импульса, либо по сигналу узла защиты контроллера. Ток через ключ Кл контролируется непосредственно на резисторе — датчике тока либо через трансформатор тока ТТ в ИСПН большой мощности.

На рис. 2 показана выходная характеристика ИСПН. Если выходной ток не превышает номинального значения I_H , ИСПН стабилизирует выходное напряжение (горизонтальный участок характеристики). С увеличением выходного тока сверх значения I_H ИСПН продолжает стабилизировать выходное напряжение до значения I_{H3} (запас), после чего переходит в режим защиты, ограничивая рост выходного тока и уменьшая выходное напряжение (спадающий вправо участок характеристики).

Для защиты ключа от перегрузок по току зачастую применяется двухступенчатый алгоритм защиты от перегрузок по току. Напряжение, пропорциональное мгновенному значению тока ключа Кл, выделяется на резисторе — датчике тока $R_{дт}$ и через помехоподавляющую RC-цепь подается на внешний вход CS компаратора тока. На другой вход компаратора (внутри контроллера) подано образцовое напряжение $U_{обр} = 0,5-1$ В в зависимости от типа контроллера. При увеличении тока через ключ Кл увеличивается и напряжение на резисторе $R_{дт}$. При достижении последнего максимального значения напряжения $U_{рдт} = U_{обр}$ компаратор тока принудительно закрывает ключ Кл до конца текущего периода работы. Так происходит каждый период работы контроллера К. Ключ Кл защищен. Выходная характеристика ИСПН переходит на наклонный участок (сплошная линия).

Так реализован алгоритм работы первой ступени защиты от перегрузок. Если напряжение питания контроллера будет в допуске, то с уменьшением сопротивления нагрузки выходное напряжение продолжит снижаться, а выходной ток — увеличиваться до значения $I_{вых м}$ (спадающий вправо участок характеристики, обозначенный пунктиром). Работа в таком режиме безопасна для ИСПН, однако при этом он не может выполнять свою основную функцию — стабилизировать выходное напряжение. И в этом смысле теперь его работа бесполезна.

Устранить этот нежелательный режим призвана вторая ступень защиты. Циклограмма работы ИСПН на этом этапе показана на рис. 3. Обычно питание контроллера К по схеме, показанной на рис. 1, осуществляется стабилизированным напряжением, пропорциональным выходному. С уменьшением сопротивления нагрузки рабочая точка продолжает движение по наклонному участку характеристики вправо вниз. Выходное напряжение контроллера К также уменьшается, а выходной ток продолжает увеличиваться. При значении выходного напряжения $U_{вых} = (0,7-0,8) \times U_{вых н}$ напряжение питания контроллера К уменьшается до значения $U_{выкл}$, а выходной ток увеличивается до значения $I_{з1}$, и контроллер выключается. Его потребление скачкообразно уменьшается до значений $0,1-1$ мА, и вновь начинается процесс запуска — напряжение на конденсаторе $C_{п}$ начинает увеличиваться до значения $U_{вкл}$, когда произойдет включение контроллера и запуск ИСПН (интер-



вал t_1-t_2). В этом режиме работы рабочая точка скачкообразно «скатывается» по характеристике влево вниз (пунктирная линия). ИСПН переходит в режим работы «включение-выключение» с частотой 10–30 Гц, а среднее значение выходного тока уменьшается многократно до значения $I_{кз1}$. Включаясь каждый раз, преобразователь как бы проверяет, не устранена ли перегрузка. При КЗ на выходе ИСПН для выходного тока справедливо соотношение:

$$I_{кз1} = I_{вых м} \times (t_3 - t_2) / (t_3 - t_1). \quad (1)$$

Специфика схемы питания контроллера (рис. 1) состоит в том, что качество переменного напряжения на обмотке зависит от коэффициента трансформации силового дросселя ТВУ, величины входного и выходного напряжений ИСПН. Чем больше мощность ИСПН и чем меньше его выходное напряжение, тем больше выброс на фронте и спаде напряжения на обмотке, вырабатывающей напряжение питания контроллера К. По этой причине напряжение на конденсаторе $C_{п}$ формируется

в том числе и амплитудой выброса, которая имеет максимальное значение при КЗ. Для устранения влияния выбросов напряжения на обмотки питания контроллера К в схеме рис. 1 предусмотрен балластный резистор R_B . Постоянная времени $R_B C_{п}$ выбирается порядка 100–200 нс, чтобы задемпфировать только выброс напряжения в момент заряда конденсатора $C_{п}$, не изменяя его установившегося значения. Однако с увеличением амплитуды и длительности выброса приходится увеличивать сопротивление резистора, напряжение на конденсаторе $C_{п}$ уменьшается, и пропорциональность выходного напряжения и напряжения питания контроллера К нарушаются. Нередко бывает так, что при перегрузке выходное напряжение продолжает уменьшаться, а напряжение питания контроллера К остается неизменным и даже (вследствие большой амплитуды выброса) увеличивается. Поэтому значение выходного тока срабатывания второй ступени защиты I_3 меняется, увеличиваясь, например, с $I_{з1}$ до $I_{з2}$, как показано на рис. 2. Следом увеличивается и среднее значение выходного тока с $I_{кз1}$

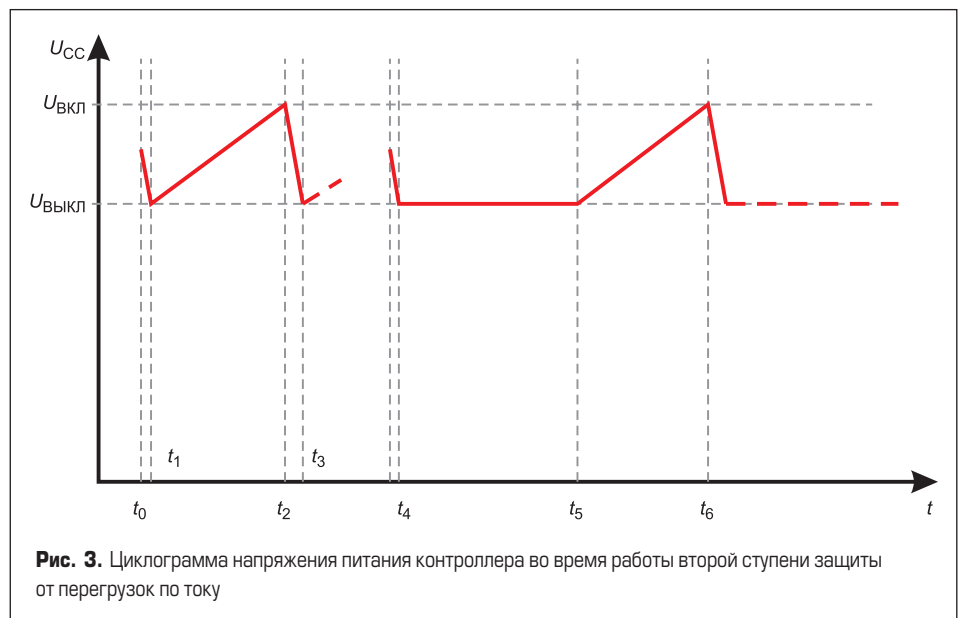


Рис. 3. Циклограмма напряжения питания контроллера во время работы второй ступени защиты от перегрузок по току

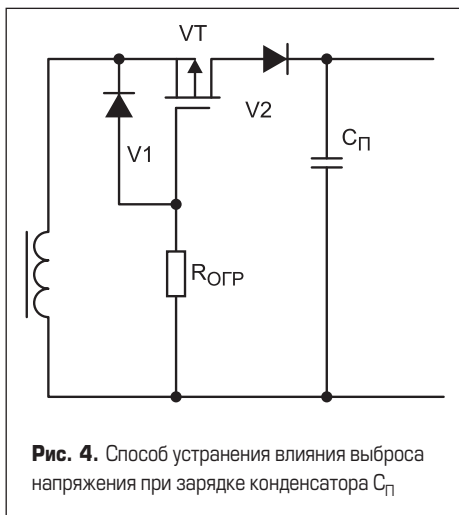


Рис. 4. Способ устранения влияния выброса напряжения при зарядке конденсатора C_{Π}

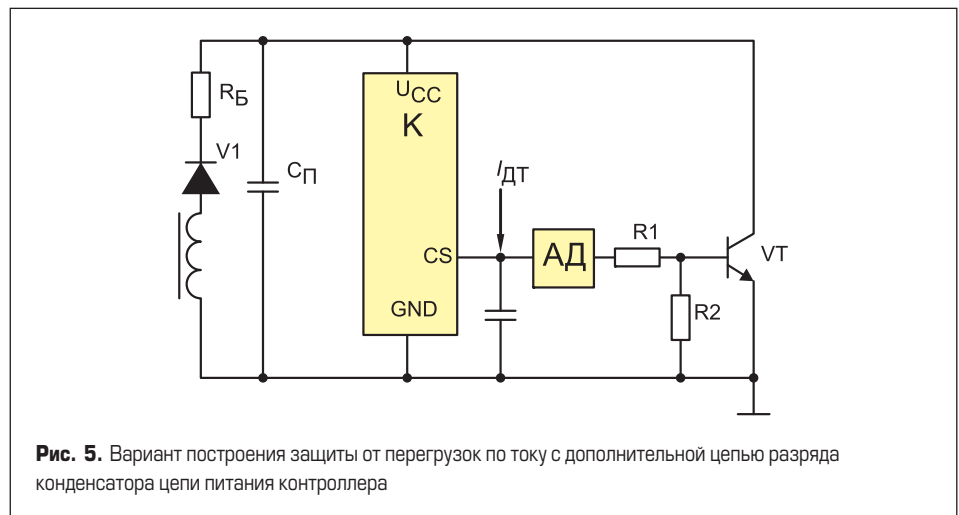


Рис. 5. Вариант построения защиты от перегрузок по току с дополнительной цепью разряда конденсатора цепи питания контроллера

до I_{K32} , а за этим — и входного тока в такой же пропорции, что часто неприемлемо. Один из возможных способов устранения этого нежелательного эффекта показан на рис. 4.

Здесь между обмоткой и диодом в схеме питания контроллера К по рис. 1 включен p -канальный транзистор VT. При появлении на обмотке положительной полуволны напряжения с выбросом зарядка конденсатора C_{Π} в первый момент заблокирована, поскольку транзистор закрыт. Его затворная емкость при этом заряжается через ограничительный резистор $R_{огр}$, реализуя задержку открывания. Номинал резистора выбирают таким, чтобы открывание транзистора произошло после окончания действия выброса напряжения. Балластный резистор $R_{Б}$ здесь не нужен. Его заменяет сопротивление открытого канала транзистора VT. Поскольку потребление контроллера составляет единицы-десятки миллиампер, транзистор VT — маломощный. При отрицательной полуволне напряжения на обмотке затвор транзистора защищен от пробоя диодом V1, а протекание разрядного тока конденсатора C_{Π} блокирует диод V2.

Уменьшить дрейф значения I_{K3} также можно, изменив схему построения узла защиты, как показано на рис. 5. Здесь изображены только цепи и элементы, важные для работы узла защиты.

С входа компаратора тока CS контроллера сигнал дополнительно подается на амплитуд-

ный детектор АД, на выходе которого формируется постоянное напряжение, равное амплитуде его входного сигнала в рассматриваемый период работы ИСПН. Часть его через делитель напряжения на резисторах R1 и R2 подается на базу транзистора VT. Делитель напряжения настраивается так, чтобы при достижении током нагрузки значения I_{H3} (начало работы I первой ступени защиты) транзистор VT также начинал открываться. При этом появляется дополнительная цепь разряда конденсатора C_{Π} во время перегрузки и крутизна спадающего участка выходной характеристики увеличивается, а дрейф значений I_{31} , I_{32} и, соответственно, I_{K31} , I_{K32} — уменьшается. Параметры ИСПН во время перегрузки более стабильны, чем в преобразователе по схеме рис. 1.

Еще одна особенность рассматриваемого способа защиты заключается в том, что с увеличением температуры окружающей среды уменьшается напряжение «база-эмиттер» открывания транзистора VT, что автоматически влечет за собой уменьшение тока срабатывания защиты I_{H3} . Этот эффект можно рассматривать как дополнительную защиту преобразователя от перегрева, которая «дается даром».

Еще один способ защиты от перегрузок по току описан в [2]. Схема его построения похожа на вариант на рис. 5 с той разницей, что коллектор транзистора VT подключен через допол-

нительный конденсатор $C_{доп}$ к конденсатору задания частоты преобразования $C_{ч}$ (рис. 6). Здесь при достижении выходным током значения I_{H3} транзистор VT, открываясь, подключает к частото задающему $C_{ч}$ дополнительный конденсатор $C_{доп}$, что приводит к уменьшению частоты преобразования ИСПН. В [2] показано, что такое построение позволяет практически стабилизировать значение тока I_{H3} независимо от степени перегрузки, то есть сделать спадающий участок выходной характеристики практически вертикальным. Особое значение этот эффект имеет, когда ИСПН используется в режиме зарядного устройства. Рассмотренному ИСПН также присуще свойство защиты от перегрева.

В [3] описан оригинальный способ питания контроллера выходным напряжением от регулируемого конвертера НК (рис. 7). При этом сам конвертер питается от выходного напряжения ИСПН. Таким образом, выходное напряжение конвертера строго пропорционально выходному напряжению ИСПН. Этот способ построения узла защиты можно рекомендовать для ИСПН повышенной мощности, поскольку у таких ИСПН при перегрузке нарушается пропорциональность выходного напряжения и напряжения питания контроллера, построенного по схеме рис. 1. Поскольку контроллер К потребляет небольшую мощность (0,2–0,5 Вт) независимо от режима работы ИСПН, НК имеет малые размеры. Кроме того, он создает небольшую нагрузку, что устраняет необходимость устанавливать дополнительные резисторы на выходе ИСПН, обеспечивающие нормальную работу преобразователя на холостом ходу.

При таком построении узла защиты напряжение питания контроллера уже не зависит от особенностей ИСПН и степени перегрузки, а определяется исключительно уровнем напряжения на его выходе. При перегрузке выходное напряжение ИСПН уменьшается и последний также переходит в режим «включение/выключение» при стабильном значении тока I_3 . Среднее значение выходного тока при коротком замыкании I_{K3} также стабильно.

При продолжительной работе в режиме КЗ важно, чтобы ИСПН не перегревался. Для этого достаточно, например, установить при регулировке среднее значение потребляемого тока при КЗ на порядок меньше, чем при но-

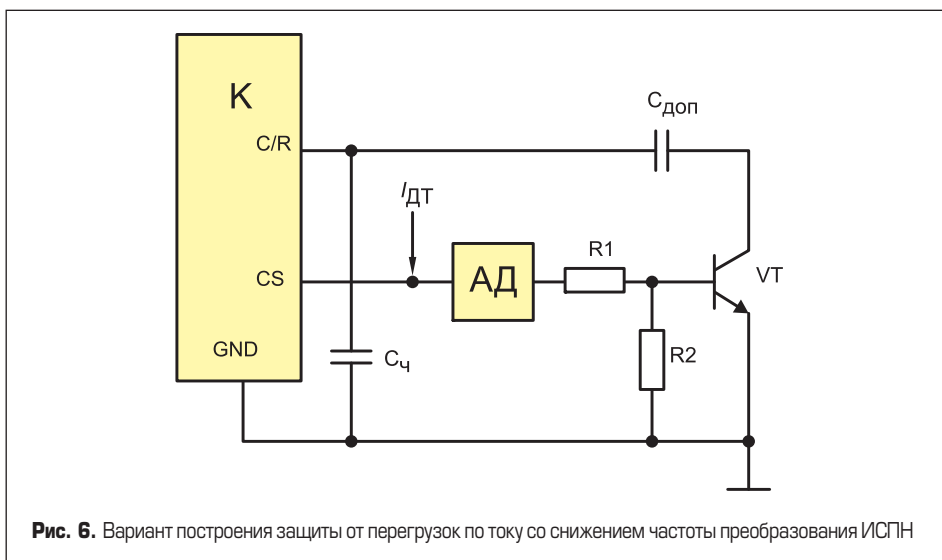


Рис. 6. Вариант построения защиты от перегрузок по току со снижением частоты преобразования ИСПН

минальном выходном токе. Один из способов реализует схема, показанная на рис. 8.

Напомню, что во всех режимах работы ИСПН амплитудное значение тока через ключ Кл ограничено (работа первой ступени защиты). Во время закрытого состояния ключа Кл каждый период на его стоке формируется выброс напряжения, который через диод V4 заряжает конденсатор C3, заодно ограничивая и амплитуду выброса. Разряжается этот конденсатор по цепи R2V2, удерживая во время штатной работы ИСПН транзистор VT в закрытом состоянии. Этот транзистор используется при запуске ИСПН, формируя необходимой величины ток, заряжающий конденсатор C_П.

Во время перегрузки выходное напряжение и напряжение питания контроллера К уменьшаются и начинается второй этап работы защиты — включение/выключение. Однако после выключения контроллера К зарядка конденсатора C_П начнется только после разряда конденсатора C3. Таким образом формируется задержка включения контроллера К (интервал времени t₄–t₅ на рис. 3), а выражение (1) для выходного тока при КЗ приобретает следующий вид:

$$I_{KЗ1} = I_{ВЫХ\ M} \times (t_3 - t_2) / [(t_3 - t_1) + (t_5 - t_4)]. \quad (2)$$

Очевидно, что значение тока I_{КЗ1}, рассчитанное по формуле (1), больше, чем рассчитанное по формуле (2). Выбирая величину емкости конденсатора C3, можно значительно уменьшить ток, потребляемый ИСПН при КЗ, и устранить его перегрев.

Литература

1. Миронов А. А. Особенности работы преобразователей с ШИМ-контроллером в режиме малой нагрузки и холостого хода // Практическая силовая электроника. 2017. № 1.
2. Миронов А. А. Устройство защиты импульсного преобразователя от перегрузок по току и коротких замыканий. Материалы заявки на патент № 2021128227/20(030901).
3. Миронов А. А. Конвертер напряжения. Патент на полезную модель № 35488, 2003.

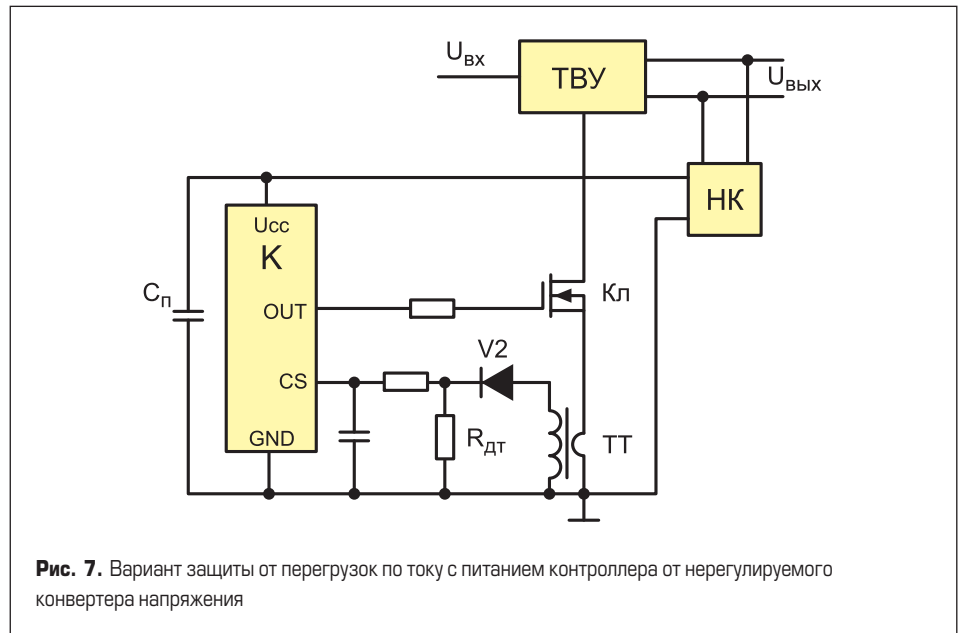


Рис. 7. Вариант защиты от перегрузок по току с питанием контроллера от нерегулируемого конвертера напряжения

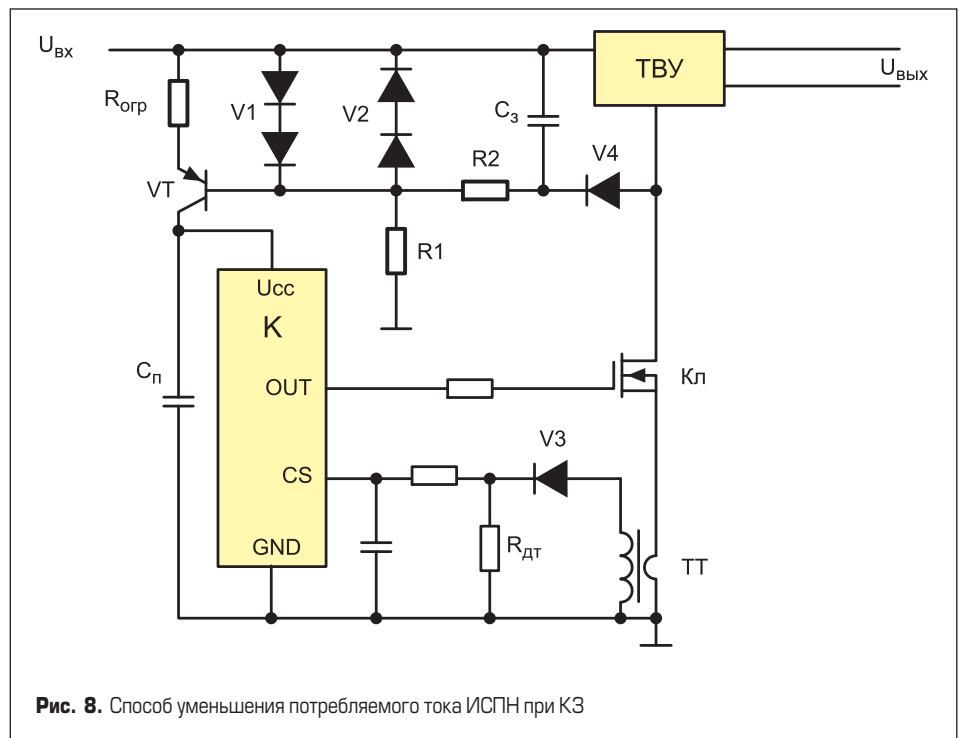


Рис. 8. Способ уменьшения потребляемого тока ИСПН при КЗ