Вспомогательный преобразователь на основе IGBT-модулей 65-го класса,

работающий от контактной сети 3 кВ

Во многих странах железные дороги получают напряжение контактной сети 3 кВ DC. В связи с этим особую актуальность приобретает такая тема, как применение среднечастотного трансформатора и модулей IGBT на 6,5 кВ для обеспечения необходимого уровня электроизоляции между сетью высокого напряжения и потребителями.
В статье рассматривается вспомогательный преобразователь с выходной мощностью около 100 кВт, выдерживающий воздействия со стороны сети и показывающий повышенную надежность при внутренних неисправностях, а также при улучшенных энергетических и эксплуатационных показателях.

Андрей Ганьшин

Валерий Мелешин

Семен Сачков

Дмитрий Жикленков

Введение

Все возрастающее количество оборудования на железнодорожном транспорте требует постоянного напряжения высокого качества для освещения, радиосвязи, систем кондиционирования, электронных тормозных систем и большой регулируемой мощности для индукционных двигателей. А потому сегодня как никогда необходимы более совершенные преобразователи, предназначенные для оснащения локомотивов и вагонов.

Напряжение контактной сети с номинальным значением 3 кВ DC (2,2–4 кВ) обычно преобразуется в 110 В для заряда АКБ, получения однофазного 230 В/50 Гц, трехфазного 380 В AC с фиксированной (50 Гц) или регулируемой частотой. Все вспомогательные преобразователи (ВП) для электровозов должны гарантировать электроизоляцию между контактной линией и потребителями, однако данное условие не является обязательным для некоторых нагрузок на тепловозах. Дискуссии по поводу более выгодных путей улучшения ВП с высоким входным напряжением продолжаются и сейчас. Многие участники обсуждения придерживаются мнения, что следует использовать среднечастотные трансформаторы (СЧТ) вместо тяжелых и объемных трансформаторов, работающих на 50 Гц. Но даже при применении СЧТ высоковольтные контактные линии предполагают тщательное и детальное рассмотрение выбранных структурных схем.

В [1] была предложена и развита идея построения системы питания железнодорожного вспомогательного оборудования. Основной принцип изначального построения заключался в использовании цепи одинаковых преобразовательных модулей при контактной линии до 5 кВ. В статье [2] приведено сравнение необходимого вспомогательного компонента — трансформатора, чей сердечник выполнен либо на нанокристаллическом железе, либо на феррите, и сделан вывод, что в широком диапазоне частот и индукций в первом случае потери сердечника в 2,5 раза меньше, чем во втором. Во множестве публикаций обсуждаются разные вопросы применения в ВП сравнительно недавно появившихся высоковольтных IGBT-модулей. В [3] предложена система питания, содержащая один СЧТ и 6,5-кВ IGBT-модули, работающие в режиме резонанса. В статье [4] рассмотрены вопросы, связанные с надежностью преобразователей большой мощности. В [5] представлены три топологии ВП при входном напряжении 3 кВ DC. Третье решение в этой статье основано на двух 6,5-кВ модулях IGBT, действующих в режиме широтно-импульсной модуляции. Анализ двух изолированных DC/DC-преобразователей для ВП, применяемых на железной дороге, функционирующих с переключением на нуле тока, представлен в [6]. В работе описаны преобразователи, подсоединенные к сети с номинальным напряжением 3 кВ DC. Вторая топология предусматривает трехуровневый повышающий преобразователь (ТПП) и вторую ступень, в которой ключи работают с мягким переключением. Последнее решение имеет существенные особенности:

- Конденсаторы повышающей ступени вместе с входным дросселем образуют резонансную цепь полумостового преобразователя, использующего переключение на нуле тока.
- Ключи полумостового преобразователя проводят резонансный ток только в течение 20% от половины периода переключения.

Данные особенности являются существенными недостатками второй топологии, препятствующими ее применению на практике.

В [7] предложен метод выбора желаемых компонентов (в основном три или четыре) для резонансных топологий. Необычное решение, сочетающее в одной конструкции тяговый и вспомогательный преобразователи, предложено в [8]. ВП при этом работает с трансформатором 50 Гц. В [9] поясняются особенности действия трехуровневого повышающего преобразователя.

На рис. 1 показан предложенный в данной статье ВП, работающий от входного номинального напряжения 3 кВ (диапазон 2,2–4 кВ), выходная мощность 100 кВт. Силовая часть содержит повышающую ступень (ТПП) и полумостовой резонансный DC/DC-преобразователь.

Отличие представленного варианта от показанных в [1, 6] заключается в том, что конденсаторы C1, C2 имеют большие емкости, а резонанс обеспечивается конденсатором C3. Для снижения амплитуды тока через ключ S3 (S4) состояние «Включено» каждого ключа продолжается почти всю половину полупериода переключения. Ключи S1, S2 класса 33 работают с жестким переключением на частоте 2 кГц, ключи S3, S4 (класса 65) — с переключением на нуле тока.

Нагрузкой схемы на рис. 1 являются два инвертора, каждый работает на асинхронный двигатель с регулированием U/f = const. Третий инвертор, через дополнительный преобразователь, обеспечивает напряжением электронное и ответственное оборудование на борту.

Инверторы получают входное напряжение 600 В от шины, подключенной к конденсатору C4. Решение, показанное на рис. 1, может натолкнуться на подводные камни, которые не позволят осуществить его на практике. Во-первых, должен быть тщательно исследован процесс запуска ВП. Это связано в основном с работой модулей 65-го класса, взаимодействующих с трансформатором и конденсатором большой емкости C4. Конденсатор C4 может быть полностью разряжен в начале процесса запуска. Во-вторых, необходимо разработать методику расчета потерь в модулях 6,5 кВ в режиме запуска. Запуск резонансного преобразователя выполняется в режиме жесткого переключения, поэтому потери в ключах могут быть значительными, что способно привести к их перегреву.

Наконец, особое внимание следует уделить построению защитных функций. Перенапряжение в контактном проводе и проходы через нейтральную вставку могут вызвать отказы ВП. Кроме того, необходимо учитывать возможные отказы в самом ВП — неисправность датчиков или элементов, через которые производится начальный заряд конденсаторов C1, C2 (на схеме рис. 1 не показаны).

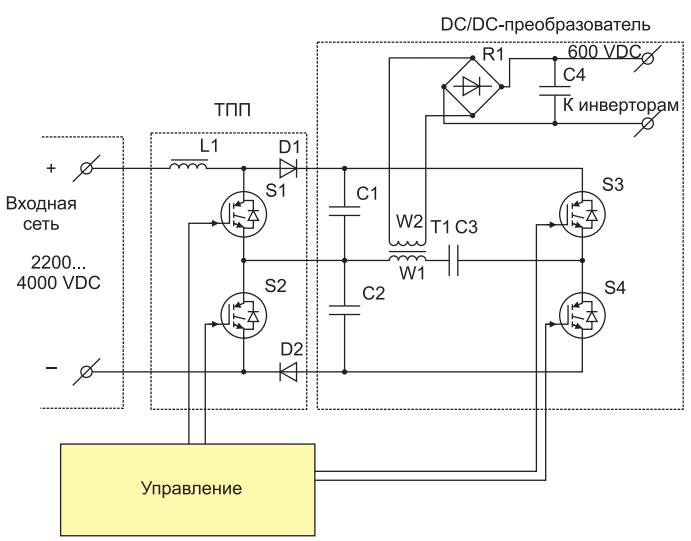

Рис. 1. Предлагаемая схема вспомогательного преобразователя с использованием IGBT-модулей 65-го класса

Особенности работы силовой части

Характеристики работы 1-й ступени (ТПП) при высокой частоте

В данном приложении ТПП имеет преимущества по сравнению с традиционным повышающим преобразователем, используемым в качестве первой ступени ВП, поскольку в этом случае напряжения на ключах S1, S2 и диодах D1, D2 вдвое меньше, чем в обычной схеме. В результате частота переключения ТПП может быть увеличена и соответственно уменьшены размеры дросселя L1. Для рассматриваемого случая в диапазоне напряжения 2,2–4 кВ DC и установленном выходном напряжении ТПП 4 кВ нет перекрытия ключей S1, S2.

Различие между напряжением на конденсаторах C1, C2 можно уменьшить или свести к нулю несколькими методами, которые здесь не рассматриваются. Из-за жесткого переключения S1, S2 выбор типа ключей и частоты их переключения должен быть тщательно обоснован.

Процесс запуска

Процесс запуска разрабатывался на основе особенностей фукционирования схемы на рис. 1. На этапе запуска выходные инверторы выключены. Запуск начинается с момента срабатывания электромеханического контактора, что обеспечивает подачу входного напряжения на силовую часть (контактор не показан на рис. 1). После того как конденсаторы зарядились через зарядный резистор (не показан на рис. 1), все ключи еще остаются выключенными, поэтому заряда конденсатора C4 не происходит.

В момент времени t_0 (рис. 2), после того как конденсаторы C1, C2 зарядились от входного напряжения, плавно расширяются импульсы, поступающие на затворы ключей S3, S4.

В момент времени t_1 после достижения на конденсаторе C4 уровня V_{01} управляющие отпирающие импульсы перестают поступать на затворы S3, S4.

В момент времени t_2 импульсы на затворы S3, S4 снова начинают поступать, расширяясь от нуля, одновременно поступают плавно расширяющиеся импульсы на затворы S1, S2. Скорость расширения импульсов обратно пропорциональна входному напряжению — это позволяет значительно уменьшить токи через ключи S1–S4. Когда напряжение V_0 достигает значения 0,9 от номинального (момент t_3), подключается цепь обратной связи, причем сигнал опорного напряжения плавно возрастает. В момент времени t_4 опорное напряжение и напряжение V_0 достигают своих номинальных значений. В этот момент отпирающие сигналы, приходящие на затворы ключей DC/DC-ступени, отключаются и затем, поскольку конденсатор C4 полностью заряжен, подаются на затворы с максимальной длительностью (рис. 2а).

Скорость плавного нарастания управляющих импульсов устанавливалась на основе анализа различных режимов работы и моделирования.

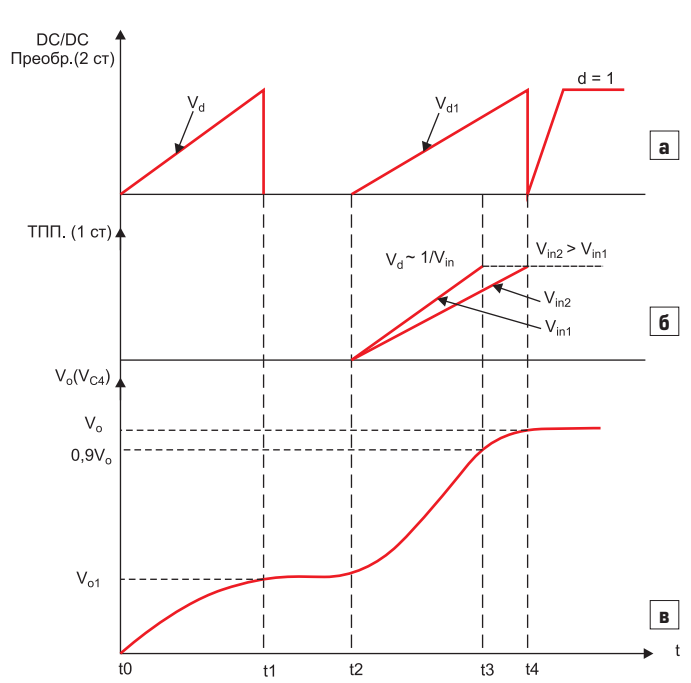

Рис. 2. Процесс запуска ВП

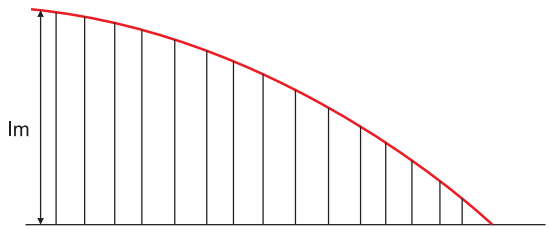

Рис. 3. Ток в ключе DC/DC-преобразователя в течение запуска

DC/DC-преобразователь (рис. 2а):

$$V_d = 0{,}021\ 1/\text{s для } V_{in} \le 3700\ \text{В};$$
$$V_d = 0{,}014\ 1/\text{s для } V_{in} > 3700\ \text{В};$$
$$V_{d1} = 0{,}0315\ 1/\text{s}.$$

ТПП (рис. 2б):

$$V_d = 1{,}823\times10^{13} \times V_{in}^{-4{,}192}\ 1/\text{s}.$$

Последняя формула справедлива для входных напряжений V_{in} = 2,2–4 кВ.

Оценка мощности, рассеиваемой при запуске в ключах DC/DC-преобразователя, и теплового режима в них

Процесс запуска является чрезвычайно важным этапом работы ВП и особенно ключей DC/DC-преобразователя (6,5-кВ модули IGBT). Если параметры процесса выбраны неправильно, модули DC/DC-преобразователя могут выйти из строя. Моделирование показывает, что наибольшие токи будут протекать через этот преобразователь, когда входные конденсаторы (C1, C2) заряжены через пусковой резистор, ключи ТПП еще не включены, а управляющие импульсы на ключи S3, S4 плавно расширяются. Кривые тока через ключ DC/DC при запуске (ключи ТПП еще не работают) показаны на рис. 3.

Для модуля CM200HG-130H (V_{CES} = 6500 В) энергия потерь при напряжении на ключе 4100–4300 В определяется из соотношения:

$$E_{off} = -2{,}107\text{e}-5\times I_{off}^2 + 1{,}001\text{e}-2\times I_{off}\ (1/\text{имп.}), \qquad (1)$$

где I_{off} — ток модуля при выключении.

Используя (1) и полагая ток на рис. 3 синусоидальным, а длительность показанного процесса 1/4 периода синусоиды, получим среднюю мощность:

$$P_{AV} = 0{,}01 I_m f_s (2{,}002 - 0{,}0033 I_m)/(\pi). \qquad (2)$$

Используя результаты моделирования для напряжения на ключах 4,1 кВ, имеем: I_m = 40 А. Для f_s = 4 кГц получим из (2) P_{AV} = 476,2 Вт.

Учитывая запас 20%, в результате имеем: $P_{AV} = 1{,}2 \times 476{,}2 = 571{,}4$ Вт.

Потери, вызванные разрядом емкости C_{OSS} при выключении, получим для $C_{OSS} = 2{,}5\times10^{-9}$ Ф, f_s = 4 кГц и напряжении на запертом модуле 4,1 кВ:

$$P_{CO} = C_{OSS} V^2 f_s/2 = 85\ \text{Вт}.$$

Общие потери за время запуска составляют:

$$P_{st\text{-}up} = 571{,}4 + 85 = 656{,}4\ \text{Вт}.$$

Теперь определим средний перегрев от радиатора к кристаллу, учитывая, что тепловое сопротивление модуля состоит из двух частей:

$$R_{T1} = 0{,}048\ \text{К/Вт}\ (j-c),\ R_{T2} = 0{,}012\ \text{К/Вт}\ (c-h);$$

(h — радиатор с учетом нанесенной пасты).

В результате получим:

$$\Delta T_{j\text{-}h} = P_{st\text{-}up} \times (R_{T1}+R_{T2}) = 39{,}4\ °\text{C}..$$

Учитывая, что максимально допустимая температура перехода составляет 125 °С, определим максимальную температуру радиатора:

$$T_{h\,\max} = 125 - 39{,}4 = 85{,}6\ °\text{C}.$$

ВП работает с подачей охлаждающего воздуха 40 °С, а вся поверхность радиатора достаточно большая. Поэтому температура 85,6 °С на радиаторе никогда не достигается, что и подтвердили результаты экспериментов.

Основные элементы защиты ВП

Для защиты от внешних недопустимых условий работы и возможных внутренних неисправностей в ВП введены дополнительные компоненты и применен специальный алгоритм управления. Модули ТПП и DC/DC-преобразователя могут быть уязвимы при воздействиях, вызванных перенапряжениями или провалами напряжения в контактной линии. Основными внутренними неисправностями, которые могут привести к повреждению высоковольтных модулей, являются следующие:

- неисправность датчика напряжения UV3, измеряющего напряжение на шине 600 В (вход инверторов);
- неисправность зарядного ключа или резистора.

Для реализации защитных и управляющих функций введены дополнительные компоненты:

- датчик входного напряжения (UV1);
- датчик, контролирующий ток в зарядном резисторе (UA2);
- компараторный датчик UV2, измеряющий напряжение на ключах DC/DC-преобразователя;
- датчик, измеряющий ток в диагонали преобразователя DC/DC (UA3);
- датчик входного тока (UA1);
- датчик напряжения на шине 600 В (UV3).

Схема силовой части ВП с дополнительными компонентами показана на рис. 4.

Прохождение нейтральной вставки

Прохождение через нейтральную вставку контактной линии характеризуется резким пропаданием напряжения на входе ВП, затем следует восстановление напряжения с произвольным значением. В этом интервале ВП должен продолжать работу. При полной нагрузке это возможно, если значительно увеличены емкости конденсаторов C1, C2, C4, а также индуктивность дросселя L1. Подобный вариант неприемлем вследствие возрастания размеров преобразователя и его стоимости.

Обоснованным решением возникающей проблемы является применение специального алгоритма управления. Основная идея алгоритма заключается в подстройке закона регулирования преобразователя на время прохождения нейтральной вставки и селективное отключение низкоприоритетной нагрузки с последующим ее ступенчатым подключением при восстановлении входного напряжения.

Перенапряжение в контактной линии, неисправность датчика UV3

Перед ключом S1 установлен варистор с пробивным напряжением 5,7 кВ (на схеме рис. 4 не показан). Второй варистор размещен параллельно ключам S2, S3 и имеет меньшее пробивное напряжение (он тоже не показан для упрощения рисунка). Оба варистора обеспечивают защиту от коротких перенапряжений в контактной линии. Возрастание напряжения на конденсаторах C1, C2 возможно в двух случаях:

- перенапряжение в контактной линии;
- неисправность выходного датчика напряжения UV3.

Рассмотрим оба случая.

Работа при перенапряжении в контактной сети

В течение действия перенапряжения возрастают напряжение и ток ключей S4, S5. Либо датчик напряжения UV1, либо более быстрый датчик UV2 вырабатывают сигнал об опасном напряжении на ключах. Подобным образом токовый датчик UA3 в диагонали DC/DC-преобразователя создает сигнал о превышении током порогового

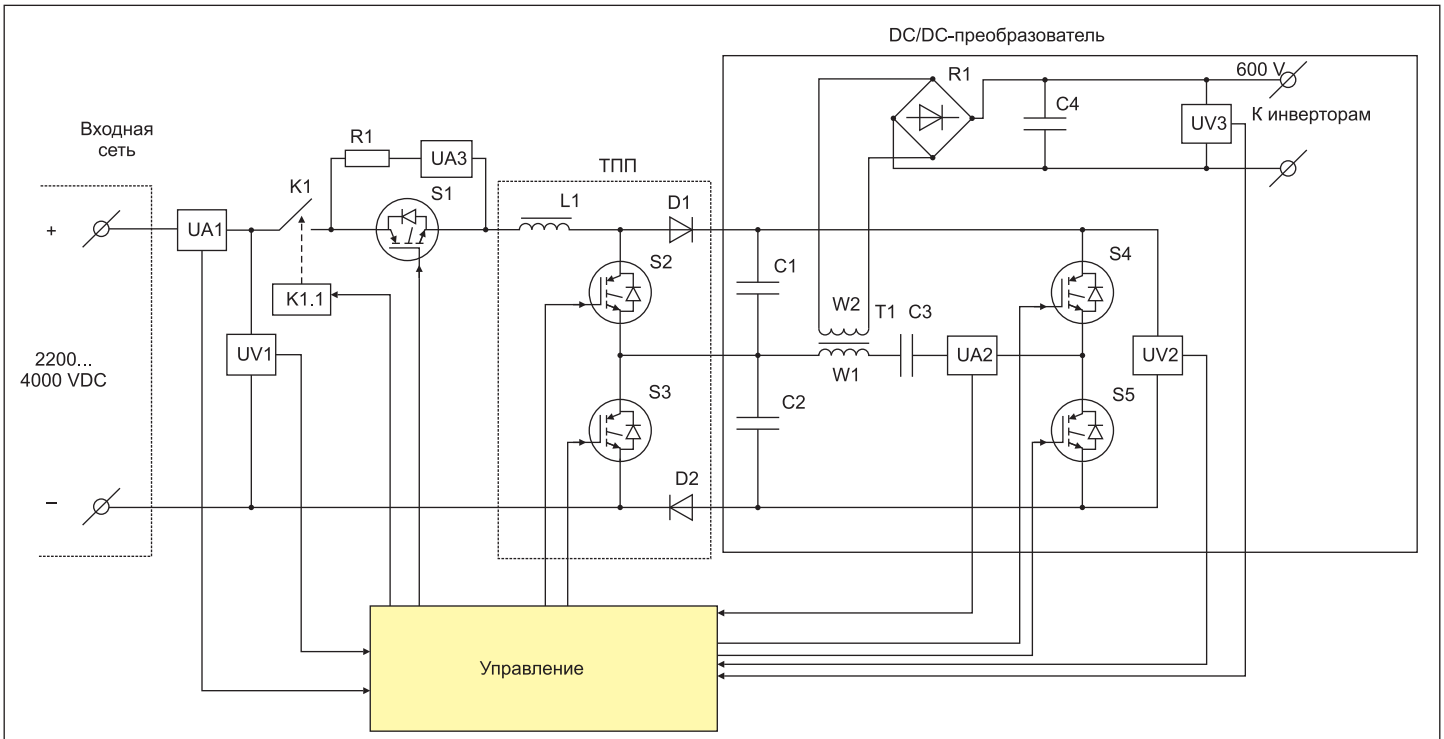

Рис. 4. Силовая часть ВП с дополнительными элементами защиты и управления

значения. Любой из перечисленных сигналов выключает все ключи (S1…S5) и снимает напряжение с обмотки главного контактора. Когда ключ S1 выключается, резистор R1 подключается к входной цепи ВП. Резистор ограничивает бросок напряжения, вызываемый прерыванием тока в дросселе L1. После задержки около 100 мс главный контактор отключает входное напряжение от ВП. Датчики и вышеописанный алгоритм защиты снижают уровень перенапряжения на ключах S4, S5 и препятствуют их работе в опасной области.

Неисправность датчика UV3

Неисправность этого датчика или контура обратной связи (внезапная или постепенная) представляет реальную опасность для ВП. Измерения выходного напряжения становятся недостоверными, и в таких случаях возможно следующее.

Если показание датчика UV3 (или сигнала обратной связи) становится ниже 400 В и это событие происходит быстро (например, обрыв датчика), ВП будет выключен защитой от понижения напряжения (UVP). Токи и напряжения в данном случае не возрастают до недопустимых значений.

Если датчик UV3 понижает измеряемое напряжение плавно, возрастающее напряжение на ключах S4, S5 достигнет порогового значения срабатывания компараторного датчика UV2, и далее срабатывает защита OVP, выключая ВП.

Если входное напряжение является низким, а все три инвертора работают при полной выходной мощности, неисправность датчика UV3 приведет к возрастанию тока в диагонали DC-преобразователя и входного тока ВП. Поэтому защита будет работать в соответствии с показаниями датчика UA2 или UA1. Эта защита сработает раньше, чем компараторный датчик UV2. Когда одна из названных защит срабатывает, алгоритм выключения ВП следующий:

- выключение S2…S5;
- выключение S1, и, как следствие, резистор R1 подключается к входу ВП;
- напряжение на обмотке главного контактора снимается через 500 мс, что необходимо для размыкания контактов, когда ток через них снизился до нуля.

Защита зарядного резистора

При работе ВП может возникнуть ситуация, когда происходит выключение S1 вследствие неисправности IGBT или его управления (драйвера или оптического кабеля). В этом случае подключается резистор R1. Если ток через R1 протекает длительное время, в нем рассеивается значительная мощность, которая выведет его из строя. После получения информации от датчика UA2 система управления выполняет расчет произведения I^2t, и после превышения заданного значения ВП отключается.

Моделирование

На рис. 5 показано выходное напряжение ВП во время запуска при входном напряжении 4 кВ. Кривая соответствует разработанному процессу запуска, показанному на рис. 2. Ток в диагонали DC/DC-преобразователя во время старта показан на рис. 6 (V_{in} = 4 кВ). Максимальное значение тока через ключ равно 40 А. Пауза в показанном процессе соответствует интервалу, когда все ключи выключены. После паузы импульсы напряжения на затворах расширяются как в ТПП, так и в DC/DC-преобразователе. На основе рис. 6 и 3 производится расчет потерь в ключе DC/DC за время запуска.

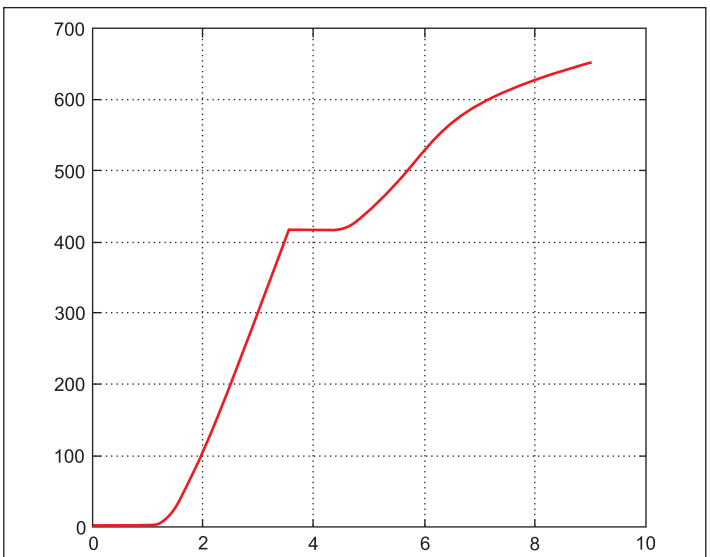

Рис. 5. Моделирование запуска ВП (выходное напряжение)

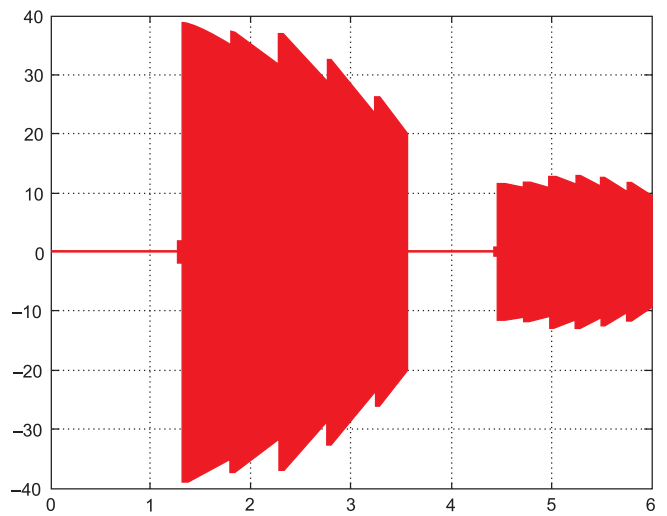

Рис. 6. Моделирование тока в диагонали DC/DC-преобразователя при запуске

Перенапряжение в контактной линии приводит к резкому подъему напряжения на входе ВП (рис. 7а), возрастает ток в диагонали DC/DC-преобразователя (рис. 7б), входной ток (рис. 7в) и напряжения на ключах S4, S5. Когда пороговое значение любого из датчиков превышено, система управления выключает все ключи ВП. Неисправность датчика UV3 также приводит к выключению всех ключей. На рис. 8а можно видеть, что в этом случае V_0 не возрастает, и после достижения порога защиты UVP напряжение V_0 снижается плавно, при этом конденсатор C4 разряжается. Ток в диагонали DC/DC (рис. 8б) и напряжения на конденсаторах C1, C2 снижаются до нуля после срабатывания защиты UVP.

Процессы, показывающие, что происходит при деградации датчика UV3 (медленное снижение показаний этого датчика), представлены на рис. 9. В момент времени 1 начинается изменение показаний, затем напряжение на конденсаторе C4 (рис. 9а), ток в диагонали (рис. 9б) и на выходе (рис. 9в) возрастают. В момент достижения напряжением на обоих конденсаторах C1, C2 значения 4700 В выключение

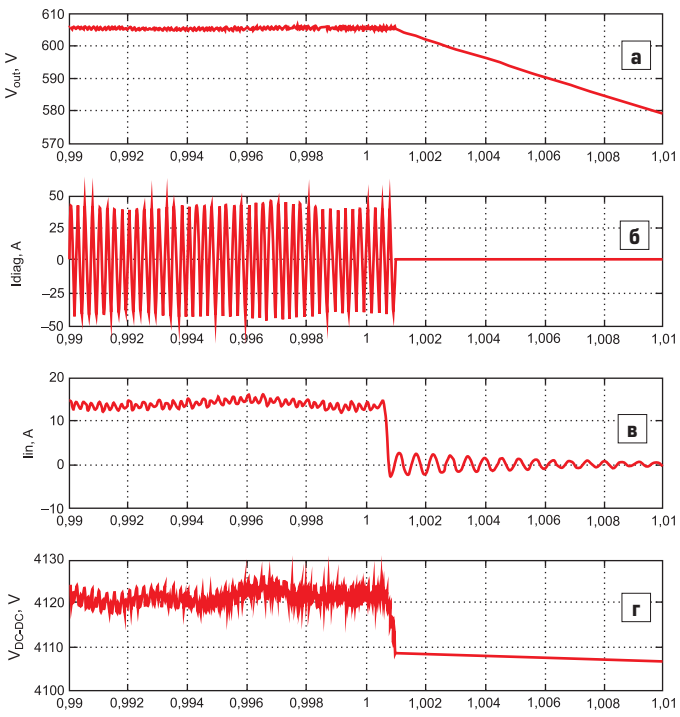

Рис. 8. Неисправность датчика UV3 и выключение ВП (действие защиты UVP)

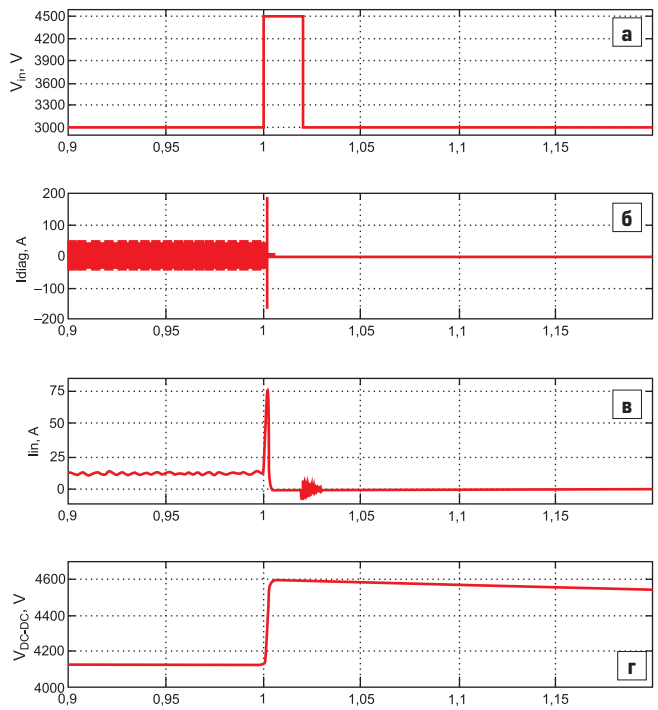

Рис. 7. Перенапряжение в контактной линии и процессы в силовой части

ВП происходит по сигналу превышения (OVP). При низком входном напряжении и работе всех инверторов на полную выходную мощность деградация датчика UV3 (рис. 10) приводит к возрастанию токов в диагонали (рис. 10б) и на входе (рис. 10в). Эти токи нарастают быстро, и один из токовых датчиков (UA1 или UA2) выдает сигнал отключения ВП.

Эксперименты

Прохождение нейтральной вставки контактной линии, когда входное напряжение ВП пропадает на короткое время (50 мс), показано

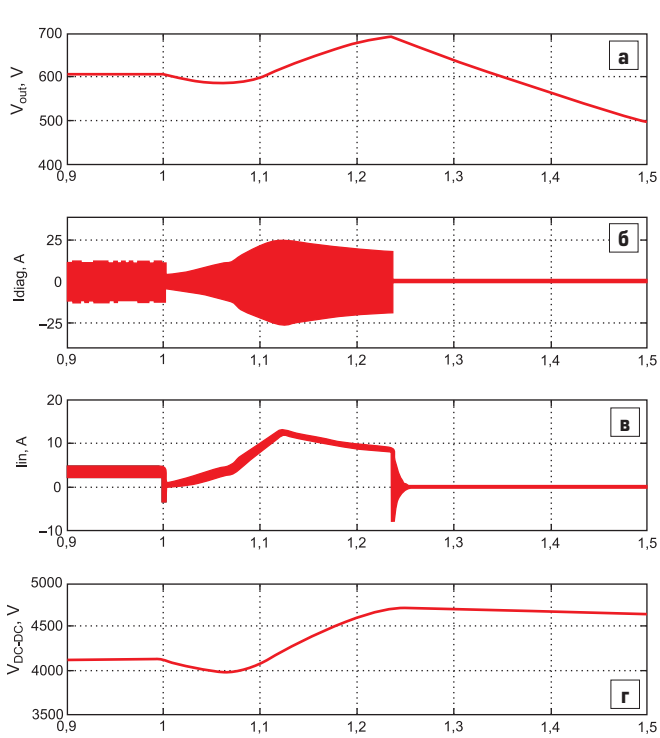

Рис. 9. Результат действия OVP при деградации датчика UV3

на рис. 11. Восстановление напряжения на шине 600 В занимает 2 с, высокоприоритетные нагрузки продолжают работать, поскольку инвертор I не выключается.

Низкоприоритетные нагрузки выключаются за 2 с, после этого начинается повторный запуск инверторов II и III. Процесс прохождения нейтральной вставки при полной нагрузке инверторов и большой длительности пропадания входного напряжения (125 мс) показан на рис. 12. Напряжение V_0 теперь быстро снижается до 400 В, в этом случае ВП выключается, входное напряжение появляется вновь, начинается полный цикл повторного запуска.

Неисправность датчика UV3 и результат срабатывания защиты UVP показаны на рис. 13. Работа OVP при деградации UV3 представлена на рис. 14. Выходное напряжение и напряжение на конденсаторах C1, C2 поднимаются быстро. Защита OVP приводит к выключению ВП, когда суммарное напряжение на конденсаторах C1, C2 достигает порогового значения 4700 В. Процесс деградации датчика UV3 при

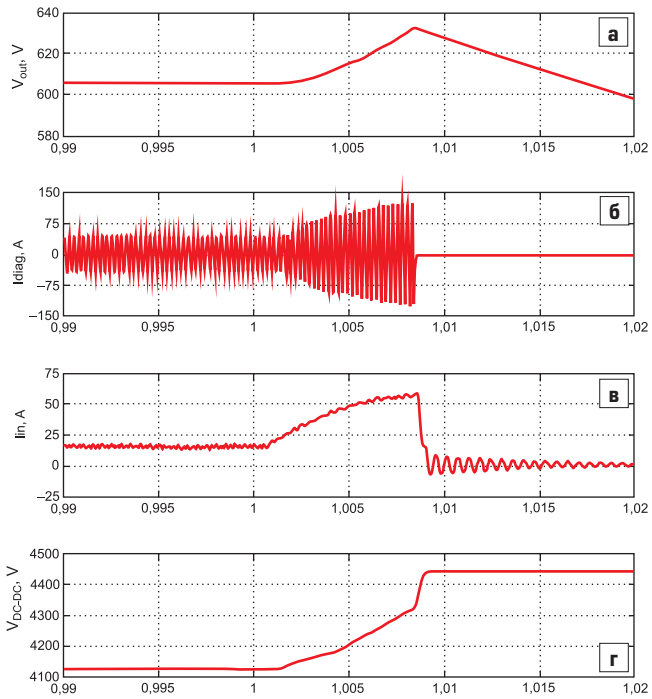

Рис. 10. Действие защиты по току при деградации датчика UV3 (низкое входное напряжение и полная выходная мощность)

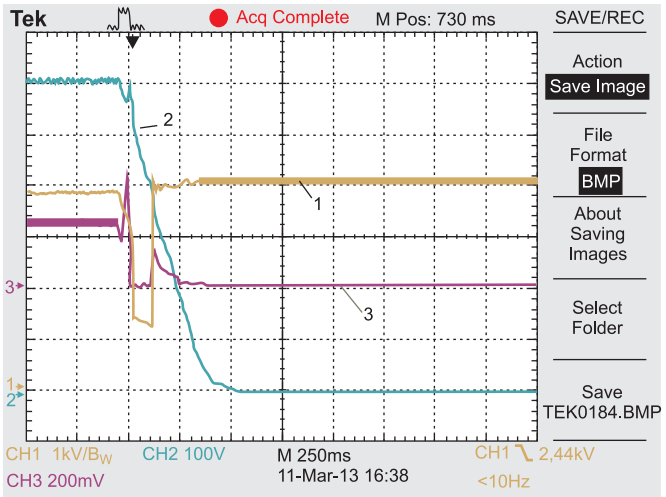

Рис. 12. Проход нейтральной вставки при провале входного напряжения на 125 мс (1 — входное напряжение ,1 кВ/дел; 2 — выходное напряжение, 100 В/дел; 3 — входной ток, 20 А/дел)

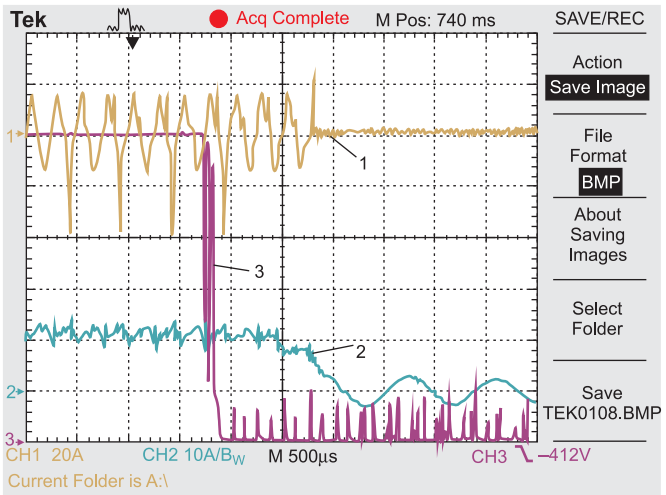

Рис. 13. Неисправность датчика UV3 и действие защиты UVP (1 — ток в диагонали, 20 А/дел; 2 — входной ток, 10 А/дел; 3 — выходной сигнал датчика UV3)

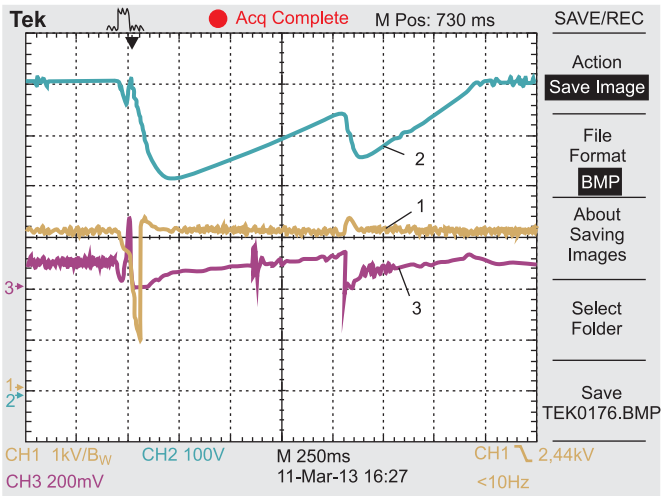

Рис. 11. Проход нейтральной вставки при провале входного напряжения на 50 мс (1 — входное напряжение, 1 кВ/дел; 2 — выходное напряжение 100 В/дел; 3 — входной ток, 20 А/дел)

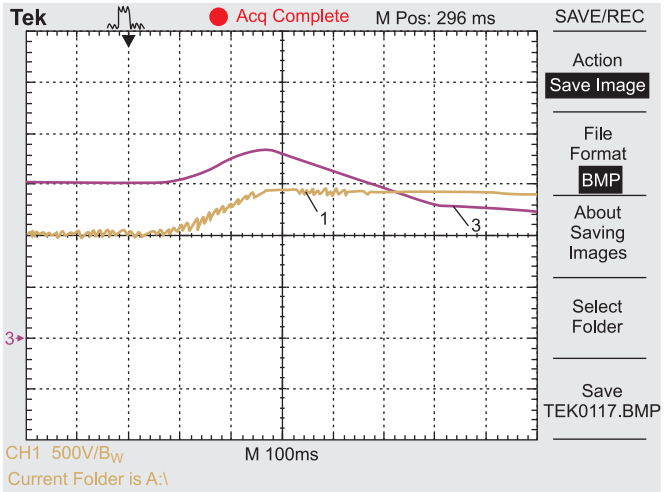

Рис. 14. Действие защиты OVP при деградации датчика UV3 (1 — напряжение на конденсаторе C1, 500 В/дел; 3 — выходное напряжение, 200 В/дел)

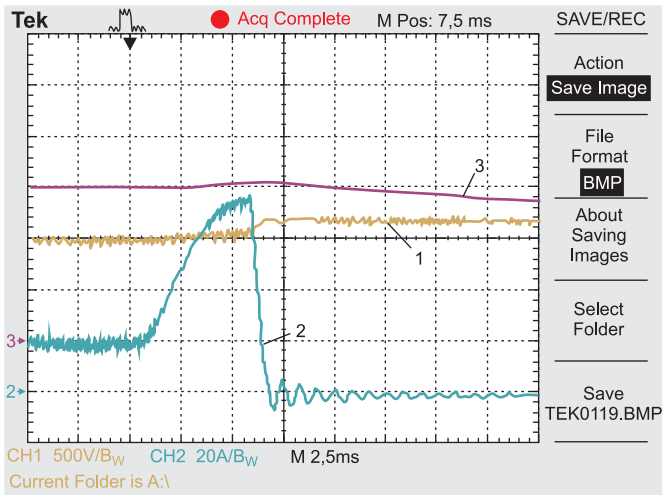

Рис. 15. Действие защиты от превышения тока при деградации датчика UV3: низкое входное напряжение и полная выходная мощность (1 — напряжение на конденсаторе C1, 500 В/дел; 2 — входной ток, 20 А/дел; 3 — выходное напряжение, 200 В/дел)

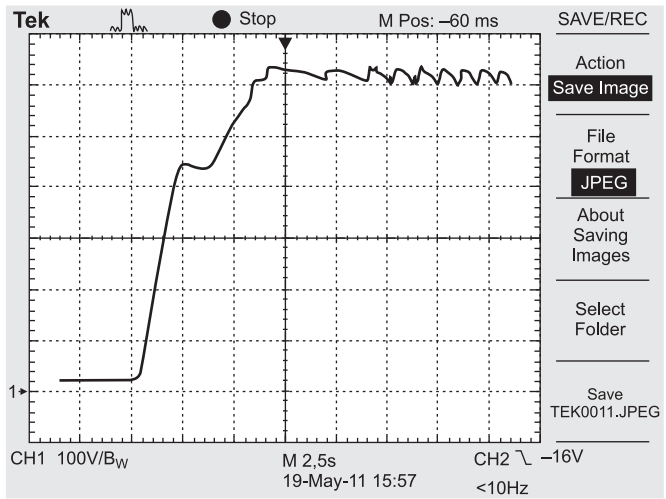

Рис. 16. Выходное напряжение при запуске

низком входном напряжении и полной выходной мощности показан на рис. 15.

Процесс запуска, подробно описанный в разделе «Особенности работы силовой части», демонстрирует рис. 16 (холостой ход, входное напряжение 4 кВ).

Выводы

Предлагаемая структура вспомогательного преобразователя, предназначенного для высоковольтного применения на железной дороге, согласуется с предъявляемым требованием высокой надежности и позволила уменьшить массу конструкции. Показана методика расчета потерь в модулях IGBT 6,5 кВ при запуске с учетом зависимости энергии выключения от тока в модуле. Разработаны алгоритмы управления для исключения выхода из строя ВП от действия внешних воздействий и внутренних неисправностях. В статье показаны результаты моделирования и проведенных экспериментов.

Литература

1. J. Weber, A. Berger and A. Falk, "Galvanic separated high frequency power converter for auxiliary railway supply", EPE 2003, Toulouse, France.
2. H. Chazal, J. Roudet, T. Waeckerle : "Comparative Study of nanocrystalline and soft-ferrite transformer using an optimization procedure", EPE 2003, Toulouse, France.
3. B. Engel, M.Victor, G. Bchmann, A. Falk, "15kV/16.7 Hz Energy Supply System with Medium Frequency Transformer and 6.5 kV IGBT in Resonant Operation", in Proc. EPE 2003, Toulouse, France.
4. G. Chen, R. Burgos, Z. Liang, F. Lacaux, F. Wang, J. D. van Wyk, W. G. Odendaal, and D. Boroyevich, "Reliability-Oriented Design Considerations for High-Power Converter Modules", IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
5. D. Vinnnikov, J. Laugis and T. Jalakas, "Development of Auxiliary Power Supplies for the 3.0 kV DC Rolling Stock", in Prc. ISIE 2007, Vigo, Spain.
6. O. Deblecker, A. Moretti, F. Vallee, "Comparative Analysis of Two Zero-Current Switching Isolated DC-DC Converters for Auxiliary Railway Supply", SPEEDAM 2008.
7. Daocheng Huang, Fred. C. Lee, Dianbo Fu, "Classification and Selection Methodology for Multi-element Resonant Converters", APEC 2011.
8. M. Macan1, N. Težak2, "Integrated Traction and Auxiliary Power Supply Converters for Diesel-Electric Rail Vehicles", EPE-PEMC 2012 ESSE Europe, Novi Sad, Serbia.
9. V.I. Meleshin, D.V. Zhiklenkov, A.A. Ganshin "Efficient Three-Level Boost Converter for Various Applications", EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, Novi Sad, Serbia.