

Блок регулирования напряжения для автономной системы электроснабжения пассажирских вагонов поездов дальнего следования

Long Haul Railroad Passenger Car Stand-Alone Power Supply System Static Converter

Анучин Алексей Сергеевич
Силаев Федор Анатольевич

Аннотация

В статье рассмотрены принципы построения современной системы автономного электроснабжения пассажирских вагонов дальнего следования с блоком регулирования напряжения. Дается краткое описание алгоритмов системы управления. Детально рассмотрен синтез и построение системы двухконтурного регулирования мощного DCDC-преобразователя. Приведены осциллограммы работы устройства.

Ключевые слова: автономное электроснабжение, аккумуляторная батарея, железнодорожный транспорт, ток возбуждения, транзистор, CANopen, DCDC-преобразователь.

Abstract – design considerations for a modern long haul railroad passenger car stand-alone power supply system with a static converter. Control system methods are discussed briefly. Synthesis and design issues for a power DCDC converter 2 loop control system are examined in detail. Experimental results are given.

Index terms – battery, CANopen, DCDC converter, exciting current, rail transport, stand-alone power supply system, transistor.

Введение

Основным типом системы электроснабжения пассажирских вагонов дальнего следования в нашей стране стала смешенная система, в которой питание осуществляется от подвагонного генератора и межвагонной высоковольтной магистрали. Из-за наличия в России огромной длины неэлектрифицированных железных дорог и отсутствия тепловозов, имеющих возможность выдать необходимое высокое напряжение в поездную сеть, высоко-

вольтная магистраль используется только для питания комбинированной системы отопления. Все остальные потребители, такие как освещение, кондиционер, кипятильник, низковольтное отопление и циркуляционный насос, вентиляция и т.д. питаются нестабилизированным напряжением постоянного тока в диапазоне от 104 до 142 В, полученным с выпрямителя от подвагонного генератора.

Наиболее распространенная система электроснабжения купейных вагонов и вагонов повышенной комфортности содержит индукторный генератор мощностью 32 кВт, приводимый в движение от колесной пары через редуктор, карданный вал и эластичную муфту, выпрямитель, к которому подключена нагрузка и аккумулятор, и возбудитель. Регулирование выходного напряжения осуществляется по обмотке возбуждения. Данное устройство выпускается фирмой ООО НПЦ «Экспресс» (г. Тверь).

Применяемая схема имеет ряд недостатков, так питание нагрузки осуществляется, только начиная со скорости около 35 км/ч. На более низких скоростях ЭДС генератора оказывается ниже напряжения аккумуляторной батареи, что не позволяет производить ее заряд и питать от генератора нагрузку. Отмечаются эпизодические выходы из строя возбудителя, при которых напряжение генератора на высоких скоростях неконтролируемо растет. Аккумуляторные батареи являются естественным демпфером системы регулирования напряжения, что негативно сказывается на сроке их службы.

Данные недостатки были учтены в блоке регулирования напряжения (БРН), разработанном совместно ООО НПП «Цикл+», ООО «НПФ Вектор» и ДООО «ИРЗТЭК», входящей в состав «Ижевского радиозавода», по заказу ООО «АВП Технология». Преобразователь поставляется вместе с комплектом электрооборудования вагона «КВИНТ-ЭВ», хотя может работать и как самостоятельное изделие.

Устройство и общие принципы работы блока регулирования напряжения

Помимо возбуждателя и выпрямителя БРН-32 содержит транзисторный статический преобразователь напряжения. Схема электроснабжения вагона на базе БРН-32 представлена на рис. 1.

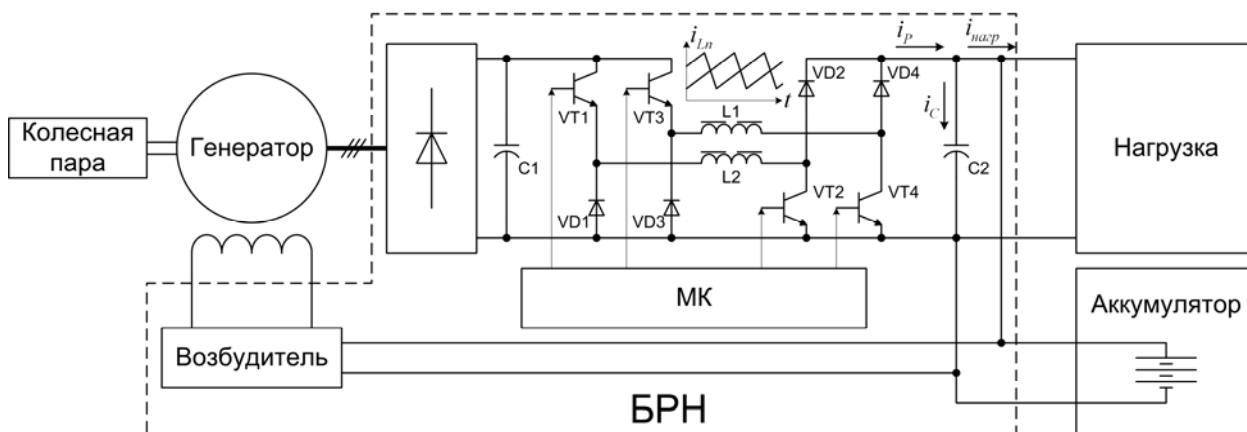


Рис. 1. Схема электроснабжения пассажирского вагона на базе БРН-32

Статический преобразователь БРН-32 выполнен по схеме «несимметричного моста». Такая схема позволяет повышать и понижать входное напряжение. DCDC-преобразователь построен на базе высокочастотных транзисторов фирмы Semikron. Частота ШИМ составляет 30 кГц, а управление по двум каналам осуществляется с фазовым сдвигом на 180° , что позволяет уменьшить нагрузку на электролитические конденсаторы за счет более высокочастотной и гладкой формы суммарного тока по двум каналам. Ключи VT1 и VT3 являются понижающими ключами, а VT2 и VT4 повышающими. Система управления преобразователя содержит контуры токов дросселей и контуры напряжения высокого быстродействия [1], что позволяет, не превышая допустимые токи, обрабатывать приложение нагрузки скачком (включение кондиционера постоянного тока, локальные короткие замыкания).

Применение DCDC-преобразователя [2], способного работать в режиме повышения, позволяет осуществлять питание вагона уже со скорости 10 км/ч, обеспечивая приблизительно треть от номинальной мощности. Данное свойство весьма полезно на участках дорог, где скорость движения ограничена (например, район г. Адлера), так как снимаемой мощности уже хватает для

освещения вагона, кипячения воды и включения кондиционера на первой ступени производительности. По сути, это очень важное достижение, так как в действительности электрооборудование вагона редко потребляет полную мощность. Для полной нагрузки вагон должен быть прогрет на солнце (максимальная производительность кондиционера), а аккумулятор должен быть полностью разряжен. Поэтому реальная нагрузка не превышает 60% от максимальной, а в обычных условиях – 40%.

Применение высокочастотного преобразователя позволило качественно стабилизировать выходное напряжение на зажимах аккумуляторной батареи (АБ) и перестать использовать ее в качестве демпфера. Регулируя выходное напряжение и считывая показания с датчика тока АБ, система управления стабилизирует ток заряда АБ на допустимом уровне. Также, анализируются показания двух датчиков температуры аккумуляторов и в функции их показаний система управления осуществляет ограничение выходного напряжения по температурной зависимости, определяемой типом батареи. По предварительной оценке исключение перезаряда батареи в совокупности с гладким напряжением и ограничением зарядного тока позволяет ожидать увеличение срока службы АБ в несколько раз по отношению к существующему решению.

Для управления возбуждением генератора применена схема несимметричного моста. Данная схема невосприимчива к пробоям одного из транзисторов. В случае пробоя транзистора релейный регулятор напряжения выхода генератора продолжит работу, однако в систему управления заложен алгоритм определения количества рабочих транзисторов, который выдаст предупреждение о неисправности на бортовую информационную панель в купе проводника.

Релейный регулятор обмотки возбуждения (ОВ) генератора работает по заданию выходного выпрямленного напряжения генератора и контролирует ток обмотки возбуждения, чтобы он не превышал максимально допустимый. Напряжение генератора задано на уровне около 160 В, DCDC-

преобразователь при этом работает в выгодном энергетически режиме понижения напряжения. Если из-за низкой скорости движения, генератор не может выдать заданное напряжение, то система управления стабилизирует в обмотке возбуждения номинальный паспортный ток. В таком режиме DCDC-преобразователь может переходить в режим повышения напряжения. Осциллограмма работы контура возбуждения приведена на рис. 2. Так, в начальный момент времени система стабилизирует ток в обмотке возбуждения в районе 0,3 А и при идентификации эквивалентной скорости генератора более 12 км/ч (точка №1 на осциллограмме) происходит включение преобразователя в работу, в обмотке возбуждения устанавливается максимальный ток, чтобы добиться выходного напряжения выпрямителя 160 В. Из графика видно, что по мере роста скорости выпрямленное напряжение растет, включается часть нагрузки и выпрямленное напряжение несколько проседает (а именно конденсатор постоянного тока включился в точке №2). При дальнейшем росте скорости достигается заданное напряжение и ток обмотки возбуждения снижается (точка №3). При торможении ток возбуждения генератора снова растет до максимального и выпрямленное напряжение генератора перестает стабилизироваться (точка №4). После преодоления порога в 8 км/ч система управления выключает основной DCDC-преобразователь и вновь переводит возбудитель в режим поддержания тока возбуждения 0,3 А, при этом напряжение генератора без нагрузки несколько возрастает (точка №5).

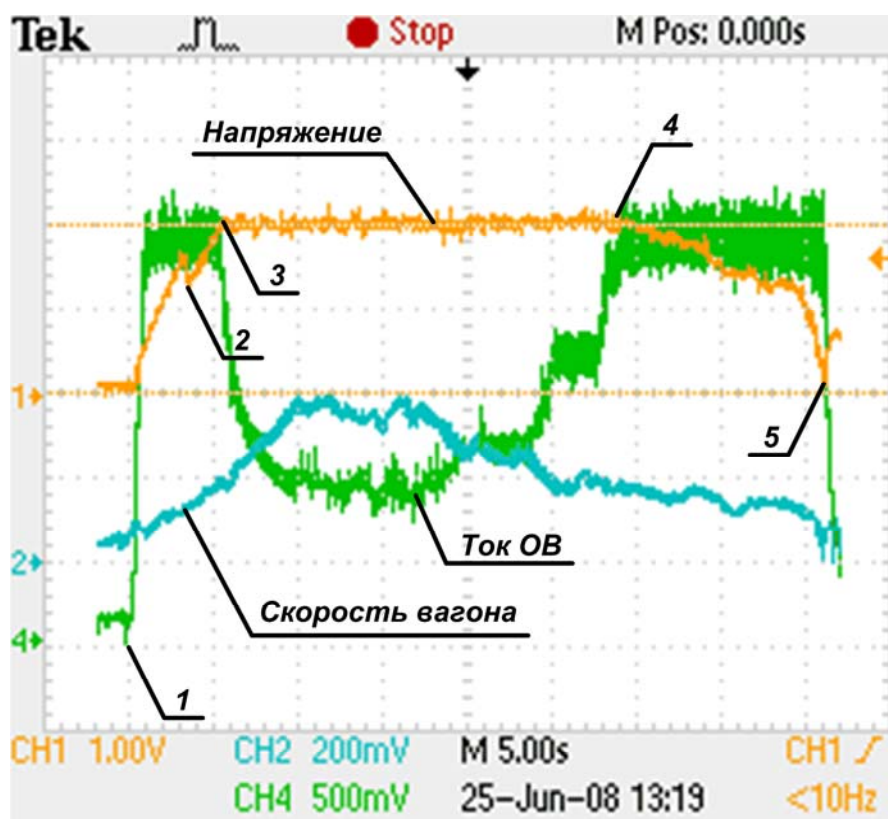


Рис. 2. Работа контура возбуждения

Система регулирования основного DCDC-преобразователя

Принципы управления основного DCDC-преобразователя удобнее рассматривать на примере одного из двух параллельных преобразователей. Он может работать в режиме понижения или повышения напряжения.

В режиме понижения напряжения работает транзистор VT1, а VT2 не коммутируется. Когда VT1 замкнут, дроссель накапливает энергию под действием разности входного и выходного напряжения по цепи «VT1 – дроссель – VD2». Когда VT1 разомкнут, дроссель высвобождает энергию под действием выходного напряжения по цепи «VD1 – дроссель – VD2». Таким образом, напряжение на выходе может меняться от нуля до напряжения входа.

В режиме повышения напряжения VT1 постоянно замкнут, а VT2 коммутируется. Когда VT2 замкнут, происходит накопление электромагнитной энергии дросселя под воздействием входного напряжения по цепи «VT1 – дроссель – VT2». Когда транзистор VT2 разомкнут, происходит высвобождение энергии дросселя, если напряжение входа меньше напряжения выхода,

или дальнейшее накопление энергии, если напряжение входа больше напряжения выхода, по цепи «VT1 – дроссель – VD2».

Для того, чтобы изобразить структурную схему DCDC-преобразователя необходимо рассмотреть в отдельности каждый составляющий ее элемент. Единичная стойка преобразователя в режиме непрерывного тока может быть представлена структурой, изображенной на рис. 3.

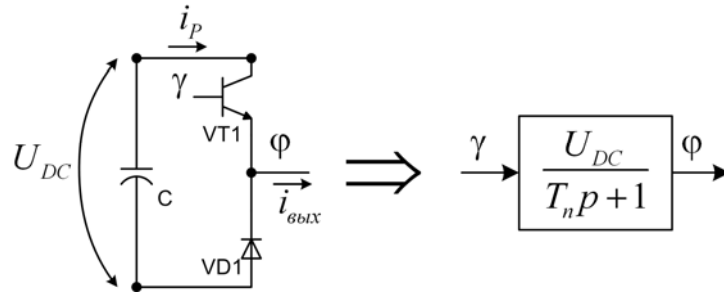


Рис. 3. Структура стойки преобразователя в режиме непрерывного тока

На вход поступает скважность управления по верхнему ключу (транзистору). Коэффициент усиления определяется разностью потенциалов между положительной и отрицательной шинами стойки – U_{DC} . В качестве постоянной времени преобразователя – T_n можно использовать два периода ШИМ (с учетом задержки преобразователя и системы управления). При этом стойка формирует потенциал ϕ на выходе. Для тока на выходе стойки следует записать еще одно уравнение связи тока нагрузки и тока положительной шины:

$$i_p = \gamma i_{нагр}. \quad (1)$$

Для стойки с нижним ключом и верхним диодом скважность управления записывается как дополнение до «единицы».

Входной и выходной стойкам DCDC-преобразователя соответствуют два потенциала ϕ_1 и ϕ_2 , которые приложены к индуктивности дросселя и определяют протекающий в ней ток.

Для преобразователя с идеальными ключами можно изобразить структурную схему для режима непрерывного тока (см. рис. 4), где $U_{вх}$ – входное напряжение преобразователя, $U_{вых}$ – выходное, ϕ_1 и ϕ_2 – средние за период ШИМ потенциалы средних точек входной и выходной стойки соответствен-

но, i_L – ток дросселя, i_p – ток положительной шины выходной стойки, $i_{нагр}$ – ток нагрузки, L – индуктивность дросселя ($L1$ или $L2$), C – емкость выходного конденсатора (половина емкости $C2$ из расчета на один канал DCDC-преобразователя).

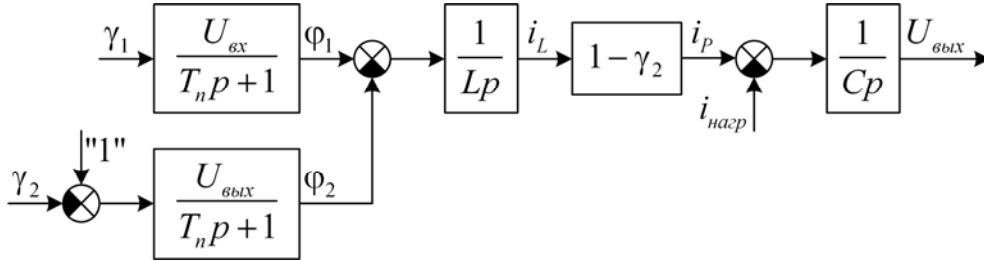


Рис. 4. Структурная схема DCDC-преобразователя

Если γ_1 изменяется, а $\gamma_2 = 0$, то структура работает в режиме понижения напряжения; если $\gamma_1 = 1$, а переменной является γ_2 , то DCDC-преобразователь повышает напряжение. Схема также может работать в смешанном режиме, когда оба ключа VT1 и VT2 коммутируются на периоде ШИМ.

Для управления преобразователем данной мощности рационально использовать двухконтурную систему подчиненного регулирования с внутренним контуром тока дросселя и внешним контуром напряжения.

Рассмотрим синтез для режима понижения напряжения, когда $\gamma_2 = 0$. В этом случае передаточная функция объекта регулирования без учета возмущающего воздействия $U_{вых}$ запишется как:

$$W_{OP PT\downarrow}(p) = \frac{U_{вх}}{T_n p + 1} \cdot \frac{1}{L p}. \quad (2)$$

Передаточная функция регулятора контура тока определяется по известным уравнениям для последовательной коррекции, а настройка выполняется на технический оптимум, где $T_\mu = T_n$:

$$W_{PT\downarrow}(p) = \frac{W_{ж}(p)}{W_{OP PT\downarrow}(p)} = \frac{(T_n p + 1) L p}{2 T_n p (T_n p + 1) U_{вх}} = \frac{L}{2 T_n U_{вх}}. \quad (3)$$

Получился П-регулятор тока дросселя с переменным коэффициентом, зависящим от текущего значения входного напряжения. Для регулятора на-

пряжения передаточная функция объекта регулирования, не учитывающая возмущение от $i_{нагр}$, состоит из замкнутого контура тока и выходной емкости:

$$W_{OP\ PH\downarrow}(p) = \frac{1}{2T_n p + 1} \cdot \frac{1}{Cp}, \quad (4)$$

тогда регулятор напряжения получается в следующем виде:

$$W_{PH\downarrow}(p) = \frac{W_{ж}(p)}{W_{OP\ PH\downarrow}(p)} = \frac{(2T_n p + 1)Cp}{4T_n p(2T_n p + 1)} = \frac{C}{4T_n}. \quad (5)$$

Аналогичные уравнения можно получить для повышающего режима работы преобразователя. Выражение для регулятора тока:

$$W_{PT\uparrow}(p) = \frac{L}{2T_n U_{вых}}. \quad (6)$$

Регулятор напряжения в режиме повышения остается пропорционального типа, однако его коэффициент будет зависеть от, текущей скважности управления ключом VT2:

$$W_{PH\uparrow}(p) = \frac{W_{ж}(p)}{W_{OP\ PH\uparrow}(p)} = \frac{(2T_n p + 1)Cp}{4T_n p(2T_n p + 1)(1 - \gamma_2)} = \frac{C}{4T_n(1 - \gamma_2)}. \quad (7)$$

Следует отметить, что регулятор тока П-типа не обеспечивает качественного регулирования из-за наличия возмущающего воздействия в виде выходного напряжения преобразователя для понижающей схемы (рис. 5а) и входного напряжения преобразователя для повышающей (рис. 5б), поэтому необходимо произвести компенсацию возмущающего воздействия. Параметры регуляторов и компенсации по возмущению сведем в таблицу 1.

Таблица 1. Параметры регуляторов и параллельной коррекции системы управления

Режим	Понижение	Повышение
Регулятор контура тока	$\frac{L}{2T_n U_{вх}}$	$\frac{L}{2T_n U_{вых}}$
Регулятор контура напряжения	$\frac{C}{4T_n}$	$\frac{C}{4T_n(1 - \gamma_2)}$
Компенсация возмущающего воздействия в контуре тока	$\frac{U_{вых}}{U_{вх}}$	$1 - \frac{U_{вх}}{U_{вых}}$

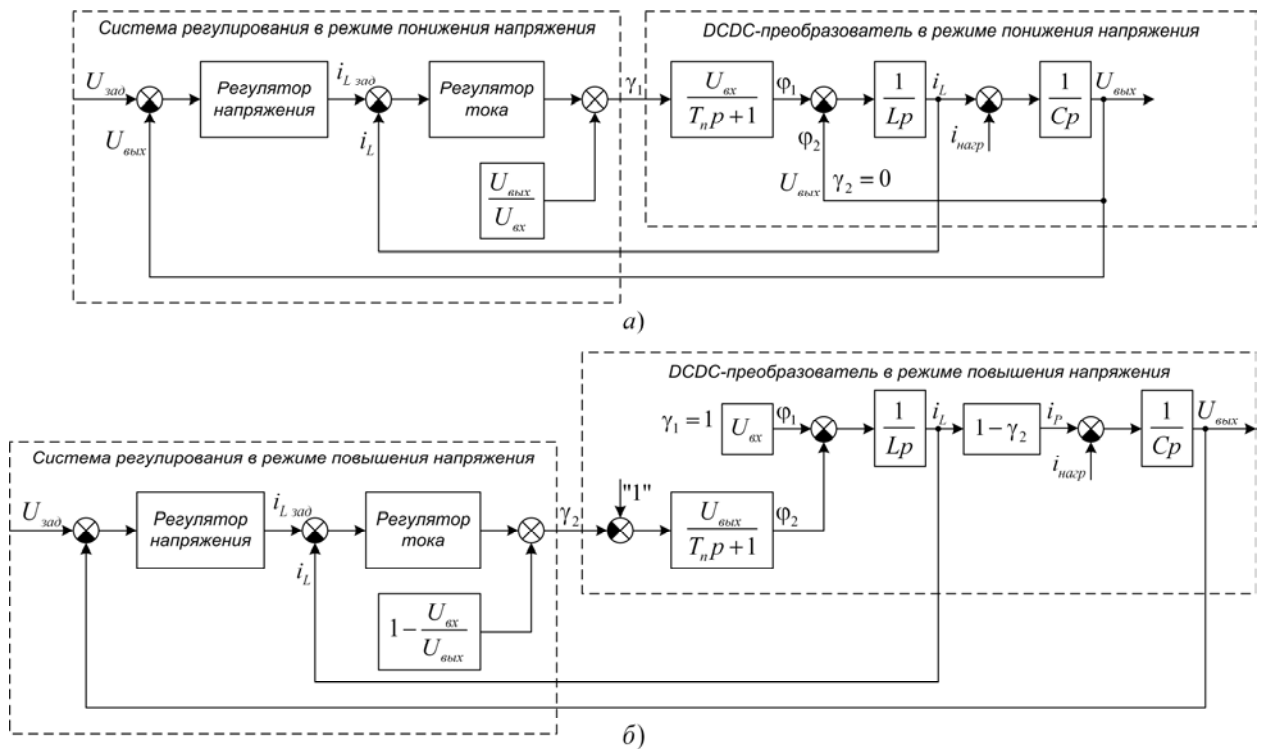


Рис. 5. Функциональные схемы систем регулирования и DCDC-преобразователя для режимов понижения и повышения

В этом виде система имеет хорошие показатели по быстродействию и точности стабилизации параметров, однако качество регулирования напрямую зависит от точности измерения напряжений в блоке компенсации возмущающего воздействия в контуре тока, а из-за нелинейностей преобразователя, вызванных особенностями работы силовых транзисторов, переход из режима понижения в режим повышения напряжения имеет зону нечувствительности, на границе которой регуляторы попадают в автоколебательный режим.

Учет нелинейностей преобразователя и измерительных погрешностей системы управления

Предложенная система управления оперирует данными о входном и выходном напряжениях преобразователя, получаемых с датчиков напряжения. Так как показания датчиков содержат ошибку, то величина компенсирующего воздействия рассчитывается неточно. Имея регулятор тока, содержащий лишь пропорциональную составляющую, система попадает либо в режим недокомпенсации возмущающего воздействия, либо в режим пере-

компенсации. При перекомпенсации ток неконтролируемо возрастает, при недокомпенсации – не достигает заданного значения.

В режимах понижения и повышения напряжения значение компенсации возмущающего воздействия содержит отношение $\frac{U_{\text{бых}}}{U_{\text{вх}}}$. Погрешности датчиков влияют на отклонение значения данной величины, рассчитанной через измеренные параметры, от реальной. Чтобы определить реальное значение отношения, необходимо реализовать простейший наблюдатель, задачей которого будет подстройка коэффициента корректирующего отношения измеренных напряжений.

Отметим, что в отсутствии динамической составляющей в токе дроселя при правильной компенсации возмущения ошибка на входе регулятора равна нулю. Если происходит перекомпенсация, то ток становится больше заданного, а если недокомпенсация, то меньше. Поэтому, очевидно, что ошибка тока на входе регулятора может быть использована в качестве воздействия на входе наблюдателя. На рис. 6 изображена структурная схема наблюдателя в блоке компенсации по возмущению, где T_H – постоянная времени наблюдателя, K_K – коэффициент коррекции компенсации возмущения.

Если напряжения измерены без ошибки и отношение $\frac{U_{\text{бых}}}{U_{\text{вх}}}$ вычислено правильно, то коэффициент коррекции будет равен «1». Если появляется систематическая ошибка в измерениях, то коэффициент коррекции будет изменяться, компенсируя эту ошибку. Коэффициент коррекции, рассчитанный при работе в режиме понижения напряжения, может быть использован при переходе в режим повышения, где используется аналогичное отношение.

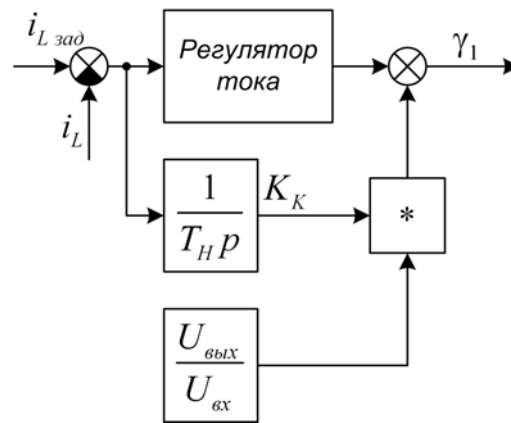


Рис. 6. Функциональная схема регулятора тока для преобразователя в режиме понижения напряжения с компенсацией возмущающего воздействия и наблюдателем

До сих пор был рассмотрен режим непрерывного тока дросселя, однако при малых нагрузках ток дросселя становится прерывистым и математическое описание преобразователя перестает соответствовать, представленному на рис. 3. Между тем, предложенная система управления преобразователем может за счет изменения коэффициента коррекции подстраиваться для работы в режиме прерывистого тока.

Если падения напряжения на транзисторах и диодах будут хорошо скомпенсированы разработанным наблюдателем, то остается существенно нелинейная зона на стыке областей повышения и понижения напряжения. Это объясняется неспособностью транзистора формировать узкие импульсы закрытого или открытого состояния. Отсечение этих импульсов выполняется либо программными средствами, либо обеспечивается схемой аппаратного драйвера силового транзистора. График изменения реальной скважности – γ от желаемой – $\gamma_{жел}$ представлен на рис. 7а.

При изменении скорости движения состава изменяется напряжение генератора, и преобразователь напряжения проходит стык режимов понижения и повышения. Если по каким-либо причинам поезд продолжает движение на граничной скорости, возникают колебания напряжения нагрузки, связанное с переходом регулятора через зону нечувствительности по управлению.

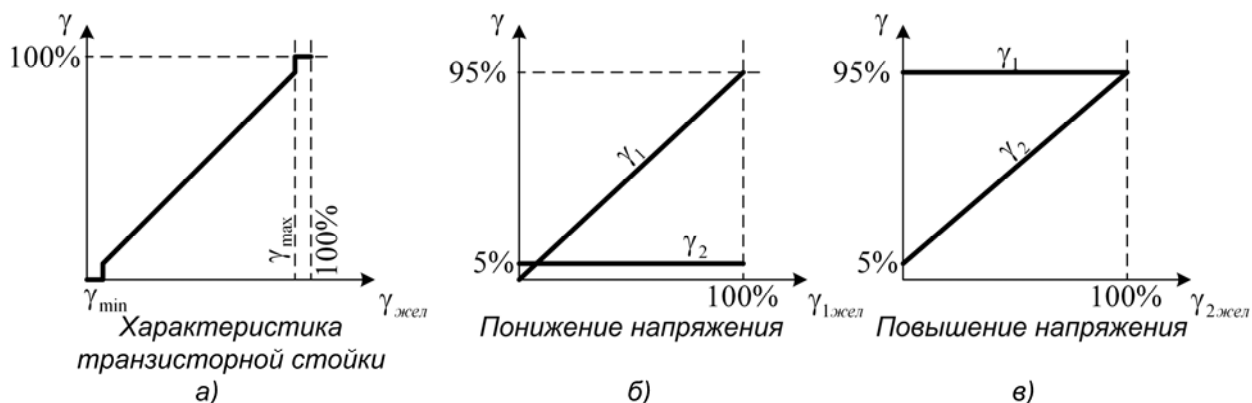


Рис. 7. Функциональные зависимости управления ключами

Чтобы избежать колебаний был разработан смешанный алгоритм управления ключами, когда желаемая скважность понижающего ключа VT1 изменяется в диапазоне от нуля до 95% (в районе нуля он работает только при полном обрыве нагрузки). При этом повышающий ключ VT2 уже работает с минимальной скважностью 5%. При достижении ключом VT1 максимальной скважности 95% происходит переход в режим повышения напряжения, когда свою скважность от 5% и выше изменяет ключ VT2, а ключ VT1 работает со своей максимальной скважностью 95%.

Преобразование скважностей системы управления производится по функциональным зависимостям, представленным на рис. 7б и 7в. Все изменения коэффициентов передачи компенсируются наблюдателем коэффициента коррекции возмущающего воздействия, а переход из режима понижения напряжения в повышение и обратно происходит без колебаний выходного напряжения.

Экспериментальная проверка результатов

На рис. 8 показана работа преобразователя в режиме повышения напряжения. Масштаб токов 16,7 А в клетке. Смещение в управлении силовыми каналами составляет 180°.

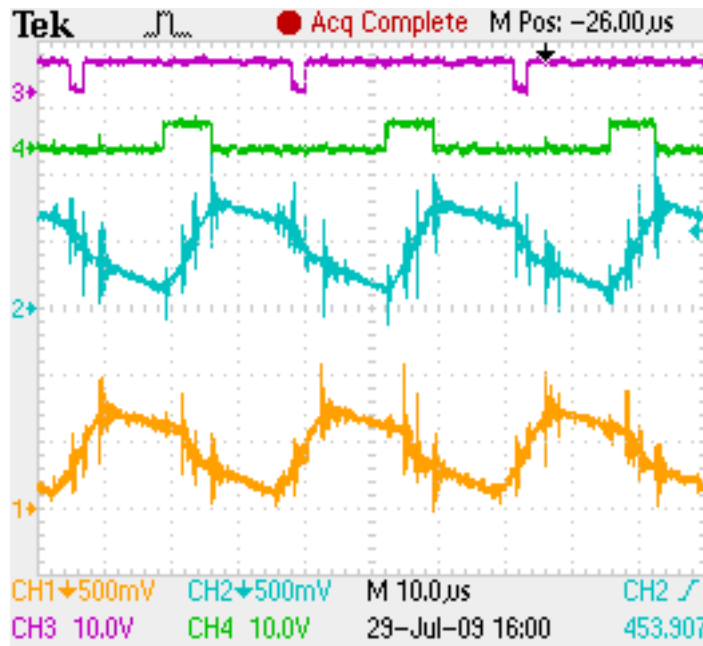


Рис. 8. Осциллограмма работы DCDC-преобразователя в повышающем режиме (1-й канал – ток первого канала DCDC, 2-й канал – ток второго канала DCDC, 3-й канал – управление понижающим ключем второго DCDC, 4-й канал – управление повышающим ключем второго DCDC)

Система управления выполнена на контроллере МК10.5[3], построенном на базе микроконтроллера TMS320LF2406A фирмы Texas Instruments. Микроконтроллер имеет производительность 40 млн. операций в секунду, содержит встроенную Flash-память. Программное обеспечение написано на языке ассемблер. Связь с верхним уровнем – системой «КВИНТ-ЭВ» осуществляется по интерфейсу CAN с протоколом CANopen [4]. Следует отметить, что преобразователь является полностью автономным и не управляется по CAN-сети. Она необходима только для передачи на верхний уровень информации по степени заряда АБ, текущем уровне напряжения и скорости вращения генератора (его частоте), которая используется системой «КВИНТ-ЭВ» для расчета пройденного вагоном пути. То есть обрыв связи БРН-32 с вагонной CAN-сетью не приведет к обесточиванию потребителей.

Испытания БРН-32 проводились на опытном вагоне, приписанном к Октябрьской железной дороге. Система успешно прошла испытания на маршрутах «Москва – Мурманск – Москва» и «Москва – Санкт-Петербург – Москва», после чего БРН-32 стали устанавливаться в купейные вагоны произво-

димые МВСЗ им. Войтовича и вагоны повышенной комфортности производства ООО НПП «Циркон-Сервис». По данным на март 2010 года БРН-32 успешно работает более чем в двадцати вагонах, десять из которых включены в состав поезда №09/10 «Самара – Москва – Самара». В процессе эксплуатации система показала работоспособность в диапазоне температур от -35°C до $+25^{\circ}\text{C}$.

Заключение

В результате работы была предложена и реализована система электропитания пассажирских вагонов поездов дальнего следования. Алгоритмы управления реализованы на современном микроконтроллере.

Предложена оригинальная структура системы управления DCDC-преобразователем с двухконтурным регулированием, компенсацией возмущающих воздействий, наблюдателем коэффициента коррекции компенсации воздействий, позволяющим компенсировать ошибки измерения и коэффициентов передачи структуры преобразователя и обеспечивать работу системы как в режиме непрерывного, так и прерывистого тока.

Для обеспечения бесстыкового перехода между режимами понижения и повышения разработан алгоритм смешанного управления ключами преобразователя.

Полученные результаты подтверждены практическими исследованиями и опытной эксплуатацией.

Библиографический список

1. Анучин А.С., Арискина Л.В., Синтез двухконтурной системы управления DCDC-преобразователя напряжения в режиме непрерывного тока для приводов с регулируемым промежуточным звеном постоянного тока, Труды МЭИ. Электропривод и системы управления – 2002. – Вып.679. – С.52–65.
2. Остриров В.Н., Силаев Ф.А. Разработка источника питания для железнодорожного вагона с автономной системой электропитания // Электрика. – 2009. – №8. – С.22-24.

3. Козаченко В.Ф., Обухов Н.А., Анучин А.С., Жарков А.А. Модульная микроконтроллерная система управления для отечественной серии преобразователей частоты «Универсал» // Труды V Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение» МКЭЭЭ-2003. Ч.1. Крым, -2003. -С. 725-726.

4. Анучин А.С., Сеть CAN и протокол верхнего уровня CANopen в современном электроприводе, Электричество, май 2008, С.23-29.

Авторы:

Анучин Алексей Сергеевич в 2001 г. окончил кафедру Автоматизированного электропривода Московского энергетического института (ТУ), где в 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка системы управления многофазного вентильно-индукторного привода с промежуточным регулируемым звеном постоянного тока». Доцент кафедры Автоматизированного электропривода Московского энергетического института (ТУ). Электронная почта: anuchinas@mpei.ru. Телефон: +7-495-362-7151.

Силаев Федор Анатольевич в 2007 г. окончил кафедру Автоматизированного электропривода Московского энергетического института (ТУ), где в том же году поступил в очную аспирантуру под руководством Острирова В.Н. Электронная почта: SilaevFA@cycle-p.ru. Телефон: +7-495-362-7996.