

5. Хольм Р. Электрические контакты. Пер. с англ. – М.: изд.-во иностр. лит., 1961. – 20–56 с., 203–206 с.;
6. Усов В.В. Металловедение электрических контактов. М.: Госэнергоиздат, 1963. – 58 с.
7. Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов. Общие вопросы проектирования: учебное пособие. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
8. Мерл В. Электрический контакт. Теория и применение на практике. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 80 с.
9. Родштейн Л.А. Электрические аппараты: учебное пособие, 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В СИМУЛЯТОРЕ LTSPICE

А.А. Столярова, С.Г. Михальченко

Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, Томск

Основными направлениями при создании силовых импульсных преобразователей являются: увеличение мощности, увеличение удельной мощности и увеличение КПД. При использовании силовых импульсных преобразователей в составе систем электропитания космических аппаратов накладываются дополнительные требования: уменьшение уровня помех, создаваемых прибором; широкий диапазон входного напряжения; широкий диапазон нагрузки; высокие требования по надежности работы, стойкости и т.д. [1].

В случае резонансной коммутации мощность в преобразователе изменяется по синусоидальному закону и, соответственно, происходит мягкая коммутация ключей. Таким образом, данный метод позволяет существенно снизить динамические потери и уровень помех преобразователя [1, 2, 3].

Среди различных видов резонансных преобразователей наиболее простым и распространённым является резонансный преобразователь с последовательным резонансным LC контуром, с которым последовательно включена цепь нагрузки с выпрямителем, рис. 1, а [2, 4].

В этой схеме резонансный контур и нагрузка представляют собой делитель напряжения. При изменении частоты управления изменяется импеданс резонансного контура. Входное напряжение делится между этим импедансом и нагрузкой, за счет чего и происходит регулировка выходного напряжения. Коэффициент усиления резонансного преобразователя с последовательным LC -контуром всегда < 1 , рис. 1, б [2, 3].

В симуляторе Ltspice была создана имитационная модель мостового последовательного LC резонансного преобразователя. Графики зависимостей коэффициента передачи преобразователя от частоты работы имитационной модели, разработанной в симуляторе Ltspice, при разных сопротивлениях нагрузки приведены на рис. 2.

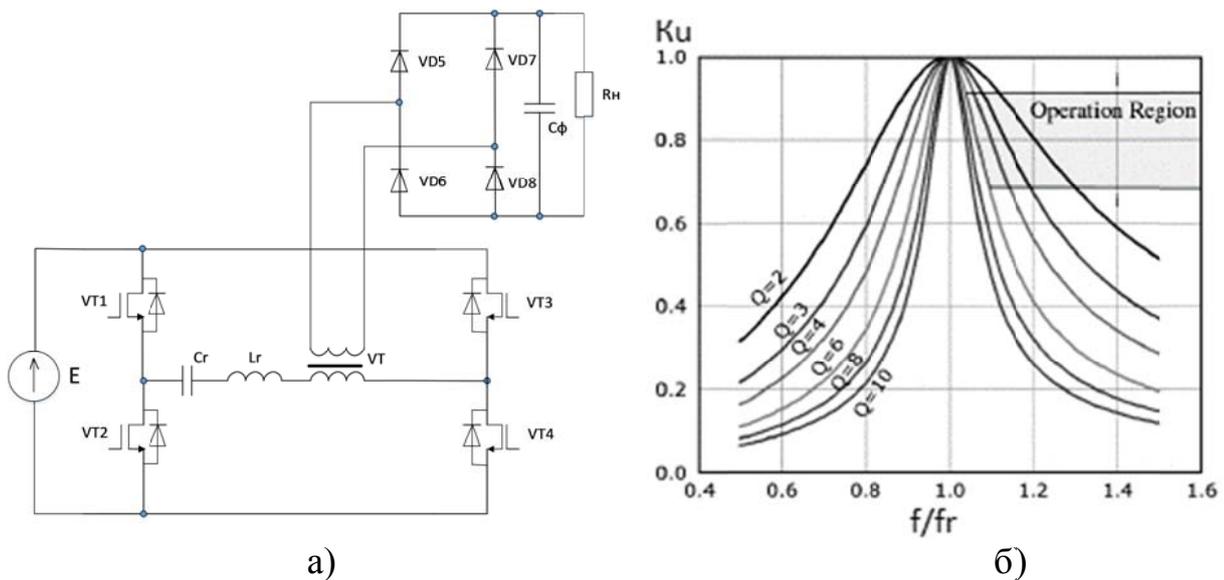


Рис. 1. а) Схема LC резонансного преобразователя; б) зависимость коэффициента передачи от частоты для различных значений добротности резонансного контура

Как видно из рисунка зависимости имеют характерную для LC резонансного контура форму.

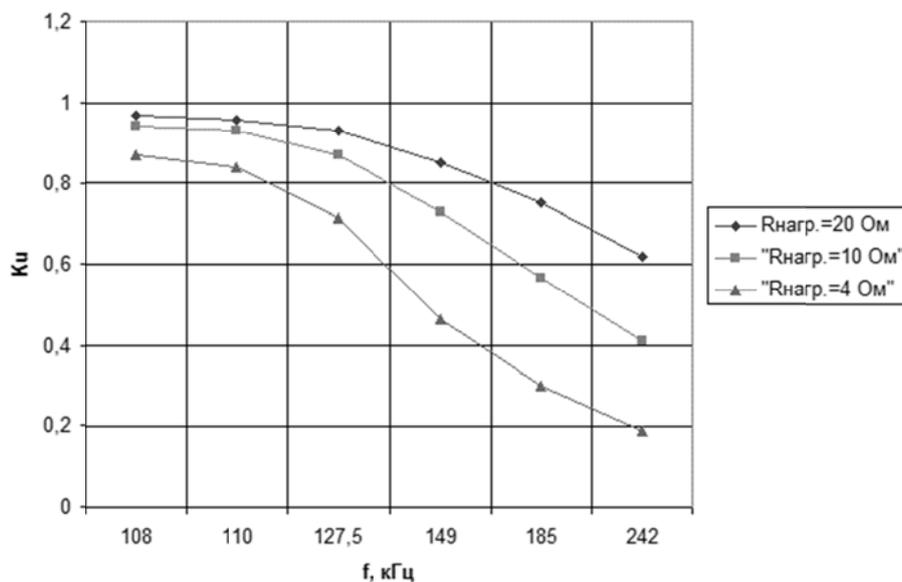


Рис. 2. Зависимости коэффициента передачи от частоты работы преобразователя при сопротивлениях нагрузки 20, 10, 4 Ом

На рис. 3 показаны зависимости для имитационной модели и реального преобразователя с аналогичными параметрами резонансного контура, которые в значительной мере совпадают.

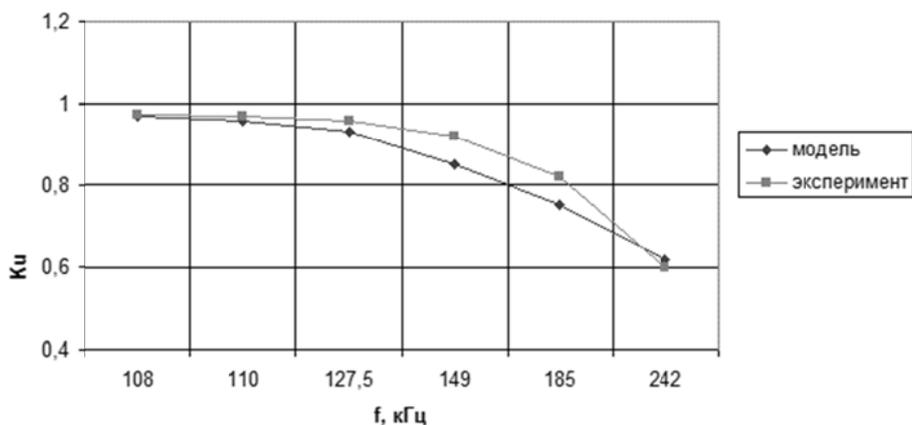


Рис. 3. Зависимости коэффициента передачи от частоты работы преобразователя, полученные экспериментально и при моделировании

Эпюры напряжений и токов в ключевых точках схемы (напряжение на конденсаторе резонансного контура, ток резонансного контура и т.д.) модели аналогичны полученным экспериментально, как можно видеть на рис. 4.

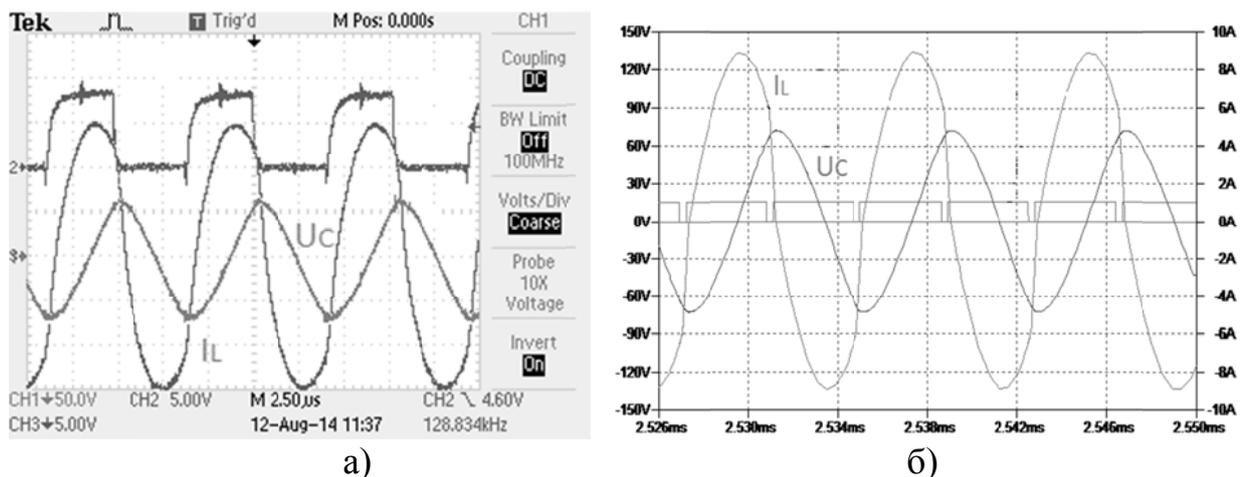


Рис. 4. Напряжение на конденсаторе резонансного контура U_C , ток в контуре I_L , сигналы управления на транзисторах, полученные в результате: а) эксперимента; б) симуляции

Таким образом, можно сделать вывод о том, что полученная имитационная модель последовательного LC резонансного преобразователя адекватно отражает процессы, происходящие в резонансном контуре, и может служить основой для дальнейшего исследования резонансных преобразователей.

Для дальнейшего анализа преобразователя, а также для создания математической модели, необходимо свести реальные элементы схемы, к идеальным. Рассмотрим основные элементы схемы.

Во многих преобразователях транзисторы возможно заменить просто идеальными ключами, но в резонансных преобразователях важную роль играют как обратные диоды транзисторов, так и некоторые паразитные параметры [5,

б)]. На рис. 5, б показана форма тока в контуре при наличии мертвого времени в управлении и отсутствии обратных диодов, которая не наблюдается в реальной схеме с полевыми транзисторами. Для более адекватного моделирования параллельно ключам в схеме замещения пришлось расположить конденсатор, имитирующий паразитную емкость обратных диодов и транзисторов. В резонансных преобразователях этой емкости отводится важное значение [5, 6]. Во время работы одного плеча моста емкость «сток-исток» ключей другого плеча перезаряжается и обеспечивает коммутацию транзистора при нулевом напряжении. На рис. 5, в и 5, г показаны эпюры тока и напряжения на конденсаторе в резонансной цепи без имитации паразитной емкости и с ней соответственно. Как можно видеть формы и значения эпюр на рис. 5, г совпадают с показанными на рис. 5, а. В то время как на рис. 5, в, несмотря на совпадение форм, значение напряжения больше на 20 %, а тока наоборот меньше на 15 %. При моделировании транзисторов в резонансных преобразователях, паразитную емкость «сток-исток» транзистора необходимо учитывать обязательно.

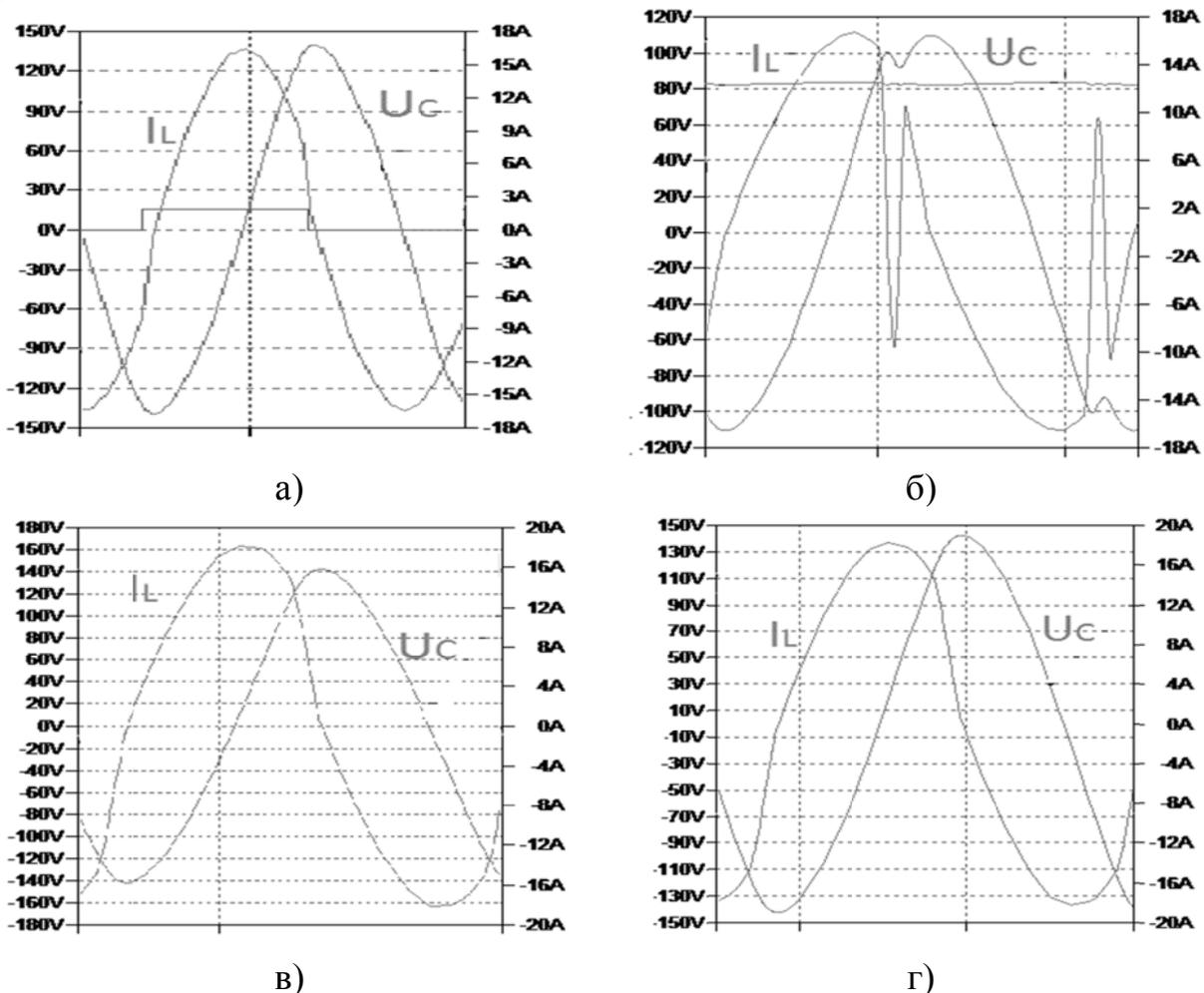


Рис. 5. Формы тока и напряжения на конденсаторе в резонансном контуре в схеме замещения с моделями транзисторов: а) IRFP460; б) с идеальными ключами; в) с идеальными ключами и подключенными параллельно обратными идеальными диодами; г) с идеальными ключами и подключенными параллельно обратными идеальными диодами и конденсаторами

Рассмотрим влияние сопротивления прямого канала. Для оценки степени влияния этого параметра были сняты характеристики для разных сопротивлений открытого канала транзисторов преобразователя, рис. 6.

Максимальный коэффициент усиления при сопротивлении $R_{on}=8 \text{ Ом}$ и $R_{on}=200 \text{ Ом}$ отличаются приблизительно на 5%. Если минимальные сопротивления открытого канала не будут превышать 30 Ом, данным сопротивлением при дальнейшем моделировании можно пренебречь.

Таким образом можно сделать вывод о том, что при моделировании реальный транзистор можно заменить моделью идеального ключевого элемента с параллельно подключенными к нему емкостью, равной паразитной емкости транзистора, и идеальным диодом, включенным в обратном направлении.

Схему замещения трансформатора для резонансного контура представляет собой две связанные между собой коэффициентом связи индуктивности.

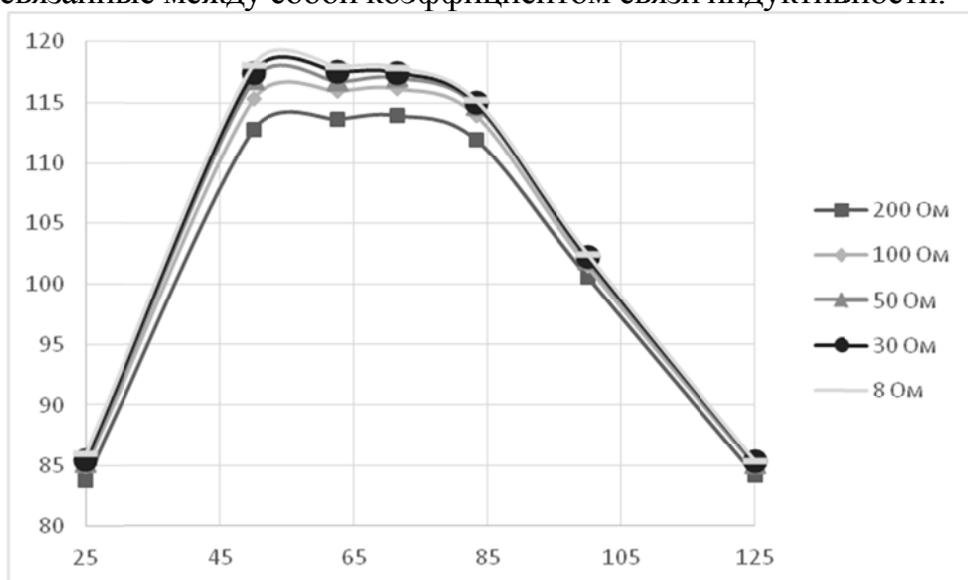


Рис. 6. Зависимости переходных характеристик мостового резонансного преобразователя в зависимости от значения сопротивления открытого канала транзисторов

Схема замещения мостового резонансного преобразователя представлена на рис. 7.

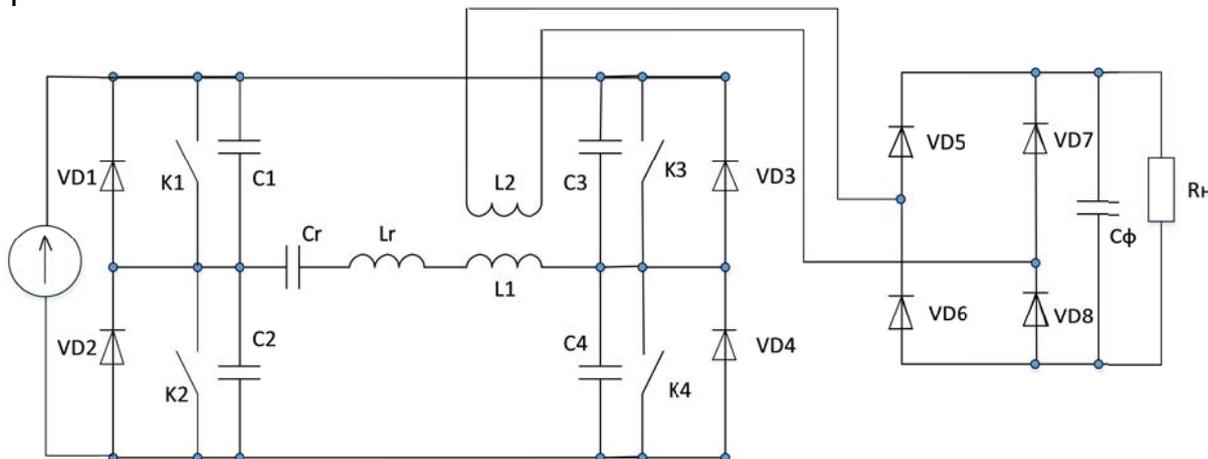


Рис. 7. Схема замещения мостового резонансного преобразователя

Адекватное отображение нагрузки в имитационной модели также необходимо учитывать при анализе процессов, протекающих в преобразователе. Здесь возможности имитационной среды *LTSpice* позволяют значительно упростить анализ динамики.

Для отражения адекватных процессов в резонансном контуре модель преобразователя необходимо рассматривать вместе с моделью выпрямителя в цепи вторичной обмотки трансформатора, т.к. замена выпрямителя с нагрузкой на сопротивление ведет к изменению формы тока, и анализ «мягкого» переключения, как показано на рис. 8, становится невозможным.

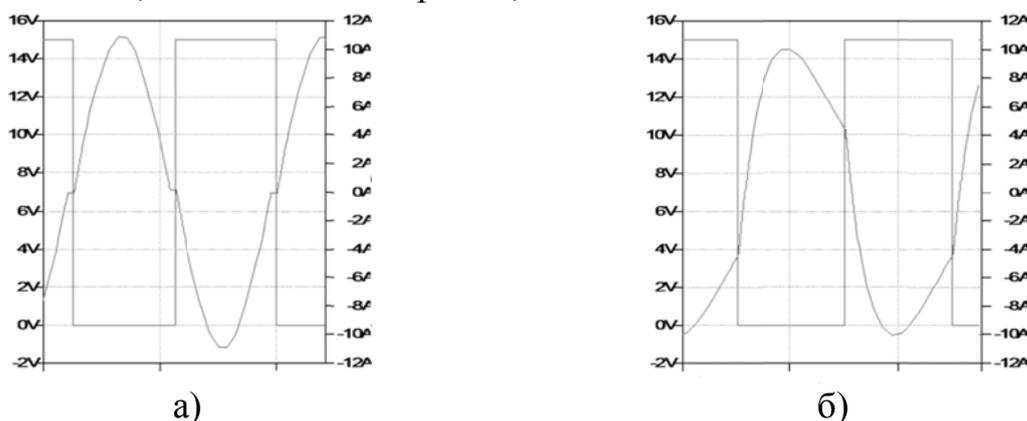


Рис. 8. Формы тока резонансного контура и управляющего сигнала для: а) схемы с выпрямителем во вторичной цепи и нагрузкой; б) для схемы с активной нагрузкой, подключенной непосредственно ко вторичной цепи трансформатора без выпрямителя

Выводы

Продемонстрирована возможность использования пакета *LTSpice* и созданной модели для проектирования резонансного преобразователя применяемого в разрабатываемой системе электропитания.

Упрощение модели и переход от моделей транзисторов, близких к практически используемым, к моделям идеальных элементов вносит определенный ряд погрешностей, учитывая величину которых возможно существенно упростить математическую и имитационную модель. Такое упрощение необходимо для исследований динамики поведения преобразователя в различных режимах изменения параметров системы и увеличения скорости расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 York B. An integrated boost resonant converter for photovoltaic applications / B. York, W. Yu, J.S. Lai // Power electronics. – 2013. – vol.28. – №1. – pp. 1199–1207.
- 2 Yang B. Topology investigation of front end DC/DC converter for distributed power system / Bo Yang. – PhD. – etd-09152003-180228. – 09.12.2003.
- 3 Hangseok Choi. Half-Bridge LLC Resonant Converter Design Using FSFR-Series Fairchild Power Switch. – www.fairchildsemi.com. – Rev. 1.0.2 10/22/14.
- 4 Li X. Analysis and design of high-frequency isolated dual-bridge series

resonant DC/DC converter / X. Li, A.K.S. Bhat // Power electronics. –2010. – vol. 25. – №4. – pp. 850–862.

5 Wang M. A novel control scheme of synchronous buck converter for ZVS in light-load condition / J.-M. Wang, S.-T. Wu, G.-C. Jane // Power electronics. – 2014 – vol.26. – №11. – pp. 3264-3271.

6 Михальченко С.Г. Функционирование импульсно-модуляционных преобразователей в зонах мультистабильности // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1–1. – С. 259–268.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕКТОРНОЙ СУ ЧАСТОТНО- РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЧЕТЫРЁХСТЕПЕННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

С.В. Борисов, Г.В. Родионов, С.Н. Кладиев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, Томск

Современные имитаторы движения транспортных средств подготовки водителей-операторов имеют сложную структуру и представляют собой многоуровневый программно-аппаратный комплекс. Данная система реализуется либо на основе гидропривода для имитации среды подвижного транспорта во время движения с учетом рельефа местности, либо с использованием частотно-управляемого электропривода для отработки навыков вождения автотранспорта водителем-оператором на малой платформе с учетом динамических режимов вождения. Для имитации данных режимов движения автотранспорта электропривод решает следующие задачи:

- отработка сигнала задания скорости и ускорения по осям вращения подвижной платформы, с учетом постоянно меняющегося рельефа;
- учет влияния больших моментов инерции механической системы;
- обеспечение двухкратной перегрузочной способности по моменту исполнительного двигателя;
- работа двигателя с ослаблением поля с кратковременным поддержанием момента на уровне $0,7 M_n$;

В качестве объекта разработки выступает подвижная динамическая платформа ДП-43, имеющая 4 степени свободы (рис. 1). Управление подвижной платформой осуществляется с помощью встроенного компьютера по локальной вычислительной сети, построенной на базе протоколов Ethernet и Modbus TCP. В качестве преобразователей частоты используются инверторы модели FR-A740 Mitsubishi Electric.

Использование в данной установке импортных компонентов и составляющих приводит к зависимости от поставщиков комплектующих изделий. Исходя из данного факта, поставлена задача модернизации подвижной