

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ТРЕХЭЛЕМЕНТНЫМИ КОНТУРАМИ

Г. В. Павлов, д-р техн. наук, проф.;
В. И. Локарев, д-р техн. наук, проф.;
Т. В. Щербинин, аспирант

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. С помощью компьютерных моделей исследованы электромагнитные процессы в системах электропитания на основе резонансных преобразователей с трехэлементными контурами. Получены экспериментальные регулировочные характеристики пяти основных топологий резонансных преобразователей с трехэлементными контурами. Проведен анализ осциллограмм резонансных токов.

Ключевые слова: система электропитания, резонансный преобразователь, регулировочные характеристики, имитационная модель.

Анотація. За допомогою комп'ютерних моделей досліджено електромагнітні процеси в системах електроживлення на основі резонансних перетворювачів з трьохелементними контурами. Отримано експериментальні регульовальні характеристики п'яти основних топологій резонансних перетворювачів з трьохелементними контурами. Проведено аналіз осцилограм резонансних струмів.

Ключові слова: система електроживлення, резонансний перетворювач, регульовальні характеристики, імітаційна модель.

Abstract. Electromagnetic processes in power supply systems based on resonant converters with three-element circuits were investigated by means of simulation. Experimental regulating characteristics of five basic topologies of resonant converters with three-element circuits were obtained. Oscillograms of resonant currents were analyzed.

Keywords: power supply system, resonant converter, regulating characteristics, simulator.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Миниатюризация электронных и электро-механических устройств, а также постоянное ужесточение требований к энергоэффективности систем электропитания обуславливают повышенный интерес специалистов к резонансным преобразователям (РП) постоянного

напряжения. Эти преобразователи, обладающие улучшенными массогабаритными показателями, высоким КПД (до 97 % в рабочей точке), обеспечивающие хорошие условия электромагнитной совместимости, все шире внедряются в качестве источников вторичного электропитания для различных

электротехнических комплексов, в том числе цифровых систем управления, сбора и обработки информации, связи, компактных электроприводов постоянного тока и т. д. Такие системы крайне требовательны к качеству электропитания. Поэтому важной задачей является выбор преобразователя, характеристики которого удовлетворяют данным требованиям.

Статические и динамические характеристики РП определяются топологией резонансного контура (РК) и способом регулирования. Применение РК различных топологий позволяет придать преобразователю дополнительные свойства — повышение выходного напряжения, стабильность регулирования на холостом ходу (ХХ) и т. п. Многоэлементные резонансные контуры позволяют комбинировать эти свойства. Исследовать характеристики систем электропитания на основе резонансных преобразователей с различными контурами удобно с помощью компьютерных моделей.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ И ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе [2] предложена компьютерная модель РП с последовательным двухэлементным РК для исследования влияния способов регулирования на качество выходного напряжения и характер переходного процесса на выходе преобразователя. В ходе исследования было проведено моделирование РП с частотным, релейным, совмещенным широтно-частотным и фазовым регулированием, получены экспериментальные регулировочные характеристики. Однако в работе не рассмотрено влияние топологии контура на статические и динамические характеристики преобразователя.

В работе [1] показано, что РП с трехэлементным *LCC* контуром сочетает

достоинства РП с последовательными и параллельными двухэлементными контурами, не наследуя их недостатков. Однако исследование свойств РП с трехэлементными контурами других топологий не производилось, поскольку выходило за рамки работы.

В работе [3] из 36 возможных топологий трехэлементных РК выделены 15, в которых все элементы влияют на характер энергообмена при регулировании с изменением коммутационной частоты (частотный, широтно-частотный и фазовый способы).

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ стало определение достоинств и недостатков систем электропитания, содержащих резонансные преобразователи с трехэлементными контурами, путем исследования их регулировочных характеристик и электромагнитных процессов в силовой части с помощью компьютерных моделей.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Упомянутые в работе [3] 15 топологий можно разделить на тройки с практически идентичными регулировочными характеристиками. Выбирая из каждой тройки по одной топологии, наиболее удобной для реализации, получим 5 топологий РК, приведенных на рис. 1, *a–d*. Назовем их *LCC*-РП, *LLC*-РП, *LCL*-РП, *L-LC*-РП и *LC-L*-РП.

Для моделирования РП с данными контурами были модифицированы модели, предложенные в [2]. На рис. 2 приведена компьютерная имитационная модель *LC-L*-РП с частотным регулированием.

Модель содержит резонансный контур, образованный двумя индуктивностями *L1* и *L2* и емкостью *C*. Активное сопротивление *R* учитывает потери в резонансном контуре. Мост инвертора представлен эквивалентным управляемым источником напряжения *Invertor*.

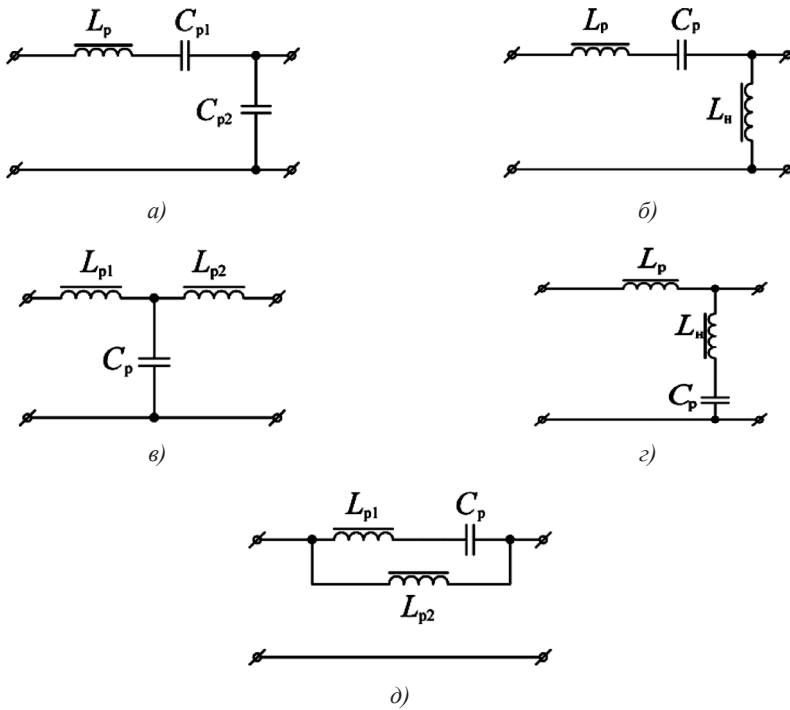


Рис. 1. Топологии трехэлементных резонансных контуров: а — LCC-ПИ; б — LLC-ПИ; в — LCL-ПИ; г — L-LC-ПИ; д — LC-L-ПИ

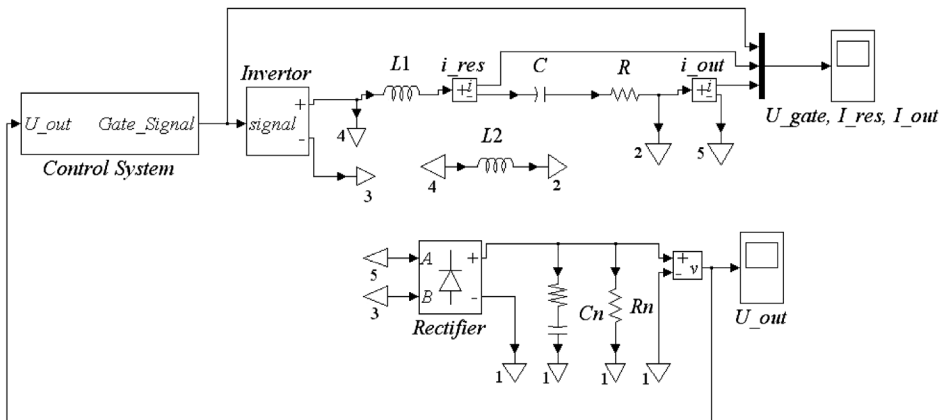


Рис. 2. Компьютерная модель резонансного преобразователя с трехэлементным контуром

Регулирование выходного напряжения производится с помощью блока *Control System*, внутренняя структура которого соответствует описанной в [2]. Поскольку при использовании трехэлементных контуров резонансный ток, протекаю-

щий через ключи инвертора, не равен току, протекающему через ключи выпрямителя, был введен дополнительный измеритель тока i_{out} .

При исследовании всех контуров (см. рис. 1, а-д) использовалось ча-

стотное регулирование. Для каждого из контуров были получены семейства регулировочных характеристик при различных соотношениях сопротивления нагрузки и волнового сопротивления контура, а также осциллограммы резонансных токов.

Семейства регулировочных характеристик для пяти контуров изображены на рис. 3, а–д соответственно. Регули-

ровочные кривые сняты при следующих значениях $R_n^* = R_n/\rho$: на рис. 1, а — 5 (кривая 1), 2 (кривая 2), 1 (кривая 3), 0,5 (кривая 4), 0,25 (кривая 5). На рис. 3, б — 10 (кривая 1), 2 (кривая 2), 1 (кривая 3), 0,5 (кривая 4), 0,35 (кривая 5), 0,1 (кривая б). На рис. 1, в, д — 10 (кривая 1), 2 (кривая 2), 1 (кривая 3), 0,5 (кривая 4), 0,1 (кривая 5). На рис. 3, г — 10 (кривая 1), 1 (кривая 2), 0,5 (кривая 3),

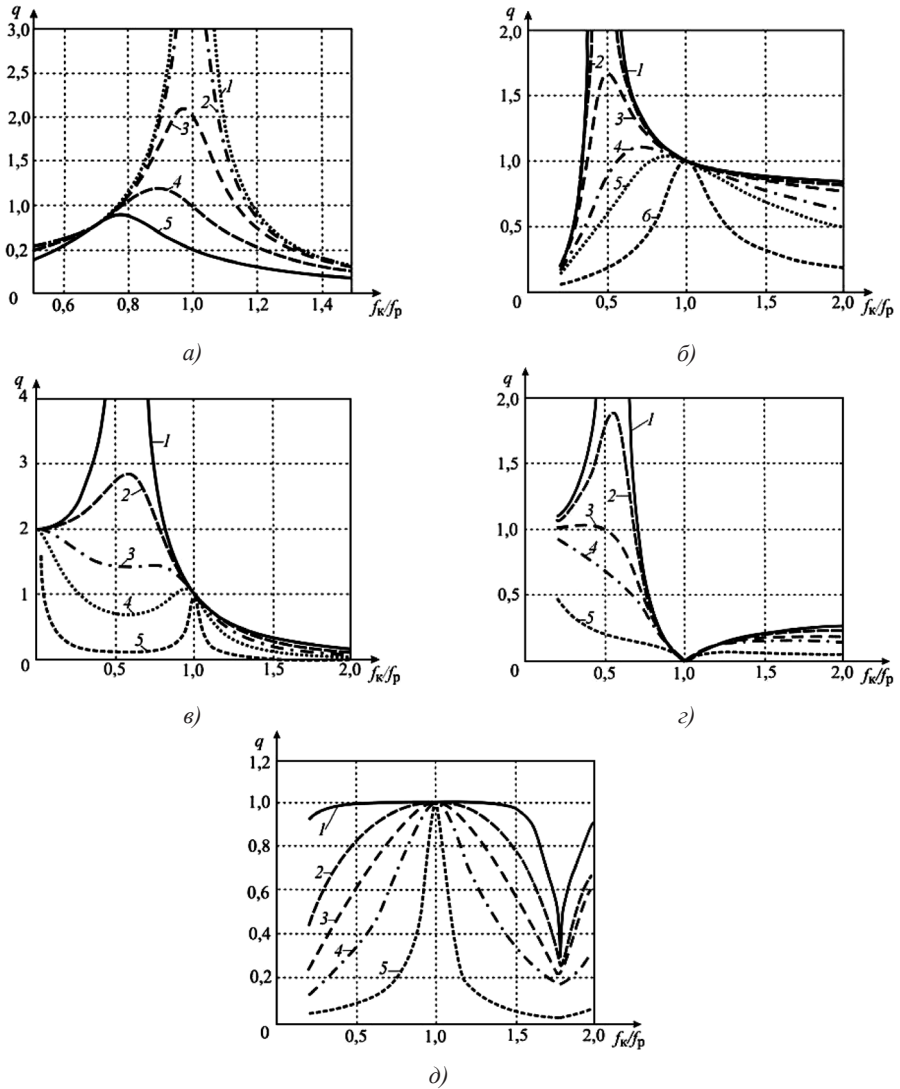


Рис. 3. Регулировочные характеристики резонансных преобразователей с трехэлементными контурами: а — LCC-ПП; б — LLC-ПП; в — LCL-ПП; г — L-LC-ПП; д — LC-L-ПП

0,35 (кривая 4), 0,1 (кривая 5). Как можно видеть, топологии, изображенные на рис. 1, *a–г* позволяют повышать выходное напряжение относительно входного. Они также сохраняют возможность регулирования выходного напряжения в режиме холостого хода. *LCC*-ПП и *L-LC*-ПП позволяют регулировать выходное напряжение в широком диапазоне. Максимальное приращение коммутационной частоты при этом составляет 0,5 от собственной резонансной частоты контура (см. рис. 3, *a, з*).

LLC-ПП является наиболее экономичным при работе в широком диапазоне питающих напряжений [1], но диапазон регулирования выходного напряжения существенно сужен (см. рис. 3, *б*). Для понижения выходного напряжения вдвое необходимо увеличение коммутационной частоты в 6 раз по отношению к резонансной. Регулировочная характеристика *LCL*-ПП представляет собой промежуточный вариант между характеристиками *LCC*-ПП и *LLC*-ПП (см. рис. 3, *в*). Единственным достоинством *LC-L*-ПП является практически линейная регулировочная характеристика при равенстве сопротивления нагрузки и волнового сопротивления контура (см. рис. 3, *д*).

Каждый из резонансных контуров (см. рис. 1, *a–д*) имеет две резонансные частоты. Включение силовых вентилях при нуле напряжения обеспечивается для *LCC*-ПП при работе с коммутационной частотой выше большей резонансной, для *LLC*-ПП, *LCL*-ПП и *LC-L*-ПП — при работе с коммутационной частотой выше меньшей резонансной, для *L-LC*-ПП — между двумя резонансными частотами. Осциллограммы токов и напряжений, снятые в этих режимах, приведены на рис. 4, *a–д* соответственно. Напряжение на выходе инвертора на рисунках отмечено цифрой 1, колебания тока, протека-

ющего через ключи инвертора — цифрой 2, колебания тока, протекающего через ключи выпрямителя — цифрой 3.

В преобразователях с повышающими свойствами выключение силовых вентилях инвертора происходит при больших значениях резонансного тока (см. рис. 4, *a–з*). Наименьший размах колебаний резонансного тока наблюдается у *LLC*-ПП (0,8 А, рис. 4, *б*), наибольший — у *L-LC*-ПП (5,7 А, рис. 4, *з*). В *LCC*-ПП и *LCL*-ПП коммутируемые токи составляют соответственно 2,4 А и 2,2 А (рис. 4, *a, в*). При этом в *LCC*-ПП практически синусоидальная форма тока, протекающего через ключи инвертора и резонансную индуктивность, и существенно несинусоидальная форма тока, протекающего через выпрямитель.

В *LLC*-ПП форма тока в ключах инвертора и выпрямителя синусоидальная при работе на большей резонансной частоте. При работе выше большей резонансной частоты форма тока, протекающего через ключи инвертора, стремится к пилообразной. В диапазоне коммутационных частот между двумя резонансными, где обеспечиваются повышающие свойства преобразователя, форма тока кусочно-синусоидальная. Ток, протекающий через ключи выпрямителя, во всех режимах синусоидальный или кусочно-синусоидальный. В *LCL*-ПП ближе к синусоидальному выходной ток, ток в ключах инвертора пилообразный. В *LC-L*-ПП ток в параллельном РК синусоидальный. На выходе контура наблюдаются всплески тока в момент включения силовых вентилях, достигающие амплитуды 100 А (см. рис. 4, *д*).

ВЫВОДЫ

Проведенное моделирование показывает, что из описанных топологий ни одна не является универсальной. Можно выделить две области приме-

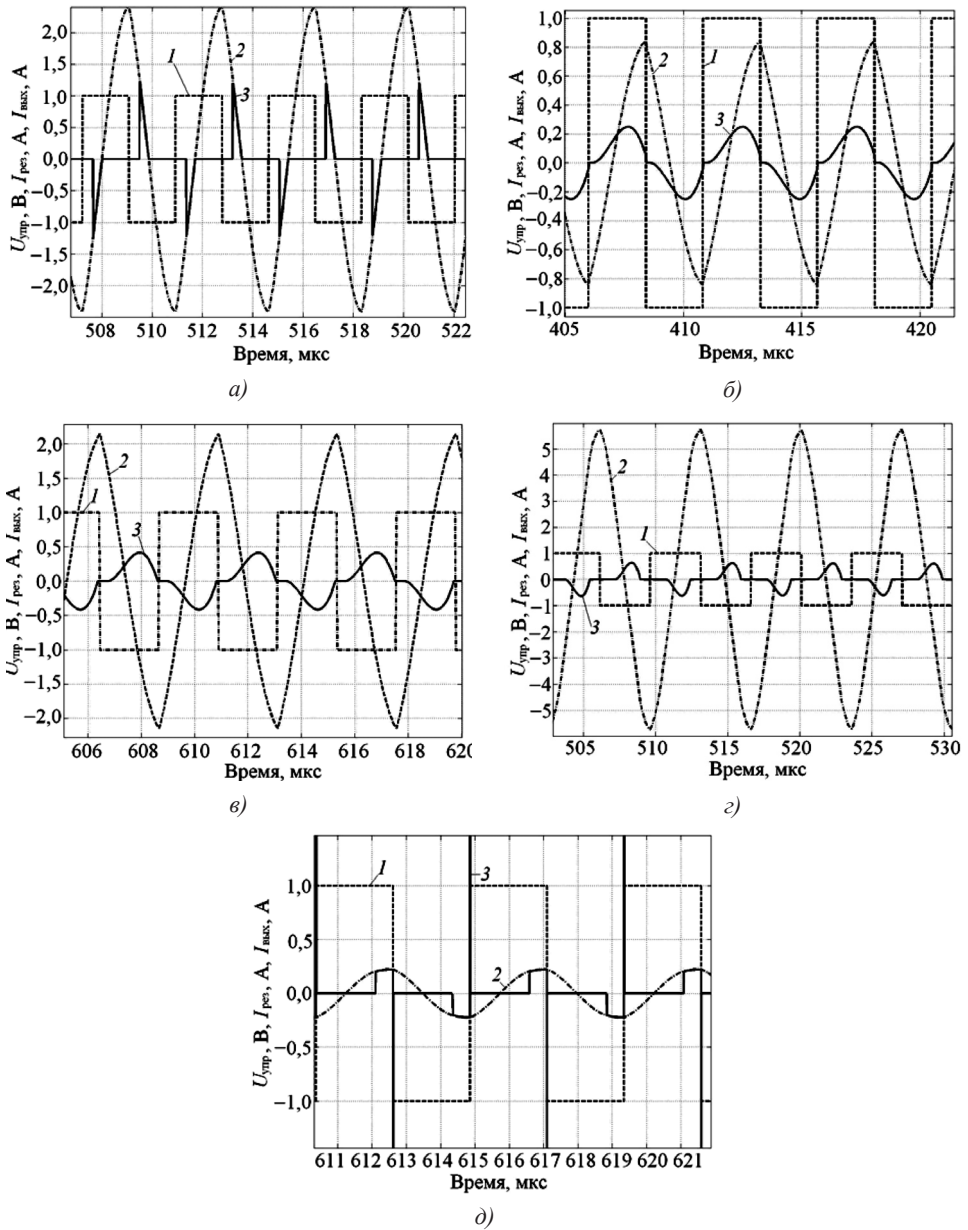


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжений в резонансных контурах: а — LCC-ПП; б — LLC-ПП; в — LCL-ПП; г — L-LC-ПП; д — LC-L-ПП

нения резонансных преобразователей с трехэлементными контурами: системы стабилизации питающего напряжения, предназначенные для работы в условиях перепадов напряжения в сети (питание систем связи, сбора, обработки

и передачи данных) и следящие системы, в которых требуется глубокое регулирование выходного напряжения (электроприводы постоянного тока и т. п.).

Для первого типа систем электропитания наиболее удобен LLC-ПП.

Этот преобразователь в рабочей точке (номинальное сетевое напряжение и номинальная величина нагрузки) может работать с коммутационной частотой, равной большей резонансной. При этом форма токов, протекающих через инвертор и выпрямитель, будет синусоидальной, величины коммутируемых токов — незначительными. В случае провала питающего напряжения коммутационная частота будет уменьшена, и преобразователь будет работать на участке регулировочной характеристики, где обеспечиваются повышающие свойства. Однако регулировать выходное напряжение в сторону понижения в данном преобразователе крайне неудобно, диапазон регулирования существенно сужен.

Для применения в системах второго типа наилучшими характеристиками обладает LCC-ПП. Данный преобразователь дает возможность регулирования выходного напряжения от 0 до 100% за счет повышения коммутационной частоты не более чем в 2 раза по сравнению с большей резонансной частотой. Он также позволяет повышать выходное напряжение относительно входного в 1,5–5 раз в зависимости от величины нагрузки (чем больше отношение сопротивления нагрузки к волновому сопротивлению резонансного контура, тем больше коэффициент усиления), обеспечивает регулирование выходного напряжения в режиме холостого хода и естественную защиту ключей от короткого замыкания на выходе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Павлов, Г.В.** Сравнение характеристик резонансных преобразователей при различных способах регулирования с использованием имитационных моделей [Текст] / Г.В. Павлов, А.В. Обрубов, Е.В. Никитина, Т.В. Щербинин // Технічна електродинаміка, тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». — 2010. — ч.1. — С. 97–102.
- [2] **Никитина, Е.В.** Резонансные преобразователи постоянного напряжения с фазовым регулированием [Текст] / Е.В. Никитина ; автореф. дисс. канд. техн. наук. — К. : НТУУ «КПИ», 2008. — 24 с.
- [3] **Yang, Bo.** Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System [Text] /Bo Yang. – Dissertation for the degree of Philosophy Doctor in Electrical Engineering. — Blacksburg, Virginia, 2003. — 316 p.