

УДК 621.31

MPPT-алгоритм управления частотными характеристиками как инструмент повышения энергоэффективности процесса бесконтактной магнитно-резонансной зарядки электротранспорта

Куркова О. П.

Постановка проблемы и частной задачи: Одной из перспективных технологий зарядки электротранспорта на сегодня признана бесконтактная магнитно-резонансная зарядка. Однако при внедрении бесконтактных зарядных устройств (БЗУ) возникают и должны быть решены две основные проблемы: обеспечение совместимости устройств различных разработчиков и производителей (в виду того, что БЗУ состоит из двух составных частей – стационарного «транслятора», располагаемого на зарядной площадке, и бортового «приемника») и обеспечение энергоэффективности. Исходя из физического принципа, который заложен в основу БЗУ, максимальный уровень транслируемой мощности может быть достигнут тогда, когда система в целом будет находиться в состоянии глобального резонанса. **Целью исследований являлась** разработка алгоритма управления частотными характеристиками БЗУ, позволяющего при сопряжении «транслятора» с бортовым «приемником» (в том числе отличающихся по типу и классу) автоматически определять значение глобальной резонансной частоты для фактического сопряжения, соответствующее максимальной мощности, которая может передаваться на бортовую нагрузку при зарядке транспортного средства. **Используемые методы и технологии:** для решения поставленной задачи при создании алгоритма использован метод «отслеживания точки максимальной мощности» (maximum power point tracking – MPPT); исследования по выявлению характера зависимостей выходной мощности, выходного напряжения и входного тока от частоты, а также проверки работоспособности алгоритма проводились на основе метода эквивалентного электрического моделирования физических процессов с построением моделей процессов, протекающих во время функционирования БЗУ, в виде эквивалентных электрических схем с использованием программного комплекса MATLAB/Simulink. Для формирования численных исходных данных для решения основной задачи применен метод предварительного расчетного конечно-элементного моделирования электромагнитных процессов и вариантов топологий резонансной компенсации с использованием программного комплекса COMSOL. **Новизна результата:** основной новизной результата исследований является MPPT-алгоритм управления частотными характеристиками БЗУ, созданный на базе эквивалентной электрической модели системы с замкнутым контуром и обратной связью, позволяющий при сопряжении «транслятора» с «приемником» автоматически определять значение глобальной резонансной частоты, соответствующее максимальной выходной мощности. **Практическая значимость:** разработанный MPPT-алгоритм может быть использован разработчиками БЗУ в качестве составной части алгоритма контроллера управления процессом зарядки как инструмент повышения энергоэффективности и обеспечения совместимости «трансляторов» и «приемников» различных производителей.

Ключевые слова: электротранспорт, бесконтактное зарядное устройство, магнитно-резонансная индукция, совместимость, энергоэффективность, резонанс, эквивалентная модель, алгоритм управления, метод отслеживания точки максимальной мощности.

Библиографическая ссылка на статью:

Куркова О. П. MPPT-алгоритм управления частотными характеристиками как инструмент повышения энергоэффективности процесса бесконтактной магнитно-резонансной зарядки электротранспорта // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 99-124. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-99-124

Reference for citation:

Kurkova O. P. MPPT algorithm frequency control as a tool for improving the energy efficiency of the process of contactless magnetic resonance charging of electric vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 4, pp. 99-124 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-99-124

Введение

В последние годы интерес к электромобилям превращается из экзотической моды в стойкую тенденцию развития транспортной сферы. Основной предпосылкой к этому является то, что автотранспорт с двигателями внутреннего сгорания создает в крупных городах обширные зоны с долей загрязнения воздуха в 70% – 90%. При этом многие сравнительные характеристики экологической эффективности показывают явное превосходство электротранспорта. Поэтому для внутригородского автотранспорта в ближайшее время нет более экологически чистой и недорогой альтернативы традиционным видам транспортных средств чем: электромобили, электроавтобусы, электроскутеры, электроприводные малотоннажные грузопассажирские транспортные средства и спецтехника ЖКХ. Тенденция перехода на экологически чистый электротранспорт на сегодня уже уверенно завоевывает не только сферу наземного транспорта, но и водного: грузопассажирские среднемагистральные электропаромы, пассажирские электрокатамараны можно увидеть на внутренних речных и морских транспортных магистралях.

Однако развитие электротранспорта требует параллельного создания и развития эффективной, безопасной и комфортной зарядной инфраструктуры. Для этих целей все большее предпочтение в последнее десятилетие отводится технологии и устройствам бесконтактной зарядки/подзарядки (БЗУ) автономных электротранспортных средств, основанным на принципе передачи энергии через воздушный зазор методом магнитно-резонансной индукции. На рис. 1 показана общая концептуальная блок-схема БЗУ.

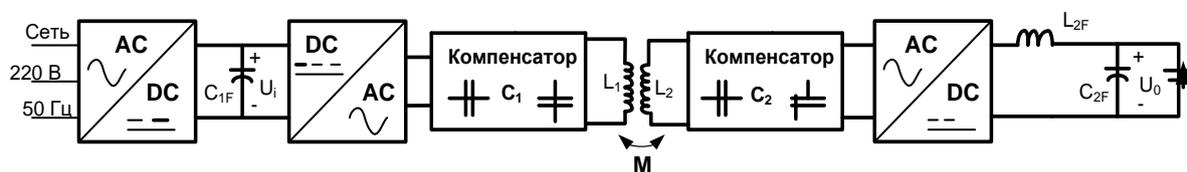


Рис. 1. Общая концептуальная блок-схема БЗУ

Как видно из рис. 1, БЗУ представляет собой систему в виде двух разомкнутых контуров, состоящую из двух основных составных частей: стационарной части – «транслятора», располагаемой на зарядной площадке, и бортовой части – «приемника», интегрированного с бортовым «накопителем» (модулем аккумуляторных батарей). Передача энергии осуществляется через воздушный зазор между катушками индуктивности «транслятора» и «приемника» при их совмещении и достижении состояния резонанса между обоими контурами системы, обеспечиваемого модулями емкостной компенсации. При этом различными разработчиками БЗУ могут использоваться различные схемы топологий компенсации из четырех основных возможных: последовательная (SS), параллельная (PP), последовательно-параллельная (SP) или параллельно-последовательная (PS). Результаты исследования эффективности различных топологий компенсации детально представлены в работе [1].

На практике при внедрении БЗУ одновременно возникают две основные проблемы: обеспечение совместимости устройств различных разработчиков и

производителей (в виду того, что БЗУ состоит из двух составных частей – стационарного «транслятора» и бортового «приемника») и обеспечение энергоэффективности при передаче мощности в процессе зарядки.

Известно, что эффективность передачи энергии посредством БЗУ зависит от многих факторов, таких как:

- соответствие классов «транслятора» и «приемника» БЗУ по номинальной выходной мощности;
- соответствие геометрической конфигурации катушек индуктивности «транслятора» и «приемника»;
- величина воздушного зазора между первичной («транслятора») и вторичной («приемника») обмотками индуктивности;
- асимметрия центровки катушек индуктивности «транслятора» и «приемника».

С теоретической точки зрения, в целом любое БЗУ включает две основные функциональные составные части:

- катушечная система (так называемый «Tesla-pack»);
- система электроники.

Для обеспечения совместимости «транслятора» и «приемника» при использовании технологии передачи энергии методом бесконтактной магнитно-резонансной индукции должны одновременно обеспечиваться их магнитная и электрическая совместимости. В работе [2] автором подробно представлена разработанная им методика и критерии оценки совместимости БЗУ различных классов, которая может быть использована разработчиками при создании БЗУ для повышения уровня унификации.

Исходя из физического принципа, который заложен в основу БЗУ, максимальный уровень транслируемой мощности должен достигаться тогда, когда система устройства в целом будет находиться в состоянии глобального резонанса. Поэтому одной из задач при разработке БЗУ всегда являлась задача определения номинального значения частоты резонанса для конкретного создаваемого конструктивного типа устройства, при котором будет обеспечена требуемая выходная мощность с требуемым уровнем КПД. При этом требования, установленные международной нормативной документацией IEC и ISO, из соображений безопасности ограничивают верхний предел диапазона допускаемых к применению в БЗУ частот (85 кГц), а сточки зрения эффективности – нижний предел уровня КПД БЗУ (85%) [3, 4].

С точки зрения номинального значения частоты резонанса проводились предыдущие исследования авторами работ [1] и [2], а также авторами, на которые есть ссылки в этих работах.

Однако при фактическом сопряжении конструктивно отличных «транслятора» и «приемника» различных производителей, а также при различных фактических условиях их сопряжения (например, при различных условиях парковки транспортного средства), когда коэффициент сцепления между катушками индуктивности «транслятора» и «приемника» будет отклоняться относительно номинального значения, глобальная частота резонанса, при которой может

быть обеспечен максимальный уровень передаваемой мощности, будет также отличаться от номинального значения, что приведет к снижению эффективности процесса. В связи с этим с целью повышения эффективности процесса видится необходимость обеспечения оперативного определения и подстройки значения частоты глобального общесистемного резонанса относительно номинального проектного значения перед началом каждого процесса зарядки транспортного средства непосредственно при фактическом сопряжении «транслятора» и «приемника» на зарядной площадке.

Таким образом, поскольку в основе функционирования БЗУ лежит процесс резонансного электромагнитного преобразования, позволяющего передавать мощность от сети переменного тока к нагрузке постоянного тока (бортовому «накопителю»), то процесс оперативного регулирования и оптимизации частотных характеристик системы может являться одним из инструментов управления передаваемой устройством на нагрузку мощности и эффективностью БЗУ в целом. Эта задача может быть решена посредством создания специального алгоритма нахождения точки максимальной мощности (maximum power point tracking – MPPT) в зависимости от частоты, который должен являться составной частью комплексного алгоритма управления процессом зарядки и БЗУ.

Анализ состояния вопроса

Некоторые разработчики (например, J.T. Boys со своими коллегами из Калифорнийского университета; G. Meunier с коллегами из Лаборатории электрики G2ELab Французского Национального центра исследований) предлагают технические решения по регулировке выходной мощности БЗУ за счет устройств, обеспечивающих возможность управления контуром питания – управления выходной мощностью за счет изменения входного напряжения на первичной стороне [5, 6]. Однако эти технические решения вызывают необходимость добавления в цепи первичной (на стороне «транслятора») и вторичной (на стороне «приемника») сторон БЗУ дополнительных электротехнических и электронных компонентов, включая коммуникационные контроллеры, что не только усложняет конструкцию, но и увеличивает габариты (что особенно не предпочтительно для бортового «приемника»). Поэтому в процессе исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, рассматривался только вариант, когда входное напряжение является постоянным.

Рядом авторов, например, V.J. Brusamarello и Y.B. Blauth из Департамента электротехники Федерального университета Рио-Гранде-ду-Сул совместно с R. Azambuja из Центра робототехники и нейронных систем Плимутского университета при создании БЗУ аккумуляторов системы климат-контроля герметичного контейнера для перевозки фруктов в процессе экспериментальных исследований использовалось устройство схожее с устройством «MPPT-контроллер» [7, 8]. Данное устройство использовалось исследователями в составе измерительно-испытательного стенда и представляло собой два микроконтроллера (один на первичной и один на вторичной стороне БЗУ), скоммутированные между собой беспроводной связью по радиоканалу. Задача исследо-

ваний заключалась в косвенном экспериментальном поиске резонансных частот создаваемого БЗУ и решалась путем проведения экспериментальных исследований взаимозависимостей коэффициента сцепления первичной и вторичной обмоток индуктивности и передаваемой мощности при автономно задаваемом, но изменяемом с определенным шагом, значении частоты. Изменения значений частоты осуществлялось контроллером на первичной стороне синхронно с фиксацией изменений значений измеряемой мощности на нагрузке на вторичной стороне путем передачи по радиоканалу сигнала на управляющий контроллер первичной стороны, т.е. устройство в целом было построено по принципу замкнутого контура. Таким образом, специалистами университетов по максимальной зафиксированной мощности на нагрузке фиксировалось значение соответствующей ему частоты, которое и принималось как значение, соответствующее условиям глобального резонанса. Однако применяемое ими устройство нельзя классифицировать как МРРТ-контроллер в чистом виде и использовать в качестве инструмента управления энергоэффективностью и обеспечения совместимостью БЗУ, так как значения частоты были заранее заданы, а не определялись путем выполнения оперативного пересчета.

Изначально метод МРРТ стал широко использоваться при создании и исследовании фотоэлектрических модулей, прежде всего, солнечных батарей (СБ). Известно, что генерируемая мощность СБ зависит от таких факторов как: уровень освещенности, температура нагрева и запыленности СБ, которые изменяются в процессе эксплуатации с изменением времени суток, смены сезонных климатических условий и т.д. В связи с этим для СБ параметры вольт-амперных характеристик (ВАХ) являются функциями, изменяемыми во времени. При уменьшении освещенности или повышении температуры нагрева ВАХ понижаются, снижается уровень генерируемой мощности относительно номинального значения, определенного для нормальных условий эксплуатации СБ. Несмотря на то, что в качестве КПД СБ принимается отношение выходной мощности к мощности солнечного излучения, все СБ имеют определенный закладываемый при их проектировании компенсационный запас по напряжению, изначально предусматриваемый для зарядки различных типов аккумуляторов. Управление и регулировка уровнями напряжения и тока осуществляется контроллером заряда, входящим в состав устройства СБ. Применение дополнительно МРРТ-контроллеров в устройствах СБ направлено на максимально возможное сохранение их эффективности, несмотря на вынужденные изменения условий эксплуатации. Задачей МРРТ-контроллеров в этом случае является обеспечение анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) устройства и поиска на ВАХ точки, в которой произведение тока и напряжение имеет максимальное значение – точки максимальной мощности для конкретного временного момента и условий эксплуатации СБ, под значения параметров которой может осуществляться подстройка по напряжению в рамках имеющегося проектного запаса.

Во всех выпускаемых в настоящее время МРРТ-контроллерах для фотоэлектрических модулей СБ используют два основных вида МРРТ-алгоритмов работы: либо основанных на так называемом методе «возмущать и наблюдать»

(«Perturb and Observe» – «P&O»), либо – на методе «сканируйте и удерживайте» («Scan and Hold» - «S&H») [9, 10]. При использовании того и другого метода результирующая информация МРРТ-контроллером обновляется через определенные фиксированные интервалы «счетчика времени». При использовании метода «P&O» в процессе функционирования СБ проводится периодическое (как правило, в интервале от одной минуты до четырех часов) полное сканирование всей ВАХ СБ. МРРТ-контроллер, анализируя данные сканирования ВАХ, осуществляет вычисления и находит точку максимальной мощности. В период до следующего сканирования МРРТ-контроллер как бы «рыщет» вокруг этой точки, вычисляя изменения мощности, затем дает команду на сдвиг «рабочей точки» на новое напряжение, если при нем найденная контроллером мощность больше. При использовании метода «S&H» после первичного сканирования напряжение устанавливается на уровне найденной точки максимальной мощности и поддерживается постоянным до следующего сканирования ВАХ. Таким образом, и алгоритм, основанный на методе «P&O», и алгоритм, основанный на методе «S&H», работают по определенному «счетчику времени». Оба эти вида алгоритмов имеют определенные недостатки: прежде всего, применение того и другого метода вызывает необходимость прерывания генерации энергии, тот и другой метод в качестве исходной точки для осуществления сравнительного анализа использует значения параметров «точки нуля». При использовании «P&O» прерывания происходят более часто, чем при «S&H», несмотря на то, что производители МРРТ-контроллеров стараются подобрать оптимальные варианты параметров поиска – глубину и частоту итераций, периодичность сканирования. Сравнительный анализ, осуществляемый относительно «точки нуля», приводит к нарастающему увеличению погрешности результатов вычислений. В последнее время в некоторых МРРТ-контроллерах СБ используется алгоритм работы на основе так называемого метода «постоянного напряжения» («Hold Input V»), когда «рабочая точка» определяется по напряжению, пересчитываемому через определенные интервалы времени относительно напряжения холостого хода СБ с заранее заданным повышающим коэффициентом, значения которого может приниматься от нуля до единицы. Использование данного метода значительно сокращает объем измерений, сокращает количество прерываний процесса генерации энергии, однако далеко не обеспечивает желаемой точности. Для фотоэлектрических модулей СБ была попытка построить МРРТ-алгоритм на базе так называемого «температурного» метода, основанного на данных измерений изменения температуры нагрева панелей СБ, уйдя от анализа непосредственно изменений ВАХ [9, 10]. Однако широкого распространения он не получил в виду низкой точности результата из-за наличия воздействия на состояние и процесс функционирования СБ различных дополнительных внешних факторов, которые практически невозможно учесть в структуре МРРТ-алгоритма.

В последнее время кроме классических МРРТ-алгоритмов, используемых в МРРТ-контроллерах для фотоэлектрических модулей СБ, описание которых кратко приведено выше, в литературе встречаются описания различных уникальных МРРТ-алгоритмов для других конкретных сфер применения, напри-

мер, для генераторов ветроустановок, электродвигателей, работающих в режиме рекуперации и т.д., обладающих также определенными конкретными преимуществами и недостатками [11, 12, 13]. Все эти МРРТ-алгоритмы ориентированы на обеспечение анализа ВАХ соответствующего устройства, на основании результатов которого устройством путем изменения отбираемого тока обеспечивается отбор от источника максимальной мощности. При этом во всех этих алгоритмах используется классический подход «счетчика времени» рабочих циклов и «точки нуля» для сравнительного анализа. На практике все эти МРРТ-алгоритмы реализуются посредством специальных МРРТ-контроллеров, программируемых в соответствии с МРРТ-алгоритмами и интегрируемых в инверторы соответствующих устройств.

Как видно из приведенного выше описания МРРТ-алгоритмов, все они не приемлемы для решения задачи управления оперативной подстройкой частоты резонанса БЗУ. Для решения данной задачи необходим МРРТ-алгоритм, функционально взаимосвязывающий выходную мощность (выходное напряжение, выходной ток) на стороне «приемника» с рабочей (коммуникационной) частотой, задаваемой инвертором на стороне «транслятора» БЗУ. Не смотря на то, что причинами снижения выходной мощности относительно номинального значения является изменение коэффициента сцепления обмоток «транслятора» и «приемника», что может быть вызвано такими факторами как: отклонение центровки при неточности парковке транспортного средства, различия конфигураций обмоток «транслятора» и «приемника», отличие величины фактического воздушного зазора между обмотками относительно номинального значения и т.д., сохранение уровня максимальной выходной мощности (эффективности БЗУ) в процессе зарядки транспортного средства может быть обеспечено путем подстройки рабочей частоты до уровня, соответствующего точке максимальной мощности (условиям глобального резонанса) без изменения уровня входного напряжения и входного тока. Точка максимальной мощности при этом должна определяться единомоментно перед началом цикла зарядки при парковке на зарядную площадку каждого конкретного транспортного средства, а не в соответствии со «счетчиком времени».

Таким образом, задача создания МРРТ-алгоритма управления частотными характеристиками БЗУ, позволяющего при сопряжении «транслятора» с бортовым «приемником» автоматически определять значение глобальной резонансной частоты для конкретного фактического сопряжения, поставленная для решения в рамках исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, является не только актуальной, но и новой в научно-техническом плане. Решения подобной задачи ранее не представлялись в научно-технических публикациях.

Цель исследования и постановка задач

Целью исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, являлось создание алгоритма управления частотными характеристиками БЗУ, позволяющего при сопряжении «транслятора» с бортовым «приемником» (в том числе отличающихся по типу и классу) автоматически определять значе-

ние глобальной резонансной частоты для фактического сопряжения, соответствующее максимальной мощности, которая может передаваться на бортовую нагрузку при зарядке транспортного средства.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие частные задачи:

- исследовать и установить характер зависимостей выходной мощности (P_0), выходного напряжения (U_0) и входного тока (I_i) от частоты при условии постоянного входного напряжения;
- для выявления характера указанных выше зависимостей разработать модели и осуществить моделирование процесса управления частотными характеристиками системы БЗУ;
- разработать (на основе результатов моделирования) алгоритм управления частотными характеристиками для автоматического определения значения глобальной резонансной частоты всей системы БЗУ в комплексе, соответствующего максимально возможной мощности, передаваемой от стационарного «транслятора» к бортовой нагрузке транспортного средства, который мог бы быть использован разработчиками БЗУ в качестве составной части алгоритма контроллера управления процессом зарядки и служить инструментом повышения энергоэффективности БЗУ.

Методы и технологии исследований

Для проведения исследований была принята наиболее часто применяемая топология БЗУ с последовательной компенсацией (SS) – рис. 2.

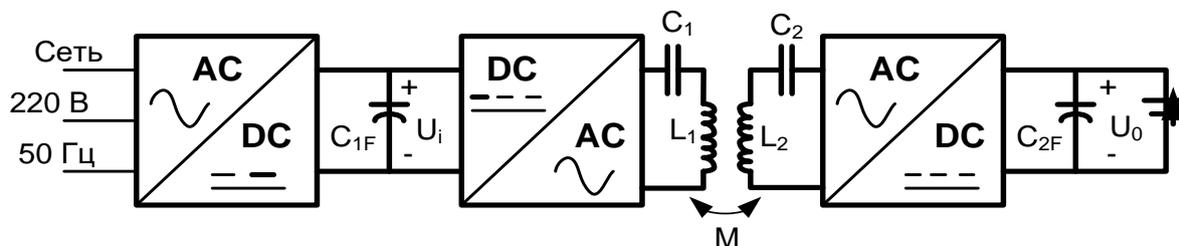


Рис. 2. Блок-схема БЗУ с топологией последовательной компенсации (SS)

Для моделирования процесса управления частотой с целью достижения максимальной передаваемой БЗУ на нагрузку мощности использовался общеизвестный метод электрического моделирования физических процессов [14]. Модели процессов преобразований и трансляции энергии посредством БЗУ представлялись в виде эквивалентных электрических схем. При проведении исследований и для разработки алгоритма управления был применен метод «отслеживания точки максимальной мощности» (maximum power point tracking – MPPT). Для моделирования процесса управления частотой с целью достижения максимальной передаваемой мощности использовался специально разработанный алгоритм, встроенный в функциональную структуру программного комплекса MATLAB. Вся система БЗУ, представленная в виде схемы (рис. 2), мо-

делировалась с использованием программного комплекса MATLAB/Simulink. Моделирование осуществлялось в определенной временной области.

В процессе исследований система БЗУ рассматривалась последовательно в двух вариантах: как система разомкнутого контура и как система замкнутого контура.

Результаты исследований

Как сказано выше, исследования проводились в два этапа.

На первом этапе для исследования изменений состояний БЗУ устройство рассматривалось как система с разомкнутым контуром. В процессе исследований на данном этапе учитывался процесс резонансного преобразования DC-DC (как показано на схеме рис. 2), т.е. учитывался переход через емкость C_{1F} . Также рассматривались варианты преобразования DC/AC и AC/DC.

На практике переход преобразования DC/AC может быть обеспечен полномостовым инвертором типа IGBT или MOSFET. Переход преобразования AC/DC – полномостовым выпрямителем на базе DIODEs, подключаемым к конденсатору C_{2F} , поддерживающему выходное DC напряжение U_o , подаваемое на нагрузку. Преимуществом такого концептуального подхода к построению схемы для моделирования БЗУ является возможность реализации стратегии управления каждым преобразователем. При этом в процессе моделирования рассматривались два типа нагрузки: модель «резистивная нагрузка (R_L)» и нагрузка как источник напряжения V_{bat} с неким внутренним резистором R_{int} (модель «батарея»).

На рис. 3 показаны модели процессов электрических преобразований в виде эквивалентных электрических схем для двух вариантов нагрузки, использованные для дальнейшего расчетного моделирования.

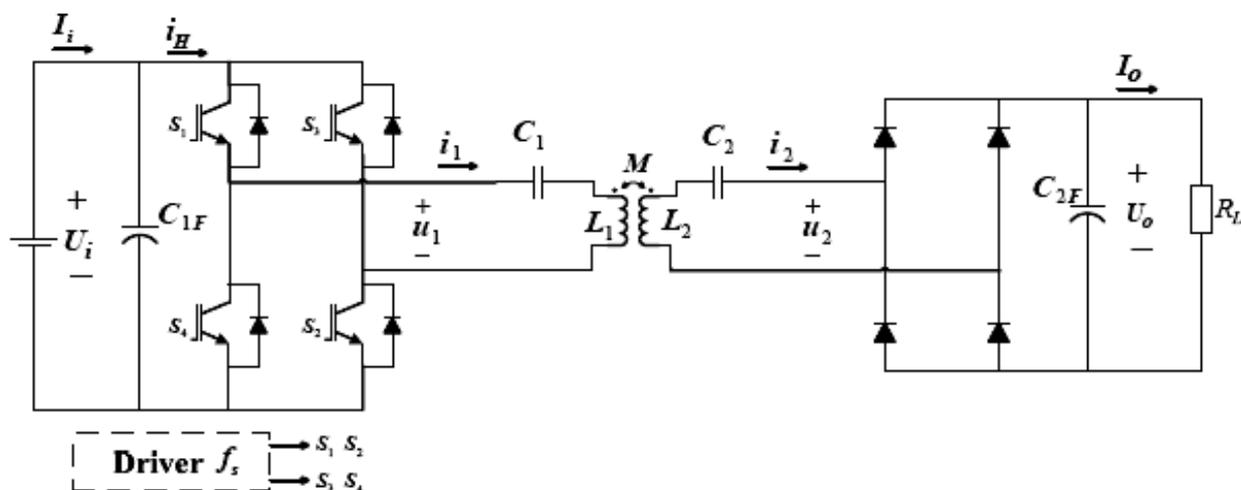
Для моделирования были приняты следующие исходные данные, характеризующие систему, полученные в том числе и на основании предварительного расчетного конечно-элементного моделирования электромагнитных процессов и вариантов топологий резонансной компенсации с использованием программного комплекса COMSOL:

- воздушный зазор – $d=150$ мм;
- смещение осей первичной и вторичной обмоток – $sh=0$;
- самоиндукции и взаимная индукция первичной и вторичной обмоток индуктивности – $L_1=266,16$ мкГн; $L_2=256,79$ мкГн; $M=85,46$ мкГн;
- рабочая частота инвертора и частота резонанса – $f_s=f_0=30$ кГц;
- выходное напряжение и выходная мощность $U_o=400$ В; $P_o=3$ кВт;
- $R_L=53,32$ Ом;
- $U_i \approx 170$ В;
- $C_1=105,74$ нФ; $C_2=109,6$ нФ;
- $C_{1F}=C_{2F}=300$ мкФ.

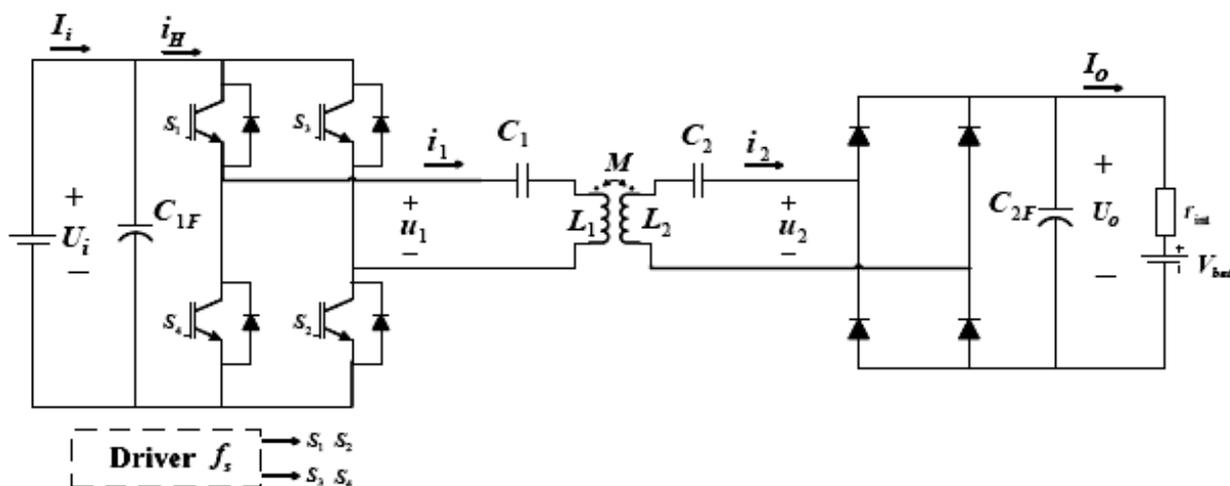
Кроме того, было принято, что рабочий цикл инвертора – $D=0,5$.

Параметры аккумуляторной батареи: $r_{int}=0,1$ Ом, $V_{bat}=400$ В.

Результаты моделирования представлены на рис. 4 и на рис. 5, где показаны формы сигналов первичных и вторичных токов и напряжений, а также выходных напряжений и токов нагрузки соответственно. Как видно из данных, представленных на рисунках, токи находятся в фазе с напряжениями на каждой из сторон БЗУ и не совпадают по фазам друг относительно друга. В случае, когда нагрузка рассматривается как «батарея» (рис. 3б и рис. 5) появляются пульсации сигналов по выходным току и напряжению, в то время как в случае резистивной нагрузки (рис. 3а и рис. 4) пульсации не проявляются. Причиной этому является внутреннее последовательное сопротивление «батареи» (r_{int}), которое много меньше сопротивления R_L ($R_L \gg r_{int}$). Поэтому соотношение постоянных времени (τ_L и τ_{int}) также имеет вид: $\tau_L = R_L C_{2F} \gg r_{int} C_{2F}$.

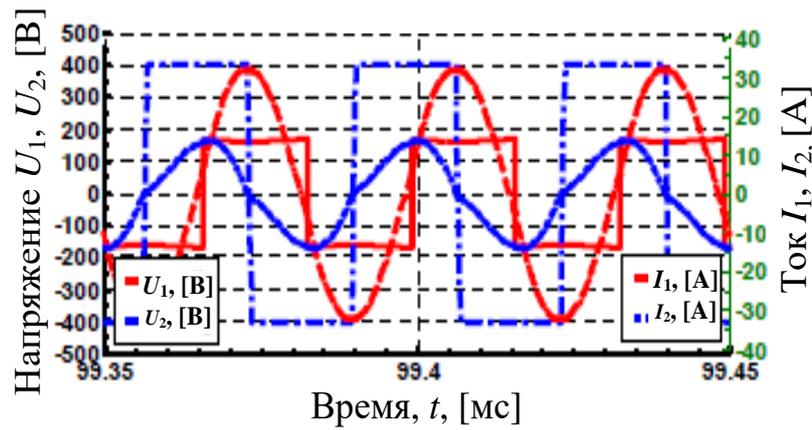


а)

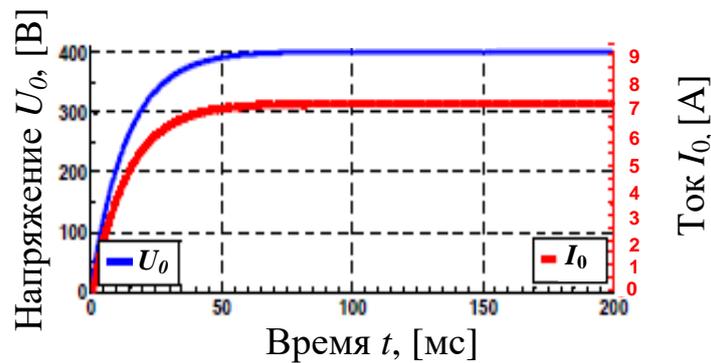


б)

Рис. 3. Модели процессов электрических преобразований в виде эквивалентных электрических схем БЗУ:
а) модель «резистивная нагрузка», б) модель «батарея»



а)



б)

Рис. 4. Результаты моделирования БЗУ – схема с резистивной нагрузкой R_L (схема на рис. 3а): а) первичные ($U_1; I_1$) и вторичные ($U_2; I_2$) напряжение и ток; б) напряжение и ток на выходе ($U_0; I_0$)

Для модели рис. 3б накладывается и выполняется следующее соотношение:

$$I_0 = \frac{U_0 - V_{bat}}{r_{int}}. \quad (1)$$

Значение первичной основной составляющей выходного напряжения инвертора $u_1(t)$ можно задать как

$$v_1(t) = \frac{4}{\pi} U_i \sin(\pi D) \sin(\omega_s t), \quad (2)$$

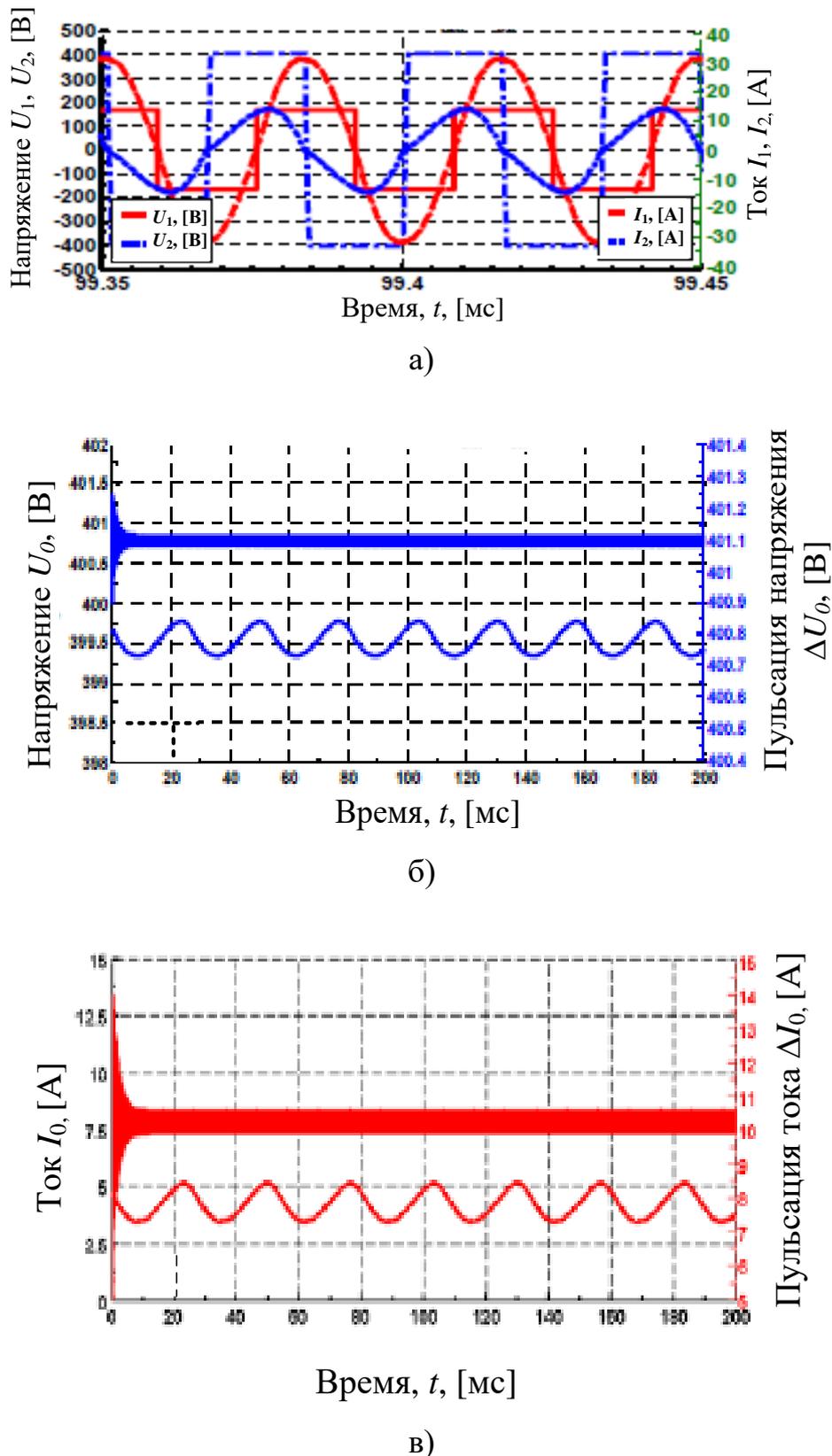
где D – рабочий цикл инвертора.

Первичный выходной ток можно выразить как

$$i_1(t) = I_1 \sin(\omega_s t - \varphi_s), \quad (3)$$

где φ_s – угол сдвига фазы между выходным напряжением инвертора $v_1(t)$ и входным первичным током $i_1(t)$, а I_1 можно найти как

$$I_1 = \left| \frac{v_1}{Z_{in}} \right|. \quad (4)$$



Среднее значение входного тока инвертора $i_H(t)$ можно найти как

$$\langle i_H(t) \rangle_{T_S} = I_H = \frac{2}{T_S} \int_0^{T_S/2} i_H(t) dt = \frac{2}{\pi} I_1 \cos(\varphi_S). \quad (5)$$

Данные выражений (2-5) можно представить в виде иллюстрации форм сигналов, что показано на рис. 6.

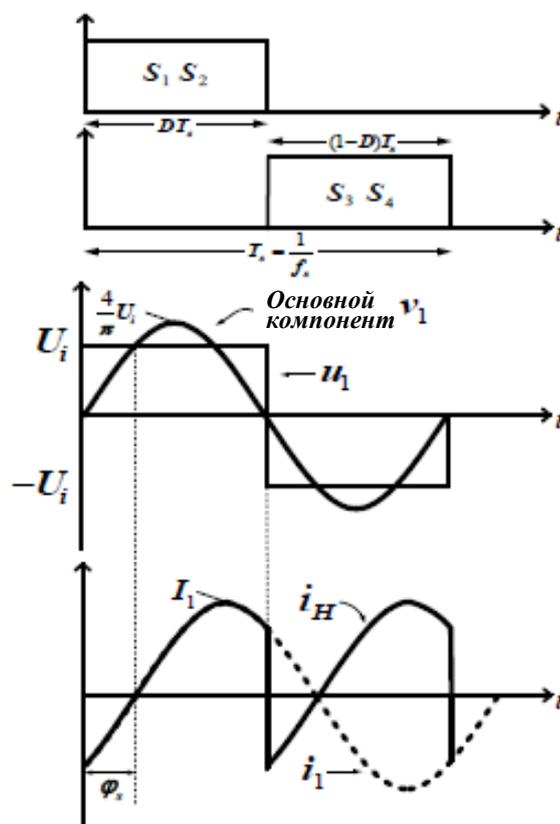


Рис. 6. Иллюстрация форм сигналов: выходное напряжение инвертора, входной и выходной токи инвертора

При резонансе выходное напряжение инвертора $v_1(t)$ и входной первичный ток $i_1(t)$ находятся в фазе, т.е. $\varphi_S=0$, а $\cos(\varphi_S)=1$. Что означает, что осуществляется передача максимально возможной мощности. Следовательно, частота инвертора должна регулироваться в соответствии с резонансной частотой системы.

На втором этапе исследований БЗУ рассматривалось как система с замкнутым контуром. Во время зарядки конструкция БЗУ должна обеспечивать автоматическое регулирование основных параметров процесса. Одним из основных параметров является рабочая (коммуникационная) частота драйвера инвертора (f_s). Чтобы достигалась максимальное значение передаваемой мощности, должно быть обеспечено состояние глобального резонанса замкнутой системы, т.е. чтобы $f_s=f_0$, где f_0 – глобальная резонансная частота всей системы. Регулировка частоты при этом должна осуществляться с учетом условия постоянного входного напряжения.

На рис. 7 представлена блок-схема БЗУ в виде системы замкнутого контура. На рис. 8 представлена модель процесса электрических преобразований в виде эквивалентной электрической схемы БЗУ как системы с замкнутым контуром и частотным регулятором, использующим алгоритм МРРТ. На рис. 9 представлена разработанная в рамках проведенных исследований блок-схема МРРТ-алгоритма, используемого для управления частотой.

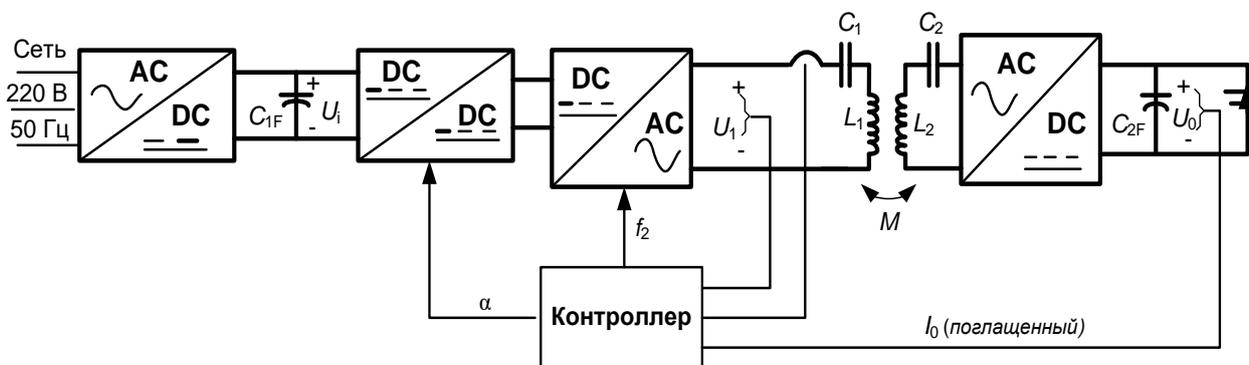


Рис. 7. Блок-схема БЗУ в виде системы замкнутого контура с контроллерами частоты и мощности

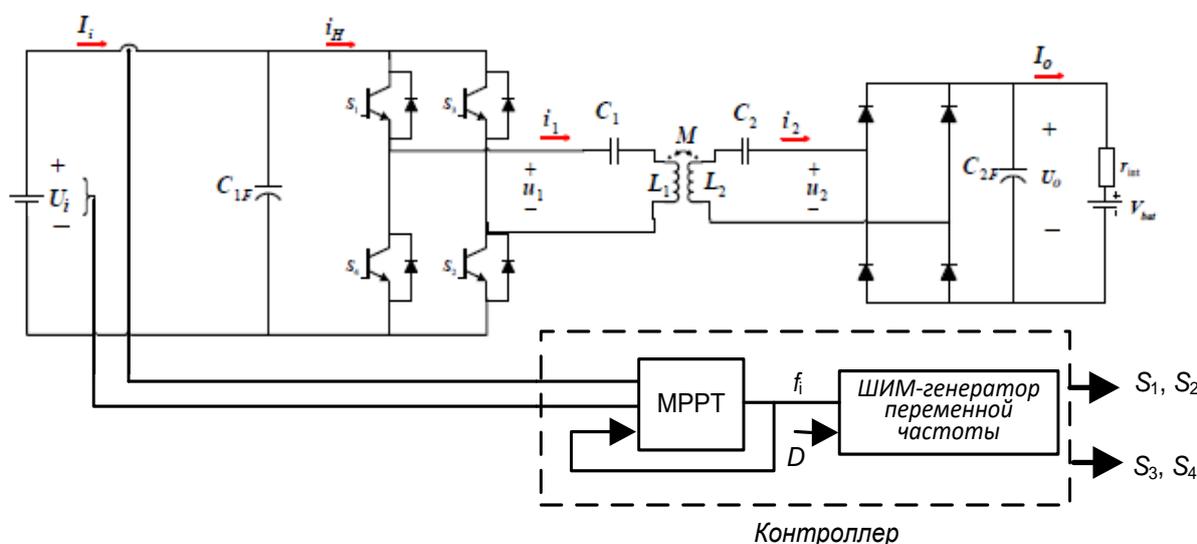


Рис. 8. Модель процесса электрических преобразований в виде эквивалентной электрической схемы БЗУ как системы с замкнутым контуром и частотным регулятором, использующим МРРТ-алгоритмы

Как видно из структуры эквивалентной модели (рис. 8), МРРТ-алгоритм может использовать обратную связь первичного тока и напряжения. Реальная мощность должна рассчитываться по форме АС сигналов, которые формируются до реализации МРРТ-алгоритма. Чтобы найти реальную мощность с учетом обратной связи необходимо осуществить расчет угла сдвига фаз φ_s . Таким образом, предлагаемый метод управления мощностью, основанный на МРРТ-алгоритме, может быть использован в качестве инструмента коррекции коэф-

фициента мощности (Pf). Реактивная мощность в этом случае устраняется. Процедура МРРТ может быть упрощена.

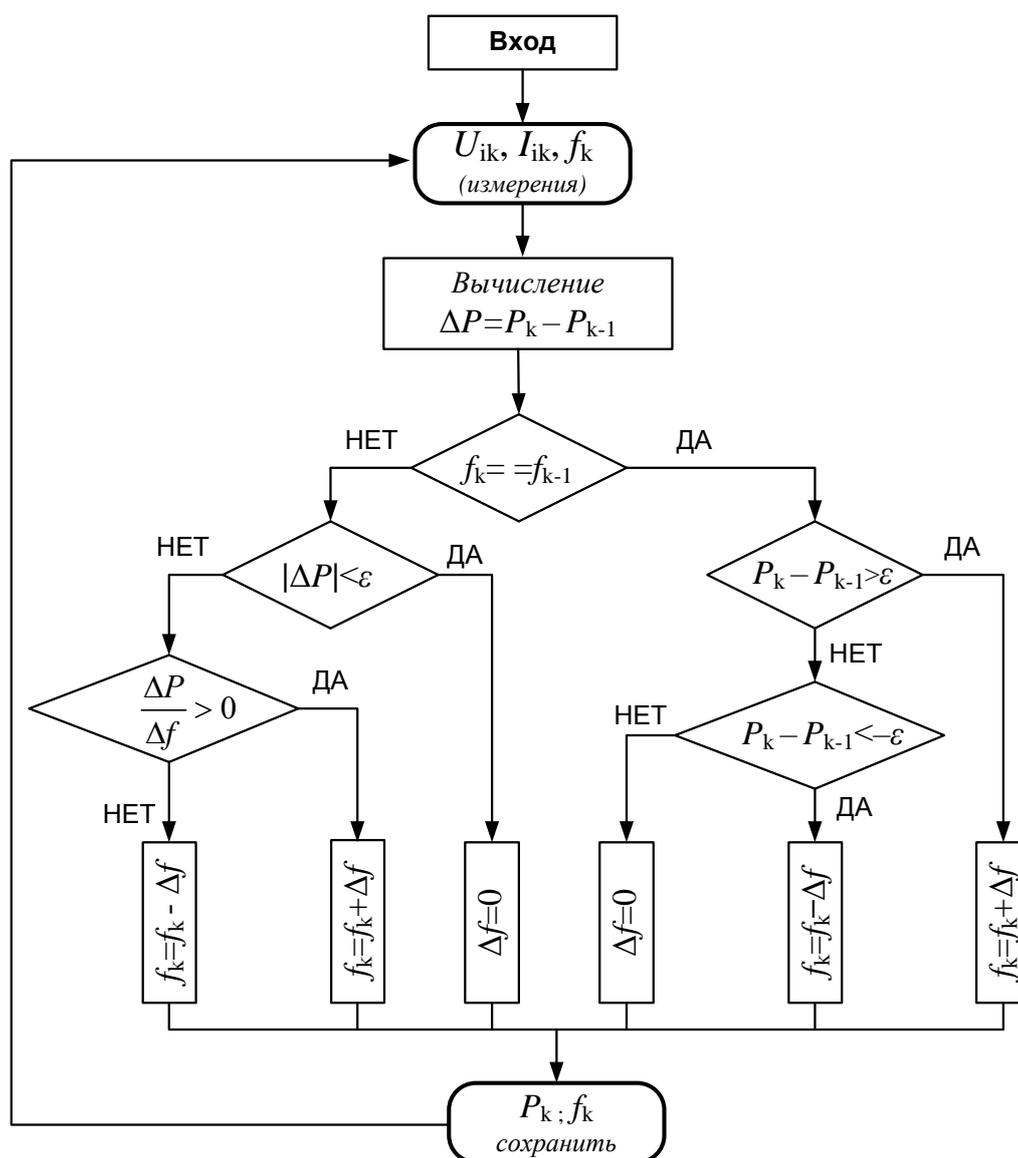


Рис. 9. Блок-схема МРРТ-алгоритма, используемого для управления частотой, где: k – порядковый номер итерации; $P_k = U_{ik}I_{ik}$; $\Delta P = P_k - P_{k-1}$; $\varepsilon = 1$; $\Delta f = 100$ Гц (если частота фиксированная и не установлено значение ноль)

Основная идея состоит в том, чтобы использовать обратную связь ДС от входной части системы БЗУ, аналогично, как это используется в фотоэлектрических системах при реализации процедуры МРРТ. Тогда процедура может осуществляться следующим образом. Входное ДС напряжение (U_i) и ДС входной ток (I_i) используются для расчета ДС входной мощности, поступающей на МРРТ-алгоритм. Затем МРРТ-алгоритм вычислит для каждой многократно повторяющейся итерации мощность и выдаст значение частоты в качестве выходного сигнала. Далее значение полученной частоты передается PWM-генератору или VCO-генератору для получения командных сигналов выключателей пита-

ния инвертора. Процедура продолжается до тех пор, пока не будет найдена максимальная точка мощности.

В МРРТ-алгоритме, представленном на рис. 9, принято, что производная мощности по частоте равна нулю, т.е. $dP/df=0$, а также то, что левее точки МРР расположена область $dP/df > 0$; правее точки МРР – область $dP/df < 0$. Таким образом видно, что в нашем МРРТ-алгоритме (по сравнению с классическими МРРТ-алгоритмами, описание которых представлено в разделе «Анализ состояния вопроса» настоящей статьи) «счетчик времени» рабочих циклов заменен на частоту. Наблюдение за мощностью (поиск точки МРР) осуществляется путем сравнения значения мощности на текущей итерации со значением мощности на предыдущей итерации, т.е. для осуществления сравнительного анализа не используется «точка нуля». При этом последовательное нахождение разницы ΔP как $(P_k - P_{k-1})$ обеспечивает более высокую точность вычислений при большем количестве итераций, чем если бы сравнение значений мощности осуществлялось относительно «точки нуля». Разработанный МРРТ-алгоритм для БЗУ предусматривает условия определенных ограничений, определяемых диапазоном между минимальным и максимальным (допустимым нормативной документацией для БЗУ с точки зрения безопасности) значениями частот [3, 4].

На рис. 10-15 представлены результаты моделирования с использованием алгоритма МРРТ, приведенного на рис. 9.

Для моделирования использовались следующие исходные данные:

- воздушный зазор – $d=150$ мм;
- смещение осей первичной и вторичной обмоток – $sh=0$;
- требуемая передаваемая мощность на нагрузку – 3 кВт;
- резонансная частота – ≈ 30 кГц;
- рабочий цикл инвертора – $D=0,5$;
- выборка осуществлялась по полосе частот – от 25 кГц до 35 кГц.

Из представленных результатов (рис. 10 и рис. 12) видно, что при отслеживании МРР система достигает требуемой мощности на выходе (3 кВт) при резонансной частоте 30 кГц с отклонением 100 Гц, что вполне допустимо.

Данные, представленные на рис. 10-13, получены при условии постоянного входного напряжения. Как видно из рис. 11 и рис. 13 изменения значений входного тока и выходного напряжения носят идентичный характер, при этом изменения напряжения «батареи» не существенны.

В целом результаты моделирования (рис. 10-13) подтверждают, что изменение частоты может служить инструментом для управления выходной мощностью.

В дополнение к результатам, представленным на рис. 10 и рис. 11 (аналогично при начальной частоте 26 кГц) на рис. 16 показан характер полученной циклограммы изменений первичного напряжения (U_1) и тока (i_1). Из рис. 16 видно, что значение частоты, найденное посредством алгоритма МРРТ, точно соответствует состоянию резонанса – фаза между сигналами напряжения U_1 и тока i_1 практически равна нулю.

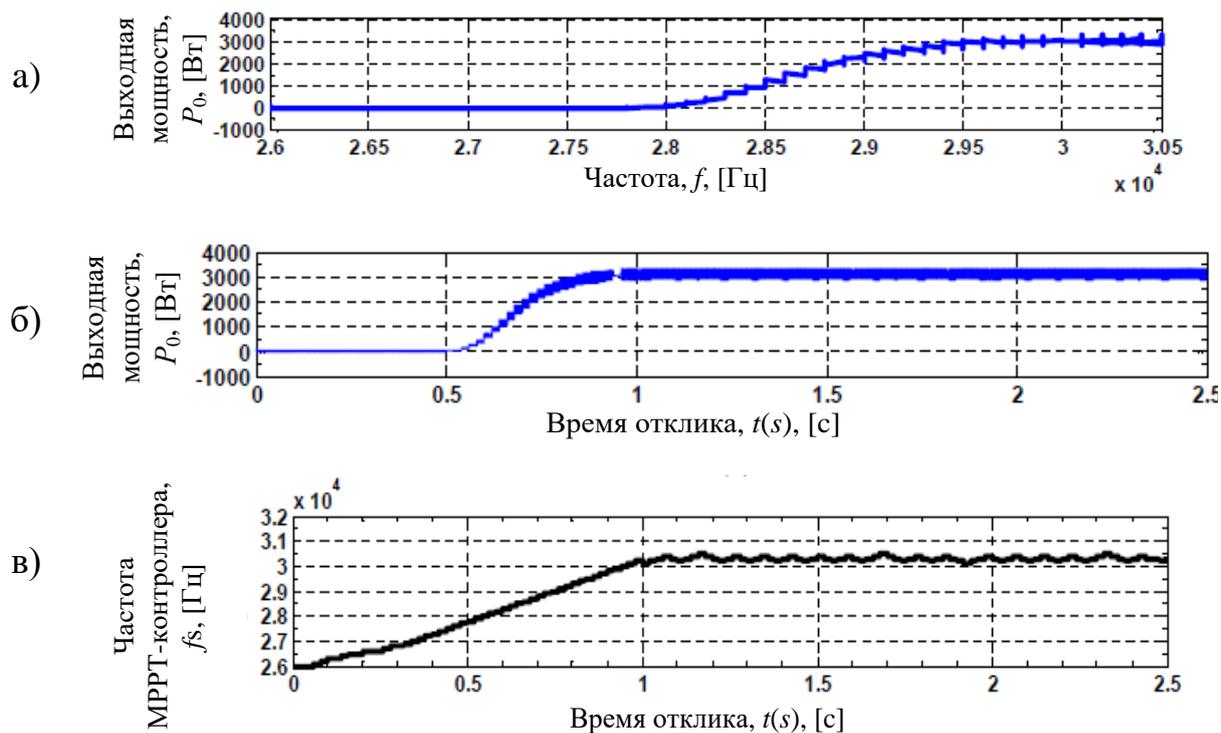


Рис. 10. Результаты моделирования (схема модели «батарея») изменений выходной мощности P_0 в зависимости: а) от изменения значений частоты f (при начальной частоте 26 кГц); б) от времени отклика $t(s)$; в) зависимость частоты МРРТ-контроллера от времени отклика

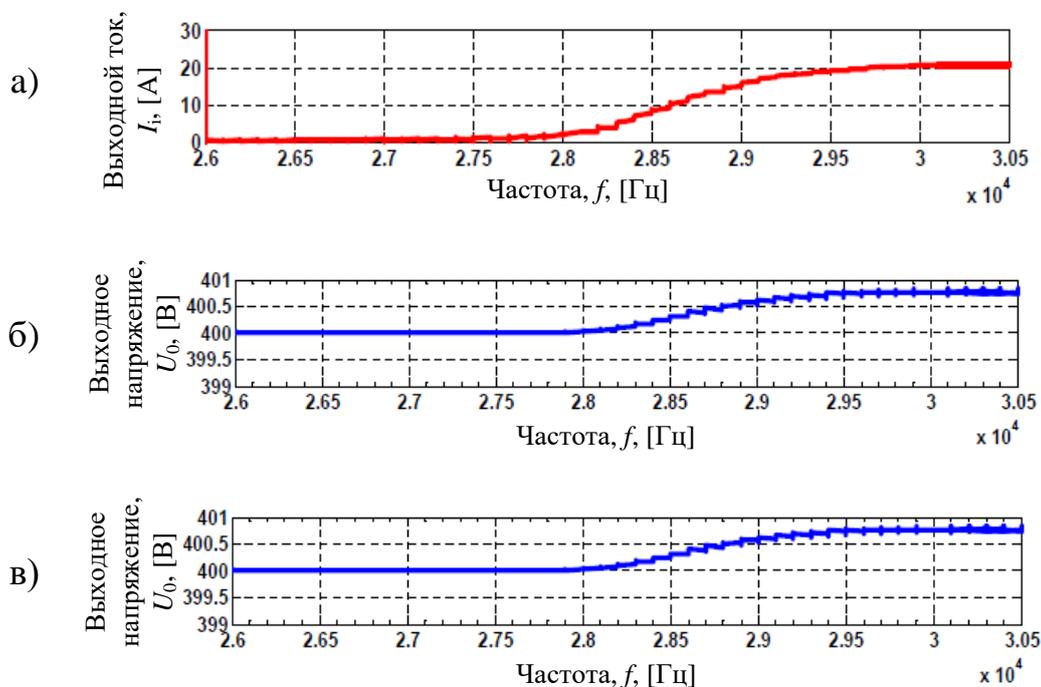


Рис. 11. Результаты моделирования (схема модели «батарея») изменений (при начальной частоте 26 кГц): а) входного тока (I_i) в зависимости от частоты (f); б) выходного напряжения (U_0) в зависимости от частоты (f); в) выходного напряжения (U_0) в зависимости от времени отклика $t(s)$

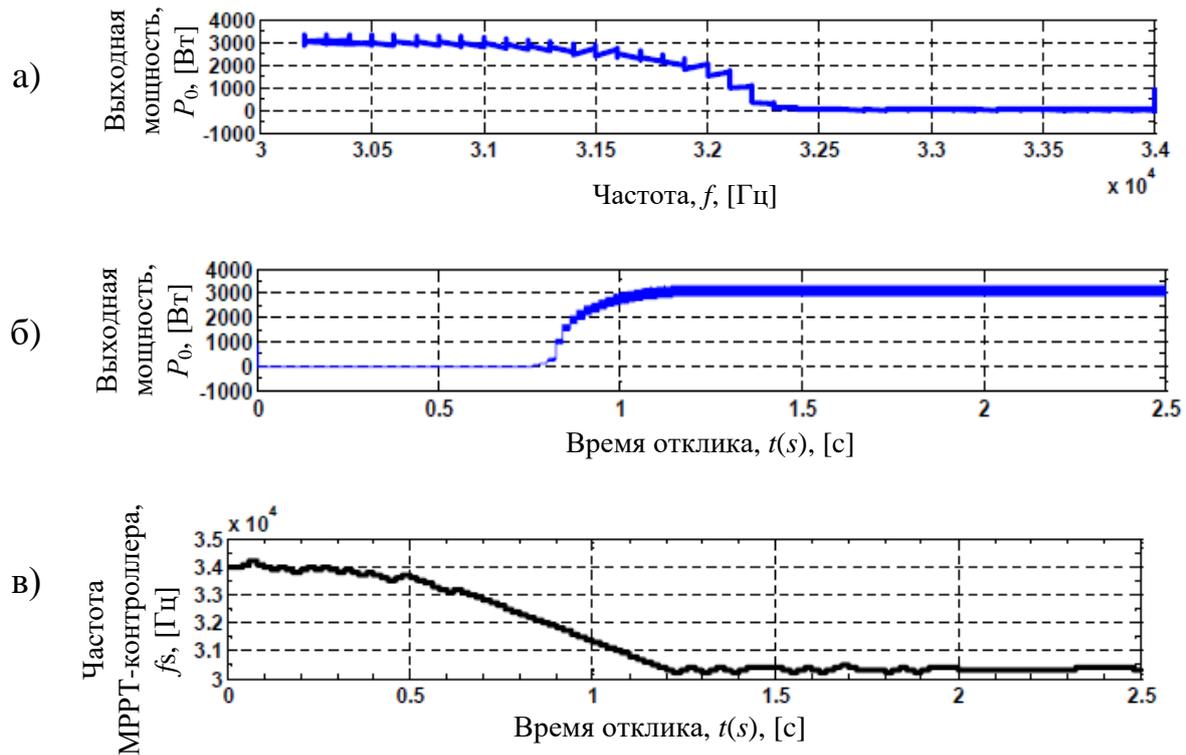


Рис. 12. Результаты моделирования (схема модели «батарея») изменений выходной мощности P_0 в зависимости: а) от изменения значений частоты f (при начальной частоте 34 кГц); б) от времени отклика $t(s)$; в) зависимость частоты МРРТ-контроллера от времени отклика

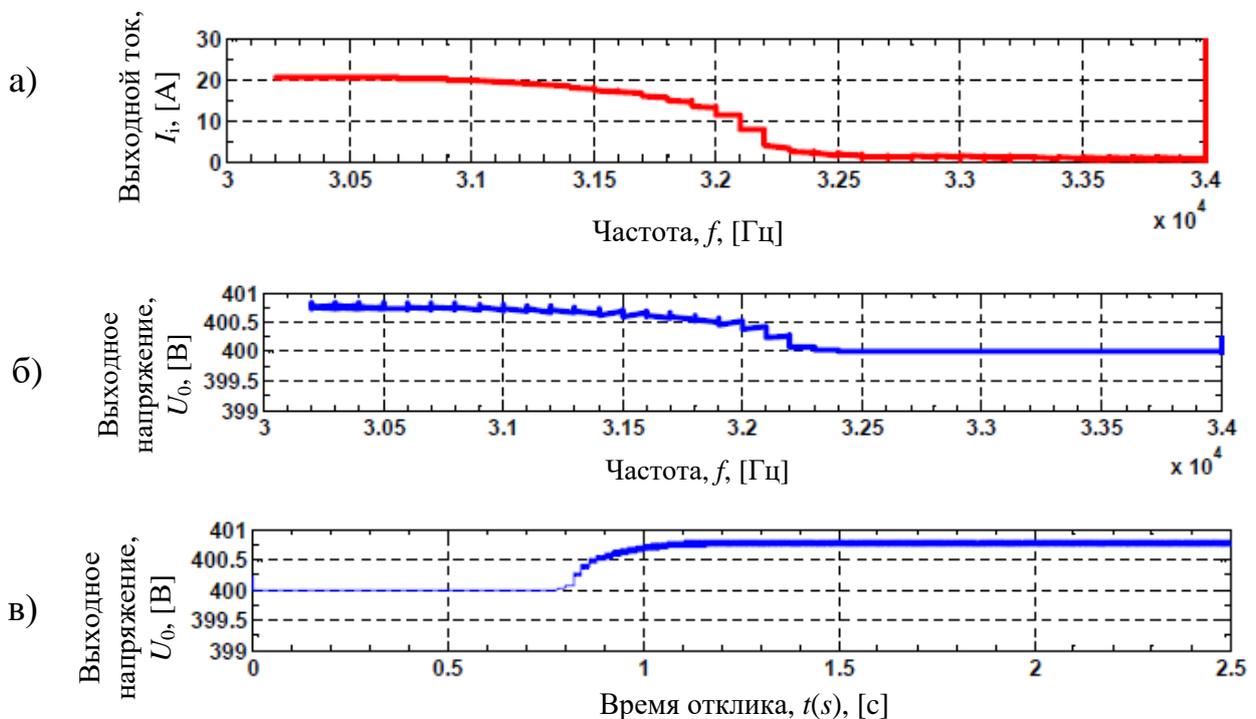


Рис. 13. Результаты моделирования (схема модели «батарея») изменений (при начальной частоте 34 кГц): а) входного тока (I_i) в зависимости от частоты (f); б) выходного напряжения (U_0) в зависимости от частоты (f); в) выходного напряжения (U_0) в зависимости от времени отклика $t(s)$

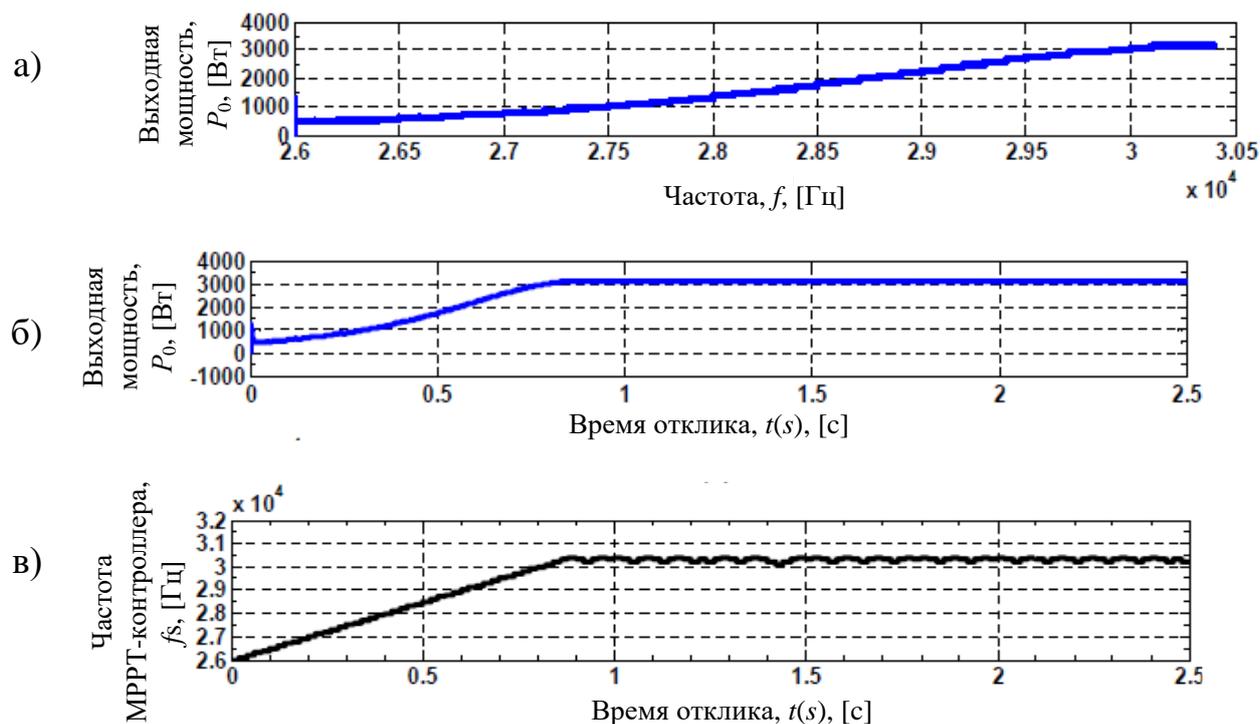


Рис. 14. Результаты моделирования (схема модели «резистивная нагрузка R_L ») изменений выходной мощности P_0 в зависимости: а) от изменения значений частоты f (при начальной частоте 26 кГц); б) от времени отклика $t(s)$; в) зависимость частоты МРРТ-контроллера от времени отклика

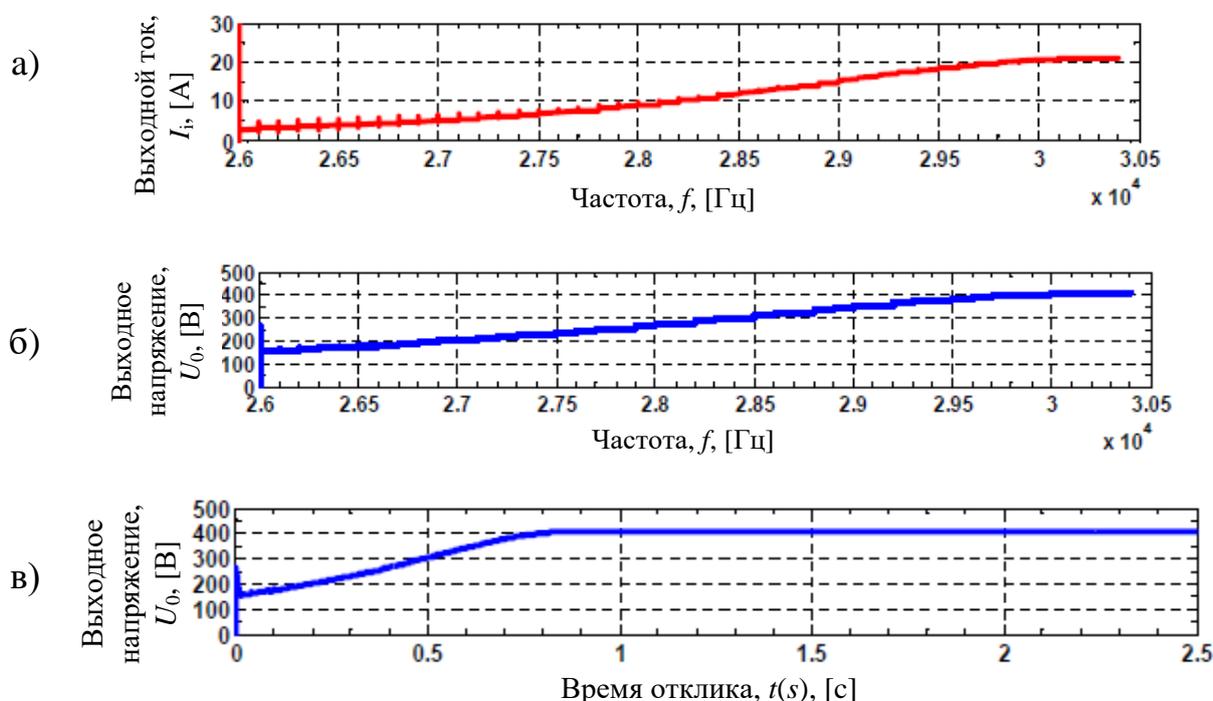


Рис. 15. Результаты моделирования (схема модели «резистивная нагрузка R_L ») изменений (при начальной частоте 26 кГц): а) входного тока (I_i) в зависимости от частоты (f); б) выходного напряжения (U_0) в зависимости от частоты (f); в) выходного напряжения (U_0) в зависимости от времени отклика $t(s)$

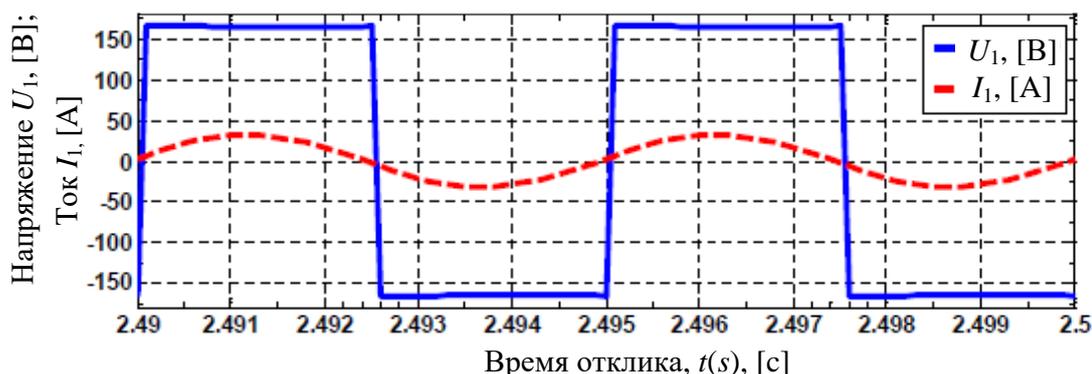


Рис. 16. Схема модели «батарея» с регулировкой частоты МРРТ-контроллером: циклограмма первичного напряжения (U_1) и тока (i_1) (при начальной частоте 26 кГц)

В варианте, когда БЗУ функционирует в режиме резистивной нагрузки (рис. 3а) контроллер с МРРТ-алгоритмом может применяться для проверки соответствия (правильности использования) R_L при не резонансных частотах. Результаты моделирования представлены на рис. 14 и Рис. 15. Сравнительный анализ результатов, представленных на рис. 14 и рис. 10 показал, что они практически носят идентичный характер. Однако сопоставление результатов, представленных на рис. 11 и рис. 15 показывает, что выходное напряжение (U_0) во втором варианте (варианте R_L) изменяется в зависимости от частоты во всем диапазоне полосы частот (рис. 15б). Это говорит о том, что вариант резистивной нагрузки также должен использоваться тогда, когда система находится в состоянии резонанса.

Единственным аспектом предлагаемого МРРТ-алгоритма управления, который можно отметить как недостаток, является то, что для нахождения необходимой частоты, как видно из приведенных выше данных, требуется время от 1,5 с до 2 с. Однако это является вполне приемлемым для БЗУ стационарного типа, но не приемлемо для технологии и устройств систем динамической бесконтактной зарядки, когда электроприводное транспортное средство должно подзарядаться в процессе движения [15].

Из приведенных выше описания МРРТ-алгоритма (рис. 9) БЗУ и результатов моделирования с его использованием (рис. 10–15), видно, что несмотря на определенную архитектурную схожесть, по своей функциональности и основополагающему функционалу он существенно отличается от классических МРРТ-алгоритмов, созданных ранее для систем управления фотоэлектрическими модулями СБ. Применение МРРТ-контроллеров с драйверами на базе разработанного МРРТ-алгоритма в составе системы управления БЗУ позволяет решить поставленную задачу управления частотными характеристиками БЗУ, автоматически определяя значение глобальной резонансной частоты для фактического сопряжения «транслятора» и бортового «приемника», соответствующее максимальной мощности, которая может передаваться на нагрузку при зарядке

транспортного средства, тем самым повышать эффективность процесса зарядки и самого БЗУ.

Заключение

Основным результатом проведенных исследований является разработанный МРРТ-алгоритм управления частотными характеристиками БЗУ, позволяющий при фактическом сопряжении стационарного «транслятора» зарядной площадки с бортовым «приемником» (в том числе различающихся по типу и классу) автоматически определять значение глобальной резонансной частоты для данного сопряжения, соответствующее максимальной мощности, которая может передаваться на бортовую нагрузку при зарядке транспортного средства. Разработанный МРРТ-алгоритм, реализуя классическую логику метода МРРТ применительно к БЗУ транспортных средств, имеет принципиальные отличия по своей функциональности и основополагающему функционалу от МРРТ-алгоритмов управления фотоэлектрическими модулями СБ, что является научной новизной разработки. МРРТ-алгоритм, созданный для БЗУ, позволяет единомоментно определять точку максимальной выходной мощности, и осуществлять пересчет значения рабочей коммуникационной частоты (частоты резонанса) перед началом цикла зарядки после парковки на зарядную площадку каждого конкретного транспортного средства, а не в соответствии со «счетчиком времени», формировать соответствующий сигнал команды управления для настройки частотных режимов функционирования БЗУ перед переходом системы на осуществление основного цикла процесса зарядки. Сравнительный анализ текущего уровня выходной мощности в соответствии предложенным МРРТ-алгоритмом осуществляется путем сопоставления значения величины мощности на текущей итерации со значением величины мощности на предыдущей итерации, т.е. для осуществления сравнительного анализа не используется «точка нуля», как предусмотрено МРРТ-алгоритмами, что позволяет повысить точность получаемого результата.

Основу предлагаемого МРРТ-алгоритма составляет разработанная в процессе исследований эквивалентная модель процесса электрических преобразований при передаче мощности в виде эквивалентной электрической схемы, представляющей систему с замкнутым контуром с обратной связью (что также является элементом новизны разработки), включающая подмодель бортовой нагрузки типа «батарея», т.е. нагрузки как источника напряжения (V_{bat}) с внутренним сопротивлением (r_{int}).

При этом дополнительно проведенные исследования, результаты которых также представлены в статье, показали, что представление бортовой нагрузки при моделировании процессов преобразований как «резистивная нагрузка – R_L » (при фиксированном выходном напряжении и мощности) допустимо только в том случае, когда рабочая частота, близка к глобальному системному резонансу, т.е. этот вариант не является приемлемым для решения исходно поставленной задачи.

Обоснованность предложенного МРРТ-алгоритма подтверждена результатами моделирования процесса управления частотными характеристиками БЗУ,

представленными в виде зависимостей выходной мощности (P_0), выходного напряжения (U_0) и входного тока (I_i) от частоты при условии постоянного входного напряжения. Зависимости получены с использованием разработанного МРРТ-алгоритма, встроенного в функциональную структуру программного комплекса MATLAB/Simulink. Полученные данные и выявленные в процессе исследований закономерности являются новыми и существенно расширяют общую базу знаний в области создания БЗУ для зарядки/подзарядки электроприводных технических средств различного назначения.

Результаты моделирования показали, что созданный МРРТ-алгоритм позволяет находить необходимое значение резонансной частоты с высокой точностью (с отклонением не более 100 Гц или $\approx 0,33\%$). Время отклика при этом составляет от 1 с до 2 с, что вполне удовлетворяет требованиям управления процессом бесконтактной зарядки транспортного средства на стационарной площадке.

Практическая значимость результатов проведенных исследований заключается в том, что разработанный МРРТ-алгоритм может быть использован разработчиками стационарных БЗУ в качестве составной части алгоритма системы управления процессом зарядки как инструмент повышения энергоэффективности и обеспечения совместимости «трансляторов» и «приемников» различных производителей.

В дальнейшем, на основе уже полученных результатов, автором планируется реализация работ по созданию МРРТ-алгоритма для системы управления устройством динамической бесконтактной зарядки, когда электроприводное транспортное средство подзарядается не на стационарной зарядной площадке, а в процессе движения, что является также весьма актуальной задачей.

Литература

1. Куркова О.П., Ефимов В.В. Численное компьютерное моделирование и оптимизация схемотехнических решений бесконтактных зарядных устройств для электроприводных транспортных средств // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 64-88. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10305.
2. Куркова О.П. Методика оценки совместимости бесконтактных зарядных устройств, поставляемых различными производителями для создания общественной инфраструктуры зарядки автономного электротранспорта // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 104-125. DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10105.
3. IEC 61980-1:2020 International Standard. Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems. Part 1: General requirements. Edition 2.0 2020-11. Geneva: IEC, 2020. 88 p.
4. ISO 19363:2020 (E) International Standard. Electrically propelled road vehicles. Magnetic field wireless power transfer. Safety and interoperability requirements. Edition 1.0 2020-04. Geneva: ISO, 2020. 46 p.
5. Boys J.T., Covic G.A., Green A.W. Stability and control of inductively coupled power transfer systems // IEE Proceedings – Electric Power Applications. 2000. Vol. 147. No 1. P. 37-43.

6. Sibue J.R., Ferrieux J.P., Meunier G., Periot R. Convertisseurs a Double Resonance pour l Alimentation de Transformateurs Faiblement Couples // European Powerlifting Federation, EPF 2010. Saint-Nazaire, France. Archives-ouvertes, HAL Id: hal – 00497650. [Электронный ресурс]. – URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00497650.pdf> (дата обращения 16.06.2021).

7. Jufer M., Germano P. Contactless power transmission: Frequency tuning by a maximum power tracking method // EPE 97. 7th European Conference on Power Electronics and Applications. – Trondheim, Norway. Sept. 8 – 10. Vol. IV. 1997. P. 693-697.

8. Brusamarello V., Blauth Y., Azambuja R., Muller I., Sousa F. Power Transfer with an Inductive Link and Wireless Tuning // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. May 2013. Vol. 62. No 5. P. 924-931.

9. Мухамбедьяров Б.Б., Лукичев Д.В., Полюга Н.Л. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1099-1107. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107.

10. Возмилов А.Г., Малюгин С.А., Малюгина А.А. Алгоритмы слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрических преобразователей // Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии: научный журнал. 2014. Т. 70. С. 18-25.

11. Brito M., Sampaio L., Luigi G., Melo G., Canesin C. Comparative analysis of MPPT techniques for PV applications // International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP. 2011. P. 99-104.

12. Murtaza A., Sher H., Chiaberge M., Voero D., Giuseppe M., Addoweesh K. Comparative analysis of maximum power point tracking techniques for PV Applications // International Conference on Multi Topic, INMIC. 2013. P. 83 – 88.

13. Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. A new Analog MPPT Technique: TEODI // Progress in Photovoltaics Research and Applications. January 2010. Vol. 18. No 1. P. 28-41. DOI: 10.1002/pip.943.

14. Чавчанидзе Г.Д. Электрическое моделирование физических процессов: учебно-методическое пособие для самостоятельной работы. – М.: Изд-во Российского университета транспорта (МИИТ), 2018. – 21 с.

15. Guidi G., Suul J. Transient Control of Dynamic Inductive EV Charging and Impact on Energy Efficiency when Passing a Roadside Coil Section // IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies Wireless Power Transfer (Wow). 2018. P. 1-7. DOI: 10.1109/WoW.2018.8450893.

References

1. Kurkova O.P., Efimov V.V. Computational Modeling and Circuit Solutions Optimization of the Contactless Chargers of the Electric Vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 64-88. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10305. (in Russian)

2. Kurkova O.P. Methodology for assessing the compatibility of contactless chargers supplied by various manufacturers to create a public charging infrastructure

for autonomous electric vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 1, pp. 104-125. doi: 10.24411/2410-9916-2021-10105. (in Russian)

3. IEC 61980-1:2020 International Standard. Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems. Part 1: General requirements. Edition 1.0 2015-07. Geneva, IEC, 2015. 88 p.

4. ISO 19363:2020 (E) International Standard. Electrically propelled road vehicles. Magnetic field wireless power transfer. Safety and interoperability requirements. Edition 1.0 2020-04. Geneva, ISO, 2020, 46 p.

5. Boys J.T., Covic G.A., Green A.W. Stability and control of inductively coupled power transfer systems. *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, 2000, vol. 147, no 1, pp. 37 – 43.

6. Sibue J., Ferrieux J., Meunier G., Periot R. Convertisseurs a Double Resonance pour l Alimentation de Transformateurs Faiblement Couples. *European Powerlifting Federation, EPF*, 2010. Saint-Nazaire, France, Archives - ouvertes, HAL Id: hal – 00497650. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00497650.pdf> (accessed 16 June 2021).

7. Jufer M., Germano P. Contactless power transmission: Frequency tuning by a maximum power tracking method. *EPE 97, 7th European Conference on power electronics and applications*, sept. 8 – 10, vol. IV, Trondheim, pp. 693-697.

8. Brusamarello V., Blauth Y., Azambuja R., Muller I., Sousa F. Power Transfer with an Inductive Link and Wireless Tuning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, May 2013, vol. 62, no. 5, pp. 924-931.

9. Mukhambedyarov B.B., Lukichev D.V., Polyuga N.L. Research of algorithms for finding the maximum power point for increasing the efficiency of photovoltaic converters. *Scientific and Technical, Bulletin of information technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1099-1107. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107 (in Russian)

10. Vozmilov A.G., Malyugin S.A., Malyugina A.A. Algorithms for tracking the point of maximum power of photovoltaic converters. *Bulletin of the Chelyabinsk State Agroengineering Academy: a scientific journal*, 2014, vol. 70, pp. 18-25 (in Russian).

11. Brito M., Sampaio L., Luigi G., Melo G., Canesin C. Comparative analysis of MPPT techniques for PV applications. *International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP*, 2011, pp. 99-104.

12. Murtaza A., Sher H., Chiaberge M., Boero D., Giuseppe M., Addoweesh K. Comparative analysis of maximum power point tracking techniques for PV Applications. *International Conference on Multi Topic, INMIC*, 2013, pp. 83-88.

13. Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. A new Analog MPPT Technique: TEODI. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, January 2010, vol. 18, no 1, pp. 28-41. doi: 10.1002/pip.943.

14. Chavchanidze G.D. *Electrical modeling of physical processes*. Moscow, Russian University of Transport (MIIT) Publ., 2018, 21 p. (in Russian).

15. Guidi G., Suul J. Transient Control of Dynamic Inductive EV Charging and Impact on Energy Efficiency when Passing a Roadside Coil Section. *IEEE PELS*

Workshop on Emerging Technologies Wireless Power Transfer (Wow), 2018, pp. 1-7.
doi: 10.1109/ WoW.2018.8450893.

Статья поступила 02 июля 2021 г.

Информация об авторе

Куркова Ольга Петровна – доктор технических наук. Профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов: системный анализ и моделирование сложных технических систем и процессов, исследование физики магнитных полей, процессов дистанционной передачи электрической мощности без проводов, других процессов на основе формирования и распространения магнитных и волновых взаимодействий. E-mail: aljaskaolga@mail.ru

Адрес: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67А.

MPPT algorithm frequency control as a tool for improving the energy efficiency of the process of contactless magnetic resonance charging of electric vehicles

O. P. Kurkova

Problem statement and specific task: Contactless magnetic resonance charging is currently recognized as one of the promising technologies for charging electric vehicles. However, when introducing contactless chargers, two main problems arise and must be solved: ensuring the compatibility of devices of various developers and manufacturers (since the contactless magnetic resonance charging consists of two components – a stationary «translator» and an on-board «receiver») and ensuring energy efficiency. Based on the physical principle that is the basis of the contactless chargers, the maximum level of transmitted power can be achieved when the system as a whole is in a state of global resonance. **The aim of the research** was to develop an algorithm for controlling the frequency characteristics of the contactless chargers, which allows for pairing a "translator" with an on-board "receiver" (including those that differ in type and class) automatically determine the value of the global resonant frequency for the actual pairing, corresponding to the maximum power that can be transmitted to the onboard load when charging the vehicle. **Methods and technologies used:** to solve the problem, when creating the algorithm, the method of "maximum power point tracking" (MPPT) is used; studies to identify the nature of the dependencies of the output power, output voltage and input current on frequency, as well as checking the efficiency of the algorithm were carried out on the basis of the method of equivalent electrical modeling of physical processes with the construction of models of processes occurring during the operation of the contactless chargers in the form of equivalent electrical circuits using the MATLAB/Simulink software package. To generate numerical initial data for solving the main problem, the method of preliminary computational finite element modeling of electromagnetic processes and variants of resonant compensation topologies using the COMSOL software package is applied. **Novelty of the result:** the main novelty of the research result is the MPPT-algorithm for controlling the frequency characteristics of the contactless chargers, created on the basis of an equivalent electrical model of a system with a closed loop and feedback, which allows automatically determining the value of the global resonant frequency corresponding to the maximum output power when the "translator" is paired with the "receiver". **Practical significance:** the developed MPPT-algorithm can be used by the developers of the contactless chargers as an integral part of the algorithm of the charge process control controller as a tool for improving energy efficiency and ensuring compatibility of "translators" and "receivers" of various manufacturers.

Keywords: electric transport, contactless charger, magnetic resonance induction, compatibility, energy efficiency, resonance, equivalent model, frequency control algorithm, maximum power point tracking method.

Information about Author

Olga Petrovna Kurkova – holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Facilities. St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Field of research: system analysis and modeling of complex technical systems and processes, research of the physics of magnetic fields, processes of remote transmission of electric power without wires, and other processes based on the formation and propagation of magnetic and wave interactions. E-mail: aljaskaolga@mail.ru

Address: Russia, 190000, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67, letter A.